

# Collectieve warmte naar lage temperatuur

## Een verkenning van mogelijkheden en routes



# Collectieve warmte naar lage temperatuur

## Een verkenning van mogelijkheden en routes

**Door:**

Edwin van Vliet (Greenvis)  
Jaap de Keijzer (Greenvis)  
Ewald Slingerland (Greenvis)  
Juriaan van Tilburg (Ecofys)  
Wieke Hofsteenge (Ecofys)  
Vera Haaksma (Ecofys)

**Datum: 29 september 2016**

**Projectnummer: UENNL16481**

Dit rapport is opgesteld in opdracht van RVO.nl voor de Topsector Energie op verzoek van de TKI Urban Energy

© Ecofys & Greenvis 2016

Image Coverpage © Photocrew/Fotolia.com

# Inhoudsopgave

<b>Samenvatting</b>	<b>1</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>3</b>
1.1 Doelstelling en doelgroep	5
1.2 Afbakening	5
1.3 Leeswijzer	6
<b>2 Achtergrond</b>	<b>8</b>
2.1 Vierde Generatie warmtenetten	9
2.2 Voorbeelden Nederlandse en buitenlandse LT-warmtenetten	10
<b>3 Transitiepaden naar lage temperatuur</b>	<b>14</b>
3.1 Transitiepaden HT warmtenet naar LT warmtenet	14
<b>4 Voorkeursroutes voor woningaanpassing</b>	<b>19</b>
4.1 Optimale combinaties van maatregelen in woningen in transitie van HT naar LT	19
4.2 Algemene conclusies	22
<b>5 Randvoorwaarden en barrières</b>	<b>24</b>
5.1 Randvoorwaarden	24
5.2 Barrières	25
<b>6 Bepalende factoren lage temperatuur warmte</b>	<b>28</b>
6.1 Leeswijzer: bepalende factoren bij de overgang van HT naar LT	28
6.2 Bepalende factoren voor aflevering	31
6.3 Bepalende factoren voor distributie	35

6.4	Bepalende factoren voor opwek	37
<b>7</b>	<b>Praktijk casussen</b>	<b>44</b>
7.1	Warmtenet Hengelo	44
7.2	Warmtenet Rotterdam	51
<b>8</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>59</b>
	<b>Bijlage A Definitie onderdelen warmtenet</b>	<b>62</b>
	<b>Bijlage B Tabellen bepalende factoren</b>	<b>65</b>
	<b>Bijlage C Berekeningen referentiewoningen</b>	<b>70</b>
	<b>Bijlage D Lijst geïnterviewde personen</b>	<b>74</b>
	<b>Bijlage E Methodologie scoretabel &amp; keuzeschema</b>	<b>75</b>
	<b>Bijlage F Overzicht bestaande literatuur</b>	<b>80</b>

## Samenvatting

Gedreven door (inter)nationale klimaatafspraken is er een grote interesse in praktische manieren om de gebouwde omgeving energetisch te verduurzamen. Voor 2050 wordt zelfs gesproken over een volledig energieneutrale woningvoorraad. De warmtevoorziening voor woningen vormt het grootste aandeel in het energieverbruik en het brengt de grootste uitdagingen met zich mee om de verduurzamingsdoelstellingen op dit terrein waar te maken. Dit vraagt daarom veel aandacht. Warmtenetten zijn een waardevolle oplossing die een belangrijke bijdrage kunnen leveren aan deze verduurzaming van warmte, mits deze duurzame warmte benutt wordt als bron.

Er is een groot potentieel aan duurzame warmtebronnen zoals bodemwarmte en restwarmte uit de gebouwde omgeving, echter deze bronnen zijn vaak op lagere temperaturen beschikbaar dan tot nu toe gebruikelijk is in warmtenetten. Lage temperatuur warmtenetten (LT-netten) **(H2)** openen de mogelijkheid om in de toekomst gebruik te maken van dergelijke bronnen. Bovendien kan dit bijdragen aan het verhogen van de efficiëntie van warmtenetten, met minder energieverliezen dan de huidige hoge temperatuur systemen. De ervaring met grootschalige LT-netten is wereldwijd nog beperkt en met name de transitie van bestaande hoge temperatuur netten naar lage temperatuur en de toepassing in bestaande bouw zijn uitdagend. Deze verkenning heeft als doel om structuur aan te brengen in de overwegingen die komen kijken bij deze transitie.

Afhankelijk van de lokale situatie zijn er verschillende transitiepaden mogelijk, waarin gefaseerd de warmteaflevering van individuele woningen of wijken kan worden verlaagd in temperatuur **(H3)**. Ook bij de aangesloten woningen moet veel gebeuren. Voorkeursroutes beschrijven de kosten-optimale wijze waarop woningen geschikt worden gemaakt voor lage temperatuur. Dit vraagt om vergaande isolatie en aanpassingen aan het verwarmingssysteem **(H4)**. Hoe de transitie er uiteindelijk uit ziet, wordt lokaal bepaald. Voor het ene warmtenet zal deze anders zijn dan voor het andere. De transitiepaden en voorkeursroutes in deze verkenning geven inzicht in welke maatregelen moeten worden genomen bij de opwek, distributie en afname van warmte en wat de randvoorwaarden en kansen hierbij zijn **(H4, 5, 6)**.

Hoewel de ervaring met lage temperatuur warmtenetten in Nederland nog beperkt is, is duidelijk dat de belangrijkste uitdagingen in de transitie niet zozeer van technische aard, maar met name organisatorisch en financieel. Organisatorisch, omdat er gecoördineerde maatregelen nodig zijn bij zowel de opwek, de distributie en de afname. Financieel, omdat met name de kosten van aanpassingen in bestaande woningen aanzienlijk zijn. Deze kunnen alleen rendabel zijn als er collectief en in de gehele keten wordt overgegaan op lage temperatuur verwarming. Daarbij is, om de transitiekosten bij woningen zo laag mogelijk te houden een grootschalige en projectmatige renovatie-aanpak nodig. Het bereiken van de sociale acceptatie en het draagvlak die hierbij essentieel zijn is hierbij een belangrijk aandachtspunt. Vanwege de meer ingrijpende aanpassingen in bestaande woningen is dit voor LT netten nog meer het geval dan voor het aansluiten van bestaande woningen op een hoge temperatuur warmtenet **(H5)**. Als het gaat om nieuwbouw, daarentegen, dan is er op dit terrein geen duidelijk verschil tussen lage en hoge temperatuur warmtenetten.

Bij het aansluiten van woningen op lage temperatuur is er voor warm tapwater een alternatieve of aanvullende oplossing nodig. Warm water temperaturen onder de 55-60°C zijn in verband met de huidige regels rondom Legionella preventie niet geschikt voor tapwater gebruik, er zijn wel alternatieven beschikbaar echter zijn deze in vergelijking met de huidige installaties relatief kostbaar en energie-intensief. Om deze reden moeten woningen bij een lage temperatuur warmte aansluiting aparte maatregelen treffen om warm water te gebruiken. Op dit moment wordt hiervoor meestal naverwarming via een elektrische- of gasboiler of een (booster)warmtepomp toegepast **(H6)**.

De transitie van HT naar LT warmtenetten wordt aan de hand van twee casussen nader toegelicht: de warmtenetten Hengelo en Rotterdam **(H7)**. Uit deze praktijkvoorbeelden kunnen belangrijke eerste lessen worden geleerd die kunnen bijdragen aan een efficiënte toepassing van lage temperatuur warmtenetten als onderdeel van de duurzame warmtetransitie.

Op basis van de bevindingen van deze studie is een belangrijke aanbeveling om aan te sturen op meer vroege praktijkervaring met het realiseren van lage temperatuur warmtenetten in Nederland. Op deze wijze worden "lessons learned" en "best practices" snel duidelijk, juist op het vlak van de eerder genoemde organisatorische en financiële uitdagingen. Deze zullen sterk bijdragen aan het opbouwen van een efficiënt en replicieerbaar model voor het realiseren van LT warmtenetten, daar waar deze een goede oplossing zijn voor het verduuzamen van de warmtevoorziening.



# 1 Inleiding

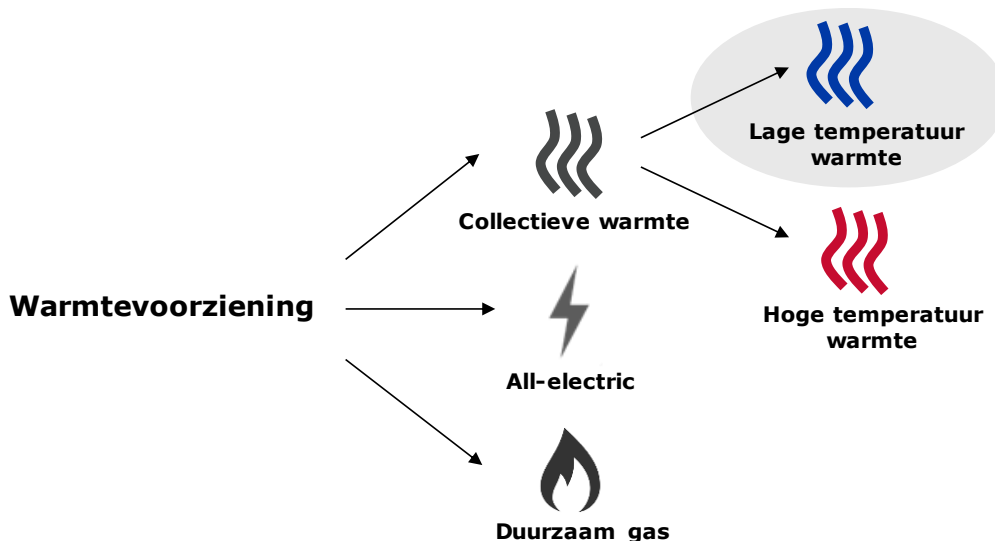
Nederland staat voor de opgave om in de nationale woningvoorraad verregaand te verduurzamen door energie-efficiëntie en de inzet van duurzame bronnen van energie, met als doel een volledig energie neutrale gebouwde omgeving in 2050. (Inter)nationale afspraken over beperking van de CO<sub>2</sub>-uitstoot, zoals het Energieakkoord in Nederland en het recentere Parijsche klimaatakkoord uit 2015, zijn de drijvende krachten achter deze opgave. Daarnaast is de afnemende productie van aardgas in Nederland en de toenemende import-afhankelijkheid van aardgas voor verwarming in de gebouwde omgeving een belangrijke factor, als gevolg van de winnings- en inzetstrategie van Gronings aardgas.

Het staande beleid betekent dat nieuw te bouwen woningen vanaf 2020 (bijna) energieneutraal moeten zijn. Voor bestaande bouw ligt er nog een grotere uitdaging om per 2050 (bijna) energieneutraal te zijn, vanwege de hoge kosten, complexiteit van woningrenovatie en benodigde aanpassingen aan bestaande infrastructuur.

Binnen de bestaande bouw gaat het grootste deel van de energievraag uit naar woningverwarming en warm tapwater. Veel maatregelen op energiebesparingsgebied richten zich dan ook op het verduurzamen van deze warmtevraag, via isolatie en duurzame warmteproductie en -levering. Kijkend naar woningverwarming zijn er grofweg drie verduurzamingsrichtingen in de bestaande bouw, die afhankelijk van de lokale situatie alle valide oplossingen kunnen zijn (zie Figuur 1-1):

- *All-electric oplossingen*: verregaande isolatie (beter dan label A) en woningverwarming via (duurzaam opgewekte) elektriciteit. Daarbij vragen all-electric toepassingen een robuuste elektriciteitsinfrastructuur. All-electric toepassing is met name kansrijk in nieuwbouw woningen of woningen die geheel zijn gerenoveerd (bijvoorbeeld nul-op-de-meter concept). All-electric toepassingen zijn in principe zowel in steden als in buitengebieden te realiseren. Toepassing in buitengebieden is kansrijk vanwege de beschikbaarheid van grondgebonden woningen voor het gebruik van bodemwarmtepompen en beschikbaar dakoppervlak voor opwek van zonne-energie.
- *Collectieve warmte*: collectief opwekken en distribueren van duurzame warmte voor woningverwarming. Dit kan zowel hoge als lage temperatuur warmte zijn. Warmtenetten zijn economisch met name interessant in stadswijken waar in een beperkt gebied een grote concentratie van (grote) warmtevragers is en geschikte warmtebronnen aanwezig zijn.
- *Duurzaam gas*: individueel of collectief gebruik van duurzaam bio- of synthetisch gas voor de verwarming van woningen. De mate van beschikbaarheid van deze vorm van gas is nog onzeker; op dit moment is deze minimaal. Het is te verwachten dat bij beperkte beschikbaarheid deze vorm van gas wordt ingezet voor de meest hoogwaardige toepassingen: gebruikers die geen of beperkte alternatieven hebben, zoals in de chemische industrie of als brandstof in lucht- en scheepvaart.

Dit document richt zich specifiek op de warmtevoorziening via collectieve, lage temperatuur warmtenetten. In Nederland zijn er verschillende steden met warmtenetten en is er groeiende aandacht voor de rol van deze netten in de transitie naar een energie-neutrale gebouwde omgeving. Dit uit zich onder andere in de uitwerking van implementatieroutes voor warmte en koude in het Energieakkoord, de warmtevisie van het Ministerie van Economische Zaken en het ontstaan van regionale samenwerkingsverbanden zoals het Programmabureau Warmte Koude Zuid-Holland.



**Figuur 1-1. Afwegingskader verduurzaming warmtevoorziening**

Waar historisch gezien de temperatuur in warmtenetten rond, of zelfs boven de 100°C lag, zijn er steeds meer netten waarin de temperatuur een stuk lager is. Deze lage temperatuur (LT) warmtenetten zijn interessant vanwege twee belangrijke ontwikkelingen:

1. Aan de aanbodkant leiden CO<sub>2</sub>-emissiedoelstellingen tot het uitfaseren van kolen- en gascentrales in de komende decennia. Deze conventionele bronnen van warmte zullen in de toekomst verdwijnen. Dit geldt ook voor de beschikbaarheid van warmte uit het verbranden van afval in afvalverbrandingsinstallaties (AVI's). Efficiëntere afvalverwerking en recycling leidt namelijk tot een reductie in afvalstromen. In de industrie zorgt efficiëntieverbetering ervoor dat niet alleen de hoeveelheid beschikbare restwarmte afneemt, maar ook de temperatuur van de restwarmte. Het is een uitdaging om die bronnen het meest effectief in te zetten.
2. Aan de gebruikerskant neemt de warmtevraag per woning voor ruimteverwarming sterk af door energiebesparingsmaatregelen zoals isolatie en warmteterugwinning. Deze lagere warmtevraag maakt het mogelijk om met een lagere temperatuur te verwarmen en hiervoor lage temperatuur warmtebronnen te gebruiken. In tegenstelling tot de afnemende vraag voor ruimteverwarming neemt de vraag naar warm tapwater in absolute zin toe. Dit komt mede doordat men vaker per dag doucht en per douchebeurt meer warm water gebruikt. De verwachting is echter dat deze trend weer zal afvlakken.



Deze ontwikkelingen aan zowel de aanbod- als vraagkant maken lage temperatuur warmtenetten aantrekkelijker ten opzichte van hoge temperatuur netten. In nieuwe warmtenetten kan al in het ontwerp rekening worden gehouden met het temperatuurregime. Voor bestaande netten echter is het verlagen van de temperatuur een uitdaging. Veranderingen in de nettemperatuur kunnen niet los worden gezien van de eigenschappen van aangesloten woningen en de beschikbare bronnen. De overgang naar lage temperatuurnetten bij bestaande collectieve warmtelevering vraagt daarom om een integrale benadering.

Naast de ontwikkelingen in het ontsluiten van lage temperatuur warmtebronnen zijn er ook ontwikkelingen in het gebruik van warmte uit elektriciteit (power to heat). Elektriciteit tegen lage of zelfs negatieve marktprijzen, kan door middel van boilers of warmtepompen worden omgezet in warmte. In de studie "Flexibiliteit voor en door warmte", die op dit moment wordt uitgevoerd door Ecofys en Greenvis in opdracht van Gasunie, Provincie Zuid-Holland en Programmabureau Warmte Koude Zuid-Holland, wordt hier speciale aandacht aan besteed.

## 1.1 Doelstelling en doelgroep

Deze verkenning beschrijft de factoren die een bepalende rol hebben in de overgang naar het gebruik van lagere temperaturen in bestaande warmtenetten. Hierbij nemen we niet aan dat lage temperatuur warmte de beste of de enige optie is om de warmtevraag van de gebouwde omgeving in te vullen. Hierbij moet steeds goed gekeken worden naar de lokale situatie. In bepaalde gevallen kunnen LT warmtenetten een hoofdrol spelen in een optimale verduurzamingsstrategie, terwijl in andere gevallen juist andere oplossingen optimaal zullen blijken, zoals hoge temperatuur warmte, all-electric of duurzaam gas oplossingen.

Deze verkenning is bedoeld om een gemeenschappelijke kennisbasis te vormen die kan bijdragen aan besluitvormingsprocessen bij verschillende doelgroepen: eigenaren en exploitanten van warmtenetten, warmteleveranciers, gebiedsontwikkelaars en warmteafnemers, zoals woningcorporaties.

Naast bepalende factoren zijn een aantal transitiepaden van HT- naar LT-warmtenetten geschetst en de bijbehorende kansen en randvoorwaarden geïdentificeerd. Hoewel de verkenning focust op de overgang van gas- en bestaande traditionele HT-netten naar LT-netten, kunnen de geleerde lessen in deze verkenning ook worden toegepast voor situaties waarin een LT-warmtenet wordt aangelegd.

De informatie in deze verkenning is gebaseerd op literatuurstudie (zie Bijlage D) en interviews met experts en betrokken partijen (zie Bijlage E). TKI Urban Energy en RVO hebben als opdrachtgevers een belangrijke stem gehad in de opzet en invulling van deze verkenning. Verder werd de studie ondersteund door een klankbordgroep met brede vertegenwoordiging van partijen uit de warmtesector.

## 1.2 Afbakening

Een LT-warmtenet is een warmtenet dat warmte levert met een aanvoertemperatuur van 40-55°C voor gebruik in ruimteverwarming en/of voor warm tapwater. Deze afbakening sluit aan bij de

definitie van lage temperatuur verwarming en LT-netten die gehanteerd wordt binnen de richtlijnen voor installatietechniek, ISSO<sup>1</sup>.

Voor de ruimteverwarming wordt uitgegaan van direct gebruik van de warmte op dit temperatuurniveau. Voor warm tapwater is een minimale temperatuur van 55°C wettelijk vereist op de tappunten. Dit betekent dat bij de gebruiker de temperatuur van tapwater moet worden verhoogd voor daadwerkelijk gebruik. In deze verkenning wordt dit lokale opwaardering genoemd.

Er zijn ook warmtenetten op een temperatuur die lager is dan 40°C, waarvan de warmte niet voldoende verwarmingscapaciteit geeft voor ruimteverwarming. Bij deze netten moet de warmte, voor gebruik, worden opgewaardeerd. Dergelijke netten worden bronnetten genoemd, omdat zij de bron vormen voor opwaardering met bijvoorbeeld warmtepompen. In praktijk is het onderscheid tussen bronnetten en LT-netten niet altijd scherp en ontstaan er mengvormen. Dit is bijvoorbeeld het geval als er op het net warmte uitwisseling plaatsvindt tussen afnemers, door bijvoorbeeld restwarmte en koeling. Voorbeelden van deze mengvormen zijn te vinden bij Mijwater in Heerlen. Dit type netten hebben daarnaast eigen kansen en uitdagingen en verdienen daarom een los onderzoek. Een dergelijk onderzoek is op dit moment in voorbereiding door TKI Urban Energy en RVO. De lessen uit deze netten die toepasbaar zijn op de transitie naar LT-netten zijn wel in deze verkenning meegenomen.

Hoewel deze verkenning de nadruk legt op verwarming van woningen, zijn de factoren en trends veelal van algemene aard. Dit betekent dat deze ook toepasbaar zijn bij warmtenetten voor utiliteitsgebouwen zoals scholen en kantoren.

### 1.3 Leeswijzer

Deze verkenning bestaat uit een aantal hoofdstukken die telkens een belangrijk aspect van LT-netten beschrijven. Hoofdstuk 2 beschrijft de ontwikkeling van warmtenetten over de tijd en de continue ontwikkeling van lagere temperaturen voor warmtelevering in woningen. Het beschrijft ook een overzicht van de huidige LT warmteprojecten in Nederland en daarbuiten. Hoofdstuk 3 beschrijft een aantal transitiepaden voor de overgang van HT- naar LT-netten. Deze transitiepaden geven handvatten voor het besluiten over en voor het implementeren van LT warmtenetten in de warmtetransitie.

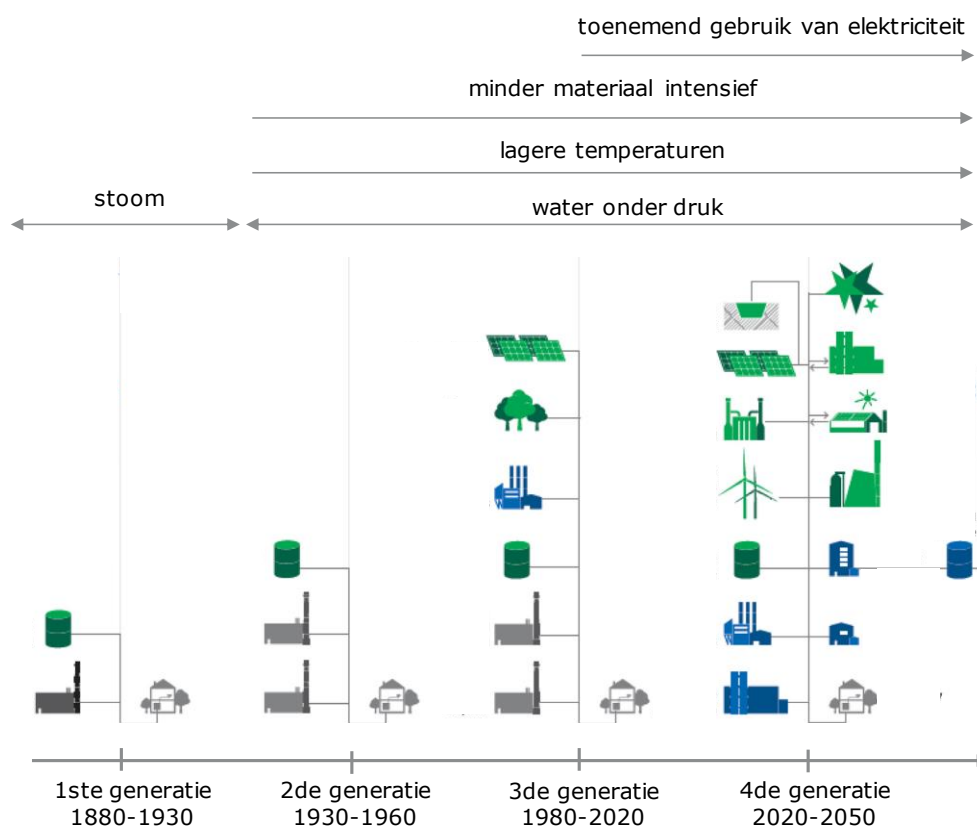
---

<sup>1</sup> ISSO: publicaties welke als normstellende richtlijnen gebruikt worden via standaardbeschrijvingen, kwaliteitsborg en certificatieregelingen. Het temperatuurregime van afgiftesystemen voor lage temperatuur verwarming heeft volgens het ISSO-handboek installatietechniek (deel II) een aanvoertemperatuur van <55°C. ISSO 7 hanteert voor lage temperatuurnetten een aanvoer tussen 70°C en 40°C. Omdat in deze verkenning uitgegaan wordt van de vraag vanuit het gebouw, is er hier gekozen om een bovengrens van 55°C te hanteren. Netten met een aanvoertemperatuur boven de 55°C worden in dit onderzoek gezien als een midden- of hoog-temperatuurnetten.

In hoofdstuk 4 worden de economisch optimale routes van HT- naar LT-waterlevering geschetst op basis van twee type referentiewoningen: tussenwoningen en appartementen. De randvoorwaarden die essentieel zijn om een succesvolle implementatie van lage temperatuur warmte in het net en in de woningen te realiseren worden beschreven in hoofdstuk 5. Daarnaast behandelt dit hoofdstuk de veelvoorkomende barrières. Om in de warmtetransitie de bepalende factoren te kunnen duiden, beschrijft hoofdstuk 6 de drie delen van een warmtesysteem (aflevering, opwek en distributie) en wordt toegelicht welke rol deze spelen in de transitie. Tot slot wordt in hoofdstuk 7 de concrete toepassing van de transitie geïllustreerd aan de hand van twee case studies.

## 2 Achtergrond

Als sinds de negentiende eeuw wordt er gebruik gemaakt van restwarmte om in de collectieve warmtevraag van woningen te voorzien. Sindsdien zijn de netten verder uitgebreid en is de omvang, efficiëntie en veiligheid van warmtelevering toegenomen. Waar aanvankelijk restwarmte van alle temperaturen werd gezien als een restproduct, is met name vanaf de tweede helft van de twintigste eeuw een groeiende aandacht voor energiebesparing en daarmee ook een geleidelijke verlaging van de temperatuur waarbij warmte de titel 'restwarmte' krijgt. De ontwikkeling van de warmtevoorziening is hieronder aan de hand van vier generaties weergegeven (zie Figuur 2-1). In de praktijk zijn er ook warmtenetten die een combinatie vormen van onderstaande generaties.



**Figuur 2-1. Ontwikkeling warmtenetten in vier generaties (SP Technical Research Institute of Sweden, 2015; Lund et al., 2014)**

1. De **eerste generatie** warmtenetten werd geïntroduceerd in de Verenigde Staten in de jaren '80 van de 19e eeuw. Deze generatie warmtenetten maakte gebruik van stoom als warmtedrager. De warmte van de stoom werd afgegeven tijdens de condensatie in radiatoren. Bijna alle warmtenetten die in de periode 1880 tot 1930 zijn aangelegd zijn gebaseerd op deze technologie. Omdat deze techniek leidt tot aanzienlijke warmteverliezen en er zich incidenten voordeden met dodelijke afloop, is de tweede generatie warmtenetten ontstaan.
2. De **tweede generatie** warmtenetten zijn aangelegd in de periode 1930 tot 1980. De warmtedrager binnen deze generatie warmtenetten is niet langer stoom maar heet water onder druk met een temperatuur boven de 100°C. Een belangrijke stimulans voor het ontstaan van de tweede generatie warmtenetten was de ontwikkeling van warmtekrachtkoppelingen (WKK) om brandstof te besparen.
3. Zowel bij de eerste als de tweede generatie warmtenetten werden leidingen gelegd in betonnen kokers. Dit in tegenstelling tot de **derde generatie** warmtenetten waarbij het water gedistribueerd werd in voorgeïsoleerde leidingen die direct in de grond werden gelegd. Derde generatie warmtenetten maken vaak gebruik van warm water met een temperatuur tot 100°C als warmtedrager. Een belangrijke reden waarom de temperatuur werd verlaagd was leveringszekerheid. Na de oliecrisis wilden steden en warmtebedrijven nog meer gebruik maken van WKKs en olie als bron vervangen door andere aanwezige warmtebronnen, zoals afval en biomassa. Het grootste deel van de bestaande warmtenetten behoren tot deze derde generatie (Lund et al., 2014).

## 2.1 Vierde Generatie warmtenetten

De wens om duurzame warmtebronnen, zoals stedelijke restwarmte, geo- en zonthermie, te gebruiken voor de warmtevoorziening stimuleert verdere verlaging van de temperatuur in het warmtenet. De ontwikkeling naar een net met meerdere verspreide bronnen wordt ook wel aangeduid als **vierde generatie**. Naast deze ontwikkeling valt binnen vierde generatie warmtenetten ook de verduurzaming van de bestaande warmtebronnen.

Een andere stimulans is de formulering van wet- en regelgeving als de Europese "Energy Efficiency Directive" en nationale normen op het gebied van energieprestatie, zoals de Energie Prestatie Coëfficiënt (EPC), voor besparingen op het gebied van energieconsumptie. Door deze eisen neemt het isolatieniveau in de gebouwde omgeving sterk toe, in eerste instantie vooral in nieuwbouwwoningen, maar in de toekomst ook nadrukkelijk in bestaande bouw. Met de toename van het isolatieniveau in de gebouwde omgeving neemt de warmtevraag af.

Duurzaamheidseisen aan zowel de vraag- als aanbodkant stimuleren de ontwikkeling van de vierde generatie warmtenetten op lage temperatuur. De traditionele top-down benadering waar een centrale bron een heel net voedt is dan niet meer de dominante benadering. In deze netten is er een grote diversiteit van verschillende kleine bronnen met elk hun eigen karakteristieken.

Warmte uitwisseling tussen bronnen en het net en zelfs tussen gebruikers onderling vraagt een bottom-up en maatwerk benadering.

## 2.2 Voorbeelden Nederlandse en buitenlandse LT-warmtenetten

Op verschillende locaties in Europa zijn LT-warmtenetten ontwikkeld (zie Tabel 2-1). Hieronder worden enkele van deze warmtenetten (afkomstig uit het SP Technical Research Institute of Sweden (2015) onderzoek) beschreven evenals enkele Nederlandse LT-warmtenetten.

**Tabel 2-1. Overzicht warmteprojecten (op basis van Technical Research Institute of Sweden, 2015) (legenda:  $T_a$  = Taanvoer in °C,  $T_r$  = Tretour in °C)**

Warmteproject	Land	Transitiepad	$T_a$	$T_r$	Opwek	Distributie	Aflevering
Aarhus (Lystrup)	DK	LT warmte in gescheiden deel HT-net	55	30	Verbinding met midden temperatuur net	Twin leidingen	Warm tapwaterinstallatie (inclusief buffervat) en direct gebruik van water voor vloerverwarming en radiatoren.
Slough	UK	Nieuw LT-net	55	25	Biomassa, warmtepompen en zonnepanelen	Twin leidingen	Direct gebruik van water voor radiatoren en warm tapwater (exclusief buffervat), plus warmteterugwinning uit ventilatie.
Ludwigsberg	DE	LT warmte in gescheiden deel HT-net; woningen op retourleiding	40	20	Verbinding met retour HT-net en in de toekomst zonnethermie	Cascadering	Direct als indirecte verbinding met warmtenet voor ruimteverwarming, geen warm tapwaterinstallaties nodig.
Kortrijk (Vennig)	BE	Nieuw LT-net	50	25	Houtsnipper ketel	-	Indirecte verbinding met ruimteverwarming, gebruik buffervaten voor warm tapwater (45°C aanvoertemperatuur vereist).
Okotoks	CA	Nieuw LT-net	37 - 55	-	Zonne-collectoren, gasgestookte boilers, dag- en seizoensopslag	-	Warm tapwater onafhankelijk van warmtenet door zonnecollectoren (en gasketels), plus warmteterugwinning uit ventilatie.
Roosendaal	NL	Nieuw LT-net	40	25	AVI	-	Het ROC heeft gasketels voor het opwaarderen van warmte uit het warmtenet.
Mijnwater	NL	Bronnet	28	16	Opslag en restwarmte	-	Boosterwarmtepomp voor het warmtapwater en eventueel warmtepomp voor ruimteverwarming.

### **Aarhus (Lystrup, Denemarken)**

Sinds 2010 zijn in dit gebied 40 'low-energy' woningen en één gemeenschappelijk gebouw aangesloten op een lokaal warmtenet, die de woningen zowel van ruimteverwarming als warm tapwater voorziet. Het gaat hier om een laagtemperatuur stadsverwarmingsnet met een temperatuurregime van 55°C aanvoer en 30°C retour. De temperatuur voor warm tapwater ligt rond de 45°C. Verder is er een verbinding met een midden temperatuur warmtenet die tijdens winterperiodes 80°C kan leveren. Dit lage temperatuur net is een voorbeeld van het transitiepad "LT-warmte in een gescheiden deel van het HT-net", welke verder uitgewerkt wordt in hoofdstuk 3.

### **Slough (England)**

In Slough zijn in totaal tien woningen en een informatiecentrum aangesloten op een experimenteel LT-warmtenet, wat sinds 2010 in werking is. De bedoeling van het systeem is het demonstreren van verschillende duurzame technologieën in combinatie met 'low-energy' woningen. Het gaat hier om een aanvoertemperatuur van 55°C en retour van 25°C met een warm tapwater temperatuur van rond de 43°C.

### **Ludwigsburg (Duitsland)**

Dit warmtenet is een cascade van het warmtenet dat er in de rest van het gebied ligt. Het koppelt de warmte af van de retourleiding, en heeft een temperatuurregime van 40-20°C. Naast deze cascade is er zonthermie op het net geïntegreerd, en zijn er toekomstplannen om het hoofdnet te gaan voeden met geothermie als basislast. Dit lage temperatuurnet is een goed voorbeeld van het transitiepad "cascadering (multi-line networks)", welke verder uitgewerkt wordt in hoofdstuk 3.

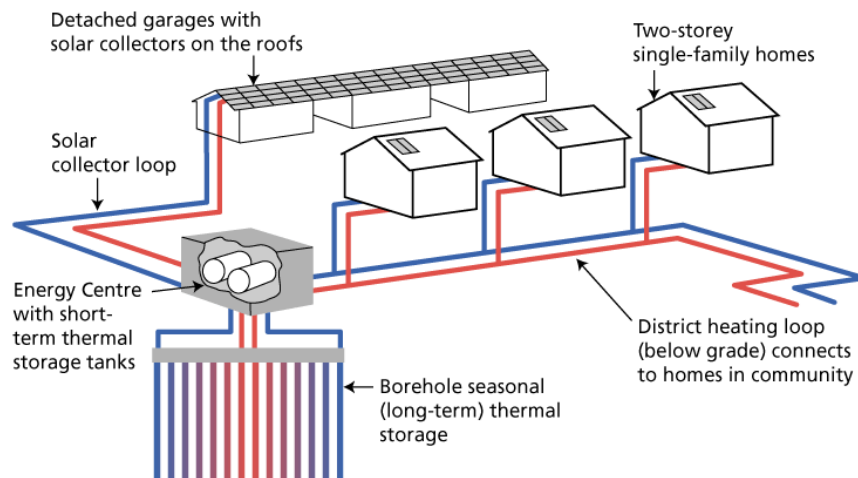
### **Kortrijk (Venning, België)**

Aan dit warmtenet zijn in totaal 82 woningen aangesloten die worden gevoed door een biomassa (houtsnipper) ketel van 1 MW. Deze ketel levert een aanvoertemperatuur van 50°C, waarbij de retourtemperatuur 25°C is. Daarnaast is er een warmtebuffer geplaatst om voor korte tijd warmte te bufferen.

### **Okotoks (Canada)**

Een buitenlands LT-net dat opvalt is het net in Okotoks (Canada). In Okotoks worden 52 vrijstaande woningen in hun warmtebehoefte voor ruimteverwarming voorzien door zo goed als alleen zonnewarmte. De aanwezige 2293 m<sup>2</sup> zonnecollectoren leveren warmte met een aanvoertemperatuur van 40°C, de retourtemperatuur is gemiddeld 32°C. Gezien het tegengestelde jaarpatroon van vraag en aanbod is de levering van zonnewarmte gedurende het gehele jaar mogelijk gemaakt door het gebruik van warmteopslag. In Okotoks wordt gebruik gemaakt van twee typen warmteopslag: dag/nacht opslag in watertanks en seizoensopslag in een ondergrondse aquifer (zie Figuur 2-2). Als backup zijn er gasgestookte boilers aanwezig (SP Technical Research Institute of Sweden, 2015).





**Figuur 2-2. Schematische weergave warmtenetwerk gevoed door zonnecollectoren in Okotoks (gekopieerd van Drake Landing Solar Community, 2016)**

Naast de buitenlandse perspectieven wordt er in Nederland ook het een en ander uitgevoerd op lage temperatuur. Het Smart Climate Grid in Roosendaal en Mijnwater in Heerlen zijn hier voorbeelden van.

### **Smart Climate Grid Roosendaal**

In Roosendaal ligt een warmtenet op 40°C uit warmte van een afvalverbrandingsinstallatie van SITA. Voor SITA zou het alternatief zijn om deze warmte te lozen in het nabijgelegen kanaal. De huidige situatie is dat er een ROC-gebouw op zit aangesloten die de 40°C in het gebouw zelf opwaardeert. De capaciteit van de uitkoppeling en de backbone biedt veel potentie om aanvullend grote aantallen woningen en utiliteit op het warmtenet aan te sluiten.

### **Mijnwater (Heerlen)**

Mijnwater is een netwerk voor de levering van warmte en koude aan gebouwen. Het werkt onder andere met decentraal opgestelde warmtepompen, waarbij de temperatuur die nodig is voor verwarmen, koelen en warm tapwater pas bij de eindgebruiker op niveau wordt gebracht, passend bij de vraag. Tevens wordt warmte en koude tussen de aangesloten gebouwen eerst (passief) uitgewisseld via clusternetwerken en tussen deze clusternetwerken onderling. Elke eindgebruiker is niet langer alleen een consument maar ook een producent van energie (prosumer). Overschotten en tekorten aan warmte en koude worden opgeslagen in, of geleverd door, het mijnwater reservoir; een ondergronds netwerk van met grondwater ondergelopen oude mijngangen. Ook kunnen additionele bronnen zoals zonthermisch en biomassa aan het systeem worden toegevoegd. In de definitie van deze verkenning wordt het Mijnwater systeem niet als LT-warmtenet beschouwd, maar als een bronnet. Het Mijnwater uitwisselingsprincipe is een voorbeeld van een duurzaam warmte/koude (uitwisselings-) netwerk. Additionele multifunctionele buffers in de clusters en gebouwen en een intelligent zelflerend en adaptief regelsysteem gaan er in de toekomst voor zorgen dat vraag door de verschillende lokale bronnen optimaal wordt ingevuld.

### **Nesselande**

Nesselande is een gebied in Rotterdam die door middel van cascadering (warmte afkoppeling vanaf de retourleiding) 70°C uitkoppelt van de retour uit het hoge temperatuur warmtenet. De retour van

dit warmtenet (50°C) wordt vervolgens weer afgekoppelt om het bedrijventerrein Nesselande te voorzien van LT-warmte. Er is hier een tweetraps afkoppeling vanaf het HT-warmtenet om een groot deel van Nesselande te voorzien van restwarmte.

### **Duindorp**

In de Scheveningse wijk Duindorp wordt warmte uit zeewater onttrokken en gebruikt in de warmtevoorziening. Door middel van warmtewisselaars wordt met het warme zeewater het water in het bronnet verwarmd tot zo'n 11°C. Er wordt gebruikt gemaakt van een grote centrale warmtepomp in het geval het zeewater kouder is dan 11°C. Deze warmtepomp brengt de temperatuur omhoog tot 11°C voordat het water in het bronnet gaat. Via het bronnet worden circa 750 woningen van warmte voorzien. Elke woning heeft afzonderlijk een warmtepomp die de temperatuur verder omhoog brengt tot 45°C voor vloerverwarming en 55°C tot 65°C voor warm tapwater. Het "Duindorp: warmte uit de zee"-project is daarmee een echt bronnet (Rijksoverheid, 2009).

## 3 Transitiepaden naar lage temperatuur

Er bestaat geen eenduidig transitiepad dat de overgang van een hoge naar lage temperatuur net beschrijft. Op basis van lokale details als de beschikbare warmteopwekkers, het ontwerp en de capaciteit van het distributienet en het type aangesloten woningen zijn verschillende transitiepaden te bewandelen. De belangrijkste overwegingen in het kiezen van een transitiepad bestaan uit het borgen van voldoende warmtecapaciteit en het minimaliseren van de kosten. Daar komt bij dat de transitie van een bestaand HT-warmtenet naar een LT-net weer heel anders is dan het ontwerp van een LT-net voor een nog te bouwen wijk of een bestaande wijk waar de gasaansluitingen worden vervangen voor warmte. In deze verkenning kijken wij met name naar de transitie van een bestaand HT-net naar een LT-net.

Voor warmtebronnen is het relatief eenvoudig om de temperatuur te verlagen. De grootste impact van de transitie ligt in het distributienet en bij de warmteafnemers. Om deze reden ligt de focus van de transitiepaden op het warmtenetwerk en de afnemers.

In het algemeen zijn er drie routes naar lage temperatuur gebruik:

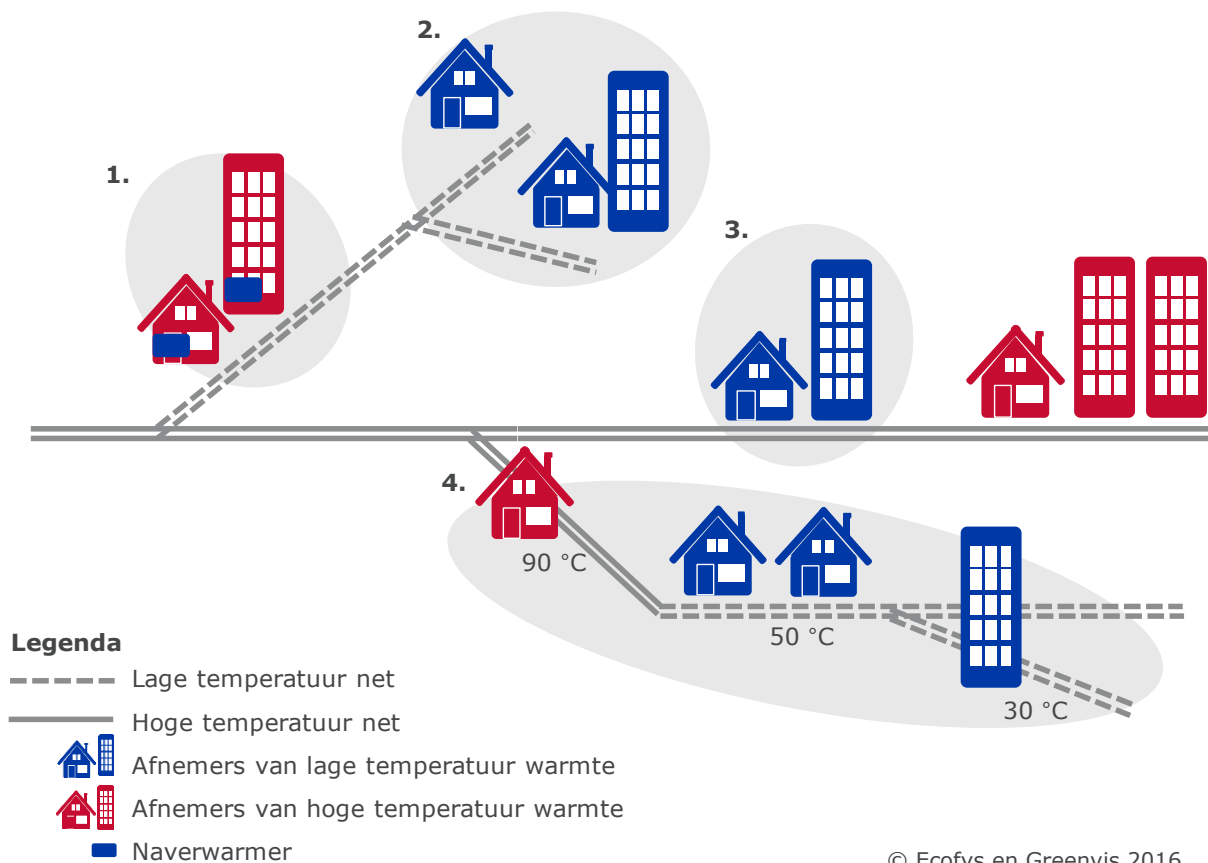
- De aanleg van nieuwe warmtenetten op lage temperatuur;
- De aanleg van lage temperatuur netten die worden gebruikt als warmtebron (bronnnetten);
- De transitie van bestaande hoge temperatuur warmtenetten naar lage temperatuur warmtenetten.

Deze routes gaan slechts gedeeltelijk samen met andere mogelijkheden voor het verduurzamen van de warmtevoorziening zonder gebruik te maken van een warmtenet. Voorbeelden hiervan zijn *all electric* concepten, waarin woningen in hun warmtevraag voorzien zijn via zeer goede isolatie en het gebruik van (zelf-opgewekte) elektriciteit, of het gebruik van synthetisch- of biogas.

Hoewel deze verkenning zich met name richt op de transitie van bestaande HT-netten naar LT-netten, zijn sommige lessen voor zowel bronnnetten als LT-netten relevant. Deze lessen worden toegepast in deze verkenning.

### 3.1 Transitiepaden HT warmtenet naar LT warmtenet

De overgang van een HT warmtenet naar een LT warmtenet hoeft niet in één keer. Dit hoofdstuk toont een aantal "transitiepaden" waarlangs die overgang stapsgewijs kan en welke randvoorwaarden, voor- en nadelen daarbij gelden. Alle transitiescenario's overbruggen een tussenfase waarin er zowel afnemers van hoge als lage temperatuur warmte op het net aangesloten zijn. Hoewel de transitie van bestaande HT-netten naar LT-netten afhangt van lokale afwegingen, zijn er vier vaak terugkerende elementen te onderscheiden. Deze elementen zijn geschetst in Figuur 3-1. Voor elk van deze elementen zijn randvoorwaarden, kansen, voordelen en nadelen te benoemen.



© Ecofys en Greenvis 2016

**Figuur 3-1. Mogelijkheden om de transitie van bestaande HT-netten naar LT-netten in te vullen (1. naverwarmer, 2. gescheiden temperatuur zones, 3. aansluiting op HT-retourleiding en 4. cascadering)**

### 3.1.1 LT-net in combinatie met naverwarming

De huidige regels en ambities die worden gesteld aan de woningvoorraad hebben tot gevolg dat nieuwe woningen een veel lagere warmtevraag hebben en de bestaande woningvoorraad langzaam volgt. Warmtenetten en ook warmte-afgiftesystemen zijn gedimensioneerd op de piekvraag naar warmte die slechts enkele uren per jaar optreedt. Dat betekent dat in veel gevallen de temperatuur van het warmtenet eenvoudig kan worden verlaagd gedurende het grootste deel van het jaar zonder dat er problemen ontstaan met het leveren van voldoende capaciteit.

Deze eigenschap wordt gebruikt in het eerste transitiepad. In dit transitiepad wordt de temperatuur van het net in de warmste periode van het jaar verlaagd om de efficiëntie van het net te verhogen. In deze maanden is er vooral warmtevraag voor warm tapwater en is de vraag naar warmte voor ruimteverwarming aanzienlijk minder. In koudere perioden van het jaar kan de temperatuur van het net weer worden verhoogd om de levering van voldoende warmte te kunnen garanderen.

Het variëren van de temperatuur van het warmtenet gedurende het jaar is al gebruikelijk bij warmtebedrijven in binnen- en buitenland. Randvoorwaarde voor het kunnen verlagen van de temperatuur is het hebben van voldoende capaciteit in het netwerk en de afgifteinstallaties in de woningen. De temperatuur kan worden verlaagd tot het punt waar de eerste gebruikers niet meer voldoende capaciteit hebben om in hun warmtevraag te voorzien. Bij verdere temperatuursverlaging kan voor deze gebruikers de temperatuur individueel worden verhoogd met bijvoorbeeld een naverwarmer zoals een warmtepomp of piek-ketel. Daarnaast kan er ook gebruik gemaakt worden van een aanvullende lokale warmtebron om de temperatuur in het net lokaal te verhogen. Deze lokale warmtebron wordt ingezet op momenten dat de warmtevraag bij enkele gebruikers te hoog is om met LT-verwarming te voldoen. Hiermee wordt een optimale mix van duurzame bronnen ontsloten die gedurende het hele jaar warmte leveren, met een piekvoorziening slechts op de locatie waar dat in de wintermaanden noodzakelijk is. De piekverwarming kan zowel worden ingezet voor individuele woningen of voor een cluster van woningen, eventueel voorzien van collectieve opslag. Voor de koude periodes in de winter kan het net weer tijdelijk op hogere temperatuur worden gebracht. De maximale warmtevraag, en daarmee capaciteit, wordt maar gedurende een paar uur per jaar gevraagd.

Een andere limiet wordt opgeworpen door wetgeving die het risico op legionellabesmetting beperkt. Bij (tijdelijke) verlaging van de nettemperatuur onder de 60°C moet naverwarming plaatsvinden voor warm tapwater. De legionella wetgeving beperkt hiermee de mogelijkheden van temperatuursverlaging tot 60°C. Voor verdere verlaging van de nettemperatuur zijn maatregelen bij de afnemers noodzakelijk om warm tapwater van voldoende temperatuur te maken.

Voordeel van dit transitiepad is dat de seizoensverlaging van de warmte temperatuur in bestaande warmtenetten eenvoudig is toe te passen en direct al reductie van warmteverliezen geeft. Door capaciteitsproblemen op te sporen en lokaal te verhelpen, kan de transitie geleidelijk worden uitgevoerd.

Een lage temperatuur warmtenet in combinatie met naverwarmers wordt in de praktijk toegepast in Albertslund, Denemarken. In Albertslund zijn zo'n 2200 woningen gerenoveerd en aangesloten op een lage temperatuur warmtenet. De aanvoertemperatuur ligt rond de 35 à 40 graden, de retourtemperatuur rond de 10 à 15 graden. Elk huis wordt verwarmd door middel van vloerverwarming dat direct gebruikt maakt van de aanvoertemperatuur van 35 à 40 graden. Verder is elk huis voorzien van een warmwater tank die gevuld wordt met water dat is opgewaardeerd door een warmtepomp tot 55 à 60 graden (SP Technical Research Institute of Sweden, 2015).

### **3.1.2 LT-warmte in een gescheiden deel van het HT warmtenet**

Wanneer de afnemers in een deel van het HT-warmtenet geschikt zijn voor de levering van LT-warmte, kan er voor gekozen worden om dit cluster als geheel te voeden op lagere temperatuur. Op deze manier ontstaat een LT-eiland/subnet in een HT-net (Figuur 3-1, situatie 2). Een belangrijke voorwaarde is dat de aanwezige bebouwing aangesloten op de vertakking in één keer omgezet kan worden naar LT-warmtelevering. Dit betekent dat alle aangesloten afnemers hiervoor geschikt moeten zijn of moeten worden gemaakt voordat de transitie in één keer plaatsvindt.

Voor bestaande bouw met slechte isolatie is dit transitiepad minder geschikt omdat er eerst grondige aanpassingen gedaan moeten worden aan isolatiegraad en de afgiftesystemen in de woningen. Het transitiepad is daarom met name interessant bij grootschalige gebiedsrenovatie en voor het ontsluiten van nieuwbouwwijken en bedrijventerreinen met relatief lage warmtevraag. Hiermee sluit het transitiepad aan bij een planmatige aanpak voor verlaging van de warmtevraag waarin gebieden gefaseerd worden aangepakt en aangesloten.

Een praktijkvoorbeeld waar een aftakking van een HT-net is omgezet naar lagere temperatuur is te vinden in Aarhus, Denemarken. In Tilst, een buitenwijk van Aarhus, is een straat met acht huizen gerenoveerd en vervolgens omgezet van een aanvoertemperatuur van 80°C naar 60°C. Om deze temperatuurverlaging te realiseren zijn de bestaande warmteleidingen vervangen door nieuwe dubbelleidingen waarbij de aanvoer- en retour pijpleiding in één isolerend omhulsel zitten. Daarnaast zijn er aanpassingen gedaan aan de afleveringskant zoals het doorvoeren van energie-efficiënte maatregelen en de vervanging van de bestaande radiatoren om voldoende warmte-afgiftecapaciteit te garanderen (SP Technical Research Institute of Sweden, 2015).

### **3.1.3 Woningen op de retourleiding**

De derde mogelijke transitiepad is de aansluiting van woningen die geschikt zijn voor lage temperatuur verwarming op de retourleiding van het bestaande HT-warmtenet. Het idee is dat in sommige gevallen de retourleiding voldoende warmte levert om in de behoefte van sterk geïsoleerde woningen te voorzien. Belangrijke randvoorwaarde is het hebben van voldoende transportcapaciteit in de retourleiding. Om de warmtelevering te garanderen worden bij een LT-afnemer zowel de HT- als de LT-retourleiding aangesloten. Regeltechniek zorgt voor de juiste temperatuurmix en borgt leveringszekerheid.

In tegenstelling tot het vorige transitiepad gaat het hier niet om grootschalige gebiedsrenovatie, maar eerder om individuele gebruikers die aan kunnen worden gesloten op lagere temperatuur, terwijl de omliggende afnemers op hoge warmte afnemen. Dit transitie pad faciliteert een geleidelijke overgang naar lage temperatuur warmte waarbij individuele woningen een voor een aangesloten kunnen worden. Een praktijkvoorbeeld van dit transitiepad kan gevonden worden in Ludwigsburg, Duitsland. In Ludwigsburg wordt de retourleiding van het huidige aanwezige warmtenetwerk gebruikt om in de warmtevoorzieningsbehoefte te voorzien van een gebied met "low-energy" huizen. De warmte wordt hier geleverd met een temperatuur van 40°C en afgevoerd met een temperatuur van 20°C (SP Technical Research Institute of Sweden, 2015).

### **3.1.4 Cascadering (multi-line networks)**

Het vierde transitie pad bouwt voort op bovengenoemd transitiepad waarin afnemers worden aangesloten op zowel de aanvoer als de retourleiding. Bij cascadering wordt gebruik gemaakt van verschillende bronnen met verschillende temperatuurniveaus om te komen tot een optimale match van temperatuurvraag en -aanbod.

Dit zorgt voor een efficiënte wijze van warmtelevering en goede integratie van warmte uit duurzame bronnen, zoals zonnethermie, geothermie, restwarmte uit de gebouwde omgeving, etc. Deze vorm van warmtelevering is met name interessant wanneer er veel diversiteit is in aantal bronnen en type afnemers. Met de verschillende temperatuurniveaus zijn maatwerk verbindingen te maken tussen bronnen en afnemers. Nadeel van dit transitiepad is dat de kosten van het aanleggen van meerdere parallelle warmtenetten kostbaar is en niet altijd flexibel naar de toekomst. In het ontwerp en de planning moet hier rekening mee worden gehouden. Vanwege de inflexibiliteit is dit transitiepad minder geschikt om geleidelijk naar een LT-warmtenet te gaan en is het meer geschikt om binnen een bestaand HT-net ook LT-opwekkers en afnemers te integreren. Een voorbeeld hiervan is een LT-restwarmtebron die direct warmte levert aan een LT afnemer. Een verbinding met het centrale HT-warmtenet zorgt voor back-up of extra capaciteit bij piekvraag.

Deze vorm van *multi-line networks*, wordt onder andere onderzocht in Duitsland door het Herrmann Rietschel Instituut. Net zoals in Nederland staat warmte en specifiek LT-warmte in Duitsland zeer in de belangstelling als een belangrijk onderdeel van de EnergieWende.



## 4 Voorkeursroutes voor woningaanpassing

Lage temperatuur warmte biedt mogelijkheden voor het verder verduurzamen van warmtenetten. De transitie van HT- naar LT-netten vraagt echter aanpassingsmaatregelen aan de opwek-, de distributie- en de afleverzijde. Aan de afleverzijde is een combinatie van maatregelen, op het gebied van afgifte, isolatie en warm tapwaterbereiding, nodig om lage temperatuur warmteafname mogelijk te maken.

Dit hoofdstuk maakt concreet welke combinaties van maatregelen economisch het meest interessant zijn. De voorkeursroute van de transitie naar LT-warmteafname wordt geschetst voor verschillende woningtypes. Een beschrijving van de maatregelen specifiek voor de warm tapwatervoorziening, staat in Bijlage C.

### 4.1 Optimale combinaties van maatregelen in woningen in transitie van HT naar LT

Aanpassingen aan het afgiftesysteem en isolatieniveau hebben een onderlinge afhankelijkheid, terwijl de keuze van de warm tapwaterbereiding relatief weinig afhangt van de overige keuzes op het gebied van aflevering. De economisch meest voordelige maatregelen zijn bepaald met behulp van referentiewoningen.

Tabel 4-1 laat zien dat tussenwoningen en appartementen de meest voorkomende woningtypes zijn. Om deze reden worden deze woontypes in deze verkenning gebruikt. Uit simulaties door Greenvis blijkt dat hoekwoningen met dezelfde maatregelen uitgerust kunnen worden als tussenwoningen. De kosten voor het toepassen van isolatie en vergroting van de warmte-afgifte zijn wel hoger, doordat het woonoppervlak anders is ingericht (groter geveloppervlak voor isolatie en meer verwarmend oppervlak voor het warmte-afgiftesysteem).

**Tabel 4-1. Woningvoorraad bestaande bouw in 2015 (ECN analyse op basis van ABF en WoOn2012)**

	Woningtypen	Aantal woningen (x1000)
<b>Bestaande woningen</b>	Tussenwoning	2.288
	Hoekwoning	901
	Appartement	2.176
	Twee-onder-een-kapwoning	901
	Vrijstaande woning	1.112
	<b>Subtotaal bestaande woning</b>	<b>7.388</b>

Voor de referentiewoningen is een passende combinatie van maatregelen qua isolatie en afgiftesystemen vastgesteld. De berekende referentiewoningen onderscheiden zich op drie variabelen:

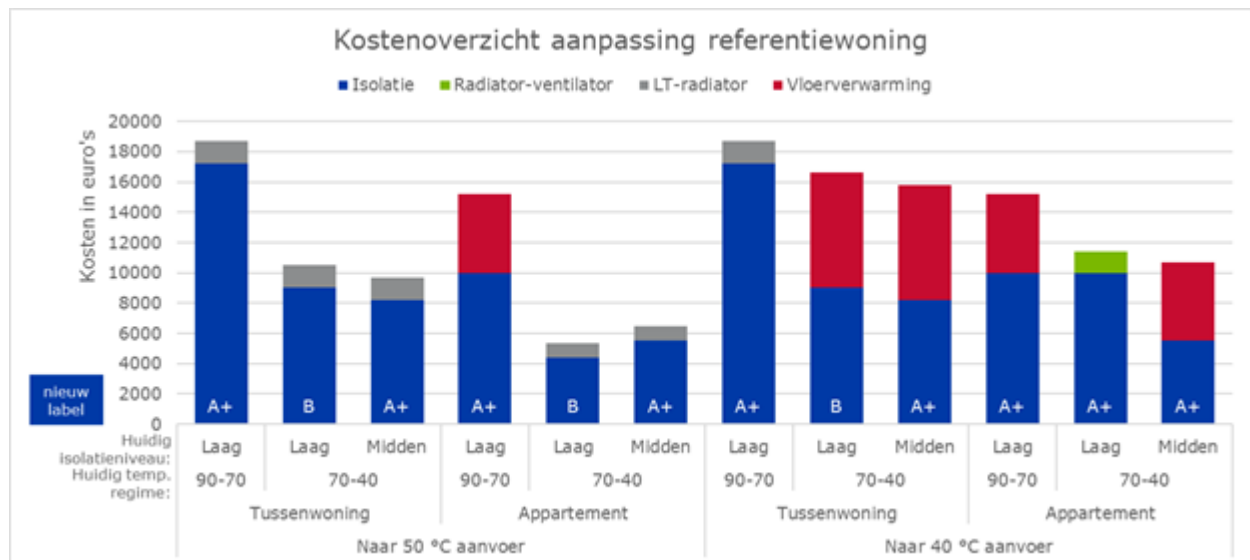
- Type woning (tussenwoning/hoekwoning of appartement);
- Huidig isolatieniveau (laag of midden);

- Huidig temperatuurregime van het afgiftesysteem (90°C – 70°C of 70°C – 40°C).

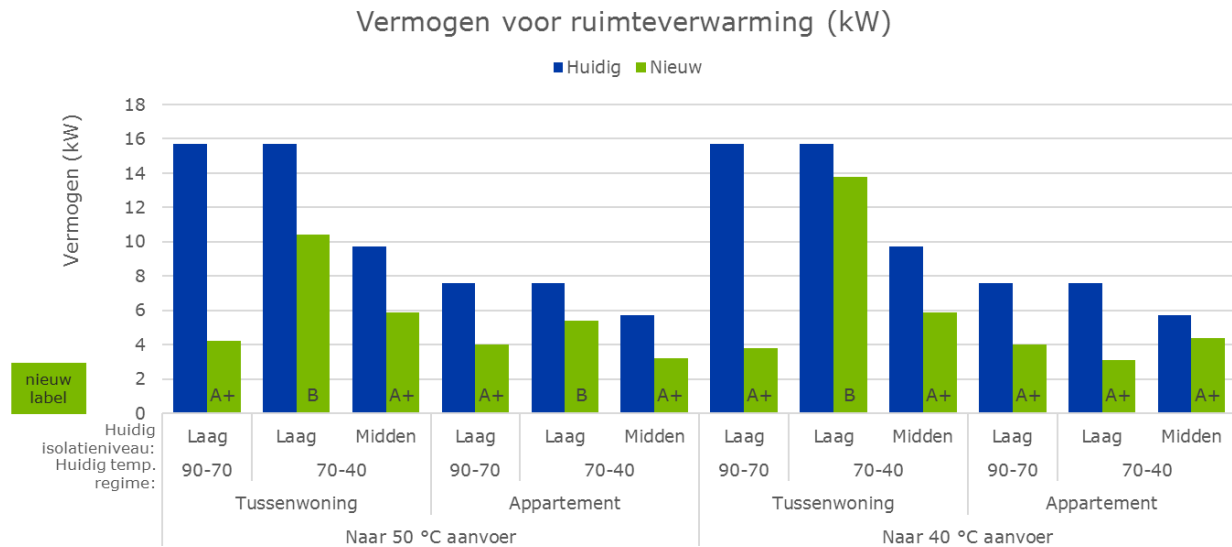
Door deze variabelen te combineren ontstaan acht verschillende types referentiewoning. Hiervan komen er in praktijk zes voor: de combinatie van midden isolatie met een temperatuurregime van 90°C – 70°C (bij zowel tussenwoningen als appartementen) is niet veelvoorkomend en dus geen onderdeel van het overzicht. Voor deze zes types referentiewoning wordt aansluiting op een LT-net met een aanvoertemperatuur van 50°C en 40°C overwogen.

Als eerste is vastgesteld of een combinatie van aanpassingen voldoende is om de woning bij een piekvraag warm te krijgen. Vervolgens zijn voor de benodigde combinatie maatregelen de kosten bepaald.

Figuur 4-1 geeft een kostenoverzicht van de verschillende resulterende combinaties van aanpassingen aan isolatie en afgiftesysteem. Figuur 4-2 laat de verandering in warmtevraag voor en na de maatregelen zien. De achterliggende onderbouwing is gegeven in bijlage C.



**Figuur 4-1. Kostenoverzicht aanpassing referentiewoning (bron: MAIS-model; Vesta 2.0 – uitbreidingen en dataverificaties (2013) & RVO voorbeeldwoningen (2011))**



**Figuur 4-2. Verandering in warmtevraag na aanpassing referentiewoning (bron: MAIS-model; Vesta 2.0 – uitbreidingen en dataverificaties (2013) & RVO voorbeeldwoningen (2011))**

De weergegeven combinaties van maatregelen zijn bepaald op basis van de laagste kosten waarbij met LT-warmte in de pieksituatie nog in de warmtevraag kan worden voorzien. De piekwarmtevraag is vastgesteld op basis van een simulatie voor het referentiejaar bij de gekozen isolatiegraad en het type afgiftesysteem. Hierbij is een bovengrens aan de opwarmtijd gesteld van één uur. Dit betekent dat met de aangenomen isolatiegraad en type afgiftesysteem de woning zonder problemen elk moment van het jaar binnen een tijdsbestek van één uur de gewenste ruimte temperatuur moet kunnen bereiken. Alleen voor vloerverwarming is er een opwarmtijd van vier uur gehanteerd, omdat de vermogens anders niet vergelijkbaar zijn met de andere afgiftesystemen.

De kosten zijn gebaseerd op uit het document *Vesta 2.0 – Uitbreidingen en dataverificaties (2013)*, waar per type woning en type afgiftesysteem de kosten inzichtelijk zijn gemaakt. Deze kosten zijn gebaseerd op een projectmatige ingreep tijdens een natuurlijk (vervangings- of renovatie-) moment.

In enkele situaties zijn er meerdere combinaties van aanpassingen mogelijk om een woning op een LT-net aan te sluiten. In dat geval is de optie met de laagste kosten weergegeven. Er kunnen echter ook overwegingen zijn om voor een alternatieve optie te kiezen bijvoorbeeld omdat daar het resterend jaarverbruik lager wordt of omdat de specifieke situatie daartoe aanleiding geeft.

Ter illustratie is in onderstaande tekstbox uitgewerkt hoe tot een tweetal combinaties van maatregelen is gekomen voor een referentie tussenwoning met lage isolatie. Voor de overige referentiewoningen zijn deze uitwerkingen toegevoegd in bijlage C.

**Voorbeeld aanpassingen voor implementatie LT-warmteafgifte in een tussenwoning (1965-1974) | laag isolatie | 70°C - 40°C T<sub>regime</sub> | naar 50°C aanvoer**

Voor deze referentiewoning zijn er twee opties mogelijk om de transitie te maken naar verwarming via LT-warmte. In de huidige situatie wordt de woning verwarmd met traditionele radiatoren en heeft de woning een laag isolatieniveau. De totale warmtevraag voor deze woning is relatief hoog, waardoor de capaciteit van LT-verwarming niet voldoende is. In de nieuwe situatie kan LT-warmte worden ingepast door middel isolatie in combinatie met LT-radiatoren, of met een hoge mate van isolatie, waarbij de bestaande radiatoren voldoende capaciteit hebben en niet hoeven te worden vervangen. Van beide zijn de kosten berekend om zo de economisch meest interessante optie te bepalen (zie tabel 4-2).

**Tabel 4-2. Tussenwoning | lage isolatie | 70°C - 40°C → 50°C - 30°C**

Optie 1	Huidig	Nieuw (optie 1)	Nieuw (optie 2)
Kosten isolatie [€]	-	9.000	17.200
Kosten afgiftesysteem [€]	Traditionele radiatoren	LT-radiatoren 1.500	-
Totale kosten [€]	-	<b>10.500</b>	<b>17.200</b>
Warmtevraag [kW]	15,7	10,4	4,3

De kosten van optie 1 liggen 6.700 euro lager dan die van optie 2. Dit komt omdat de kosten voor het extra isoleren naar hoge isolatiegraad hoger zijn dan de investering in het afgiftesysteem. Optie 2 is echter interessant wanneer er vanuit het perspectief van de afnemer wordt gekeken. De totale warmtevraag voor ruimteverwarming ligt namelijk een factor 2,5 lager en de extra isolatie voegt comfort toe aan de woning. Per situatie kan worden beoordeeld of dit opweegt tegen de extra investering voor isolatie.

## 4.2 Algemene conclusies

Uit het overzicht in Figuur 4-1 zijn enkele algemene strategieën te destilleren. Voor warmteafgifte op 50 graden is een LT-radiator vrijwel altijd de goedkoopste optie. Voor afgifte op 40 graden is verregaand isoleren in de meeste situaties onderdeel van de meest voordelige optie. De resultaten laten ook zien het voor de gekozen referentiewoningen niet mogelijk is om de huidige isolatiegraad te behouden wanneer en warmtenet van HT naar LT overgaat. Dit komt door het beperkte maximale vermogen van het LT-afgiftesysteem (waarbij is aangenomen dat het radiatorlocaties, -hoogtes en -breedtes gelijk blijven) en de mate van warmteverlies van de woning (primair afhankelijk van isolatie). Daarmee is een voldoende hoge isolatiegraad een randvoorwaarde voor de transitie van HT-naar LT-netten.

Radiatorventilatoren op de bestaande radiatoren is slechts in één situatie passend. Met de ventilatoren kan tussen de 0,2 en 1,0 kW extra warmte-afgiftevermogen worden geleverd met het afgiftesysteem.

Enkele referentiewoningen hebben verschillende opties om de transitie te maken. In deze situaties kan er gekozen worden voor de optie met de laagste investeringskosten of de optie waarin de warmtevraag structureel lager komt te liggen. Deze afweging tussen beide opties wordt anders

beoordeeld door afnemer en leverancier en zal in gesprekken tussen warmteleveranciers en (vertegenwoordigers van) de afnemers gemaakt moeten worden. Deze keuze wordt gemaakt op basis van de verwachting van de verlaging van de warmtevraag en kosten voor het verlagen van deze vraag in deze specifieke situatie.

Voor hoekwoningen vallen de investeringskosten hoger uit. Dit komt met name door de extra kosten voor isolatie van de extra zijgevel, ongeveer 1200 euro per hoekwoning. Ook zijn er extra kosten voor het vergroten van de capaciteit van het warmte-afgiftesysteem vanwege de hogere warmtevraag.

## 5 Randvoorwaarden en barrières

De transitie van een HT-net naar een LT-net wordt primair gedreven door ontwikkelingen aan de vraagkant, strengere duurzaamheidseisen, betere woningisolatie, de aanbodkant en duurzame bronnen. Deze transitie gaat verder dan slechts het verlagen van de temperatuur in het net. De overgang vraagt een andere organisatiebenadering, afstemming tussen warmtevraag en –aanbod en soms ook de wijze van netontwerp om te borgen dat voldoende warmte getransporteerd kan worden.

Om de transitie naar lage temperatuur goed te laten verlopen is het van belang om te leren van bestaande lage temperatuur warmteprojecten. In een serie interviews met experts, beleidsmakers en projectontwikkelaars zijn de belangrijke randvoorwaarden geïnventariseerd en besproken. Deze randvoorwaarden zijn essentieel voor een succesvolle implementatie van lage temperatuur warmte op een maatschappelijke geaccepteerde en goed financierbare wijze.

Naast de randvoorwaarden zijn de vaak voorkomende barrières geïdentificeerd voor het doorvoeren van veranderingen in bestaande warmtenetten.

### 5.1 Randvoorwaarden

#### *Betrouwbaarheid en beschikbaarheid*

De meest essentiële randvoorwaarde voor warmtelevering is betrouwbaarheid en beschikbaarheid. Dit geldt niet alleen voor de afnemer van warmte, maar ook voor de leverancier. Afnemers van warmte hebben behoefte aan voldoende afgifte capaciteit in de woning, zodat zij het hele jaar in de warmtevraag zijn voorzien. Voor de leverancier is de beschikbaarheid van individuele warmtebronnen een belangrijke randvoorwaarde. Het sluiten van een grote producent van restwarmte, zoals een kolencentrale of een STEG heeft grote impact op de warmtevoorziening en haar beschikbaarheid. Het gebruik van verschillende kleinere bronnen kan zorgen voor extra redundantie en daarmee leveringszekerheid.

#### *Hoog isolatieniveau van woningen*

LT-warmtenetten vereisen een voldoende hoog isolatieniveau in de gebouwde omgeving. Omdat het warmteafgiftevermogen afneemt bij het verlagen van de aanvoertemperatuur, moet de piek in de warmtevraag ook laag zijn. Goed geïsoleerde woningen houden de warmte langer vast en hebben daardoor een lagere warmtevraag. Bijkomend voordeel is dat woningen warmte kunnen bufferen. Dit kan ervoor zorgen dat de collectieve piekvraag naar warmte afneemt, waardoor bronnen effectiever zijn in te zetten. Mits de woningen warmte-afgiftesystemen hebben die niet trager zijn in opwarmtijd. Wanneer dit wel het geval is, zal het aansluitvermogen wel lager worden maar wordt ook het gelijktijdigheidsvoordeel kleiner.

### *Aandacht bij ontwerp*

In het ontwerp van warmtenetten is het van belang stil te staan bij de huidige warmtevraag en de verwachtingen voor de toekomstige vraag. Overdimensionering van leidingen leidt tot extra leidingverliezen, terwijl met onderdimensionering onvoldoende capaciteit kan worden geleverd. Het vervangen van leidingen is kostbaar en vaak complex in de stedelijke omgeving. In traditionele warmtenetten met een centrale warmtebron stroomt de warmte altijd in dezelfde richting. In netten waarbij meerdere bronnen zijn aangesloten moet voldoende rekening worden gehouden met een meer grillige warmtestroom afhankelijk van welke bronnen op welk moment leveren. Vanwege de lagere warmtedichtheid is bij lage temperaturen minder marge om afwijkingen van de verwachte warmtevraag op te vangen dan bij hogere temperaturen.

### *Organisatie*

Met grotere aantallen warmtebronnen en minder marge in de warmtecapaciteit om grote of fluctuerende warmtevraag op te vangen, ontstaat toenemende afhankelijkheid in de gehele warmteketen. Daarnaast is het mogelijk dat een gebruiker van warmte tegelijkertijd ook een leverancier van warmte wordt, zoals in kassencomplexen. Deze toenemende afhankelijkheid en interactie in het warmtenet vraagt om een wijze van organiseren die deze afhankelijkheden adresseert.

### *Integrale aanpak*

Naast een verandering in de organisatiestructuur, vraagt een succesvolle transitie naar LT-warmtenetten ook om een meer integrale aanpak. Aanpassingen aan alle componenten in het warmtesysteem (aflevering, opwek en distributie) zijn nodig voor een succesvolle ontwikkeling. Dit betekent dat ook de energievoorziening en het isolatieniveau van woningen moet worden meegenomen. Ten tweede moeten vraag en aanbod worden afgestemd tussen vaak meerdere bronnen en mogelijk meerdere exploitanten. Ten slotte moet de afhankelijkheid met andere sectoren, zoals de industrie en de elektriciteitsmarkt, worden betrokken in de integrale aanpak. Dit is bijvoorbeeld relevant bij gebruik van industriële restwarmte en de inzet van warmte uit duurzame elektriciteit. Hetzelfde geldt voor het gebruik van warmte uit biomassa, waar de logistiek van brandstof in de gebouwde omgeving moet worden meegenomen.

## 5.2 Barrières

Op basis van ervaringen uit praktijk cases zijn de drie belangrijkste barrières voor de transitie naar LT-warmtenetten geïdentificeerd: kosten, sociale weerstand en legionellanormering. Afhankelijk van de lokale situatie, kunnen andere of additionele factoren een belemmering zijn, zoals het bestaande marktmodel en technische, juridische of economische mogelijkheden. Veel van deze barrières zijn niet specifiek voor LT-netten. Voor deze netten zijn ze echter wel nadrukkelijker aanwezig vanwege de randvoorwaarde van integrale aanpak en hogere organisatie complexiteit.



### *Kosten*

Lage temperatuur warmte is een recente ontwikkeling. Als nieuwkomer wordt lage temperatuur warmte constant vergeleken met de belangrijkste warmtedrager op dit moment: aardgas. Aangezien aardgas relatief goedkoop is in Nederland en doordat er een zeer uitgebreide gasinfrastructuur ligt waarvan de kosten worden gesocialiseerd, is de aanleg van lage temperatuur warmtenetten vaak in eerste instantie duurder. In andere landen, zoals in Scandinavië, ligt dit anders aangezien er in veel gevallen niet een bestaande gas infrastructuur aanwezig is. De wijziging van een bestaand warmtenetwerk naar lage temperatuur vraagt aanpassingen aan verschillende netwerkcomponenten: opwek, distributie en aflevering. De kosten en de baten van de transitie naar een lage temperatuur warmtesysteem zijn ongelijk verdeeld over de partijen in de warmteketen. Deze split-incentives zijn een barrière om de overgang te maken. Mogelijke oplossingen om deze investering barrière te verlagen zijn stimuleringsmaatregelen en subsidies voor betrokken commerciële partijen of financiering door middel van een publieke nutsfunctie. Daarnaast speelt de onbekendheid van lage temperatuur warmte een grote rol in de financieringsvorm. Investeerders zijn wegens de onbekendheid terughoudend waardoor lage temperatuur warmte mogelijk moeilijk van de grond komt.

### *Sociale weerstand*

Een andere barrière, die met name in Nederland speelt, is sociale weerstand tegen de monopolie positie van de warmteleveranciers. Warmteleveranciers zouden het te veel voor het zeggen hebben en de afnemers van warmte zouden niet meer kunnen kiezen voor alternatieve verwarmingsopties zoals met gas. Daarbij vereist de ombouw van woningen om deze bruikbaar te maken voor lage temperatuur verwarming een hoge investering die niet altijd door de eigenaar wordt terugverdiend. Verder zorgt de ombouw voor een grote impact op de afnemers door bijvoorbeeld een ingrijpende woningrenovatie. Hier staat tegenover dat er op dit moment verschillende lokale energiecorporaties actief zijn op het gebied van warmtenetten, waarin burgers en gemeenten vaak een belangrijke voortstuwende rol vervullen. Voorbeelden hiervan zijn Texel Energie, Thermobello (Culemborg) en Hoonhorst (Overijssel). Kortom, hoewel de weerstand richting het huidige marktmodel en de monopolie positie van leveranciers serieus moet worden genomen, is er een trend zichtbaar dat een kleine groep burgers in de huidige markt zich bewust is van de kansen die er liggen voor collectieve warmte. Deze groep kan een voorttrekkersrol spelen in aanpassingen van het marktmodel, sociale acceptatie van warmtenetten en de implementatie van lage temperatuur systemen.

### *Legionella*

Legionella is een bacterie die een acute infectie aan de luchtwegen kan veroorzaken. Celdeling van de bacterie vindt plaats in water met een temperatuur tussen de 20°C en 46°C. Om het besmettingsrisico te minimaliseren is in Nederland voor warm tapwater een minimum temperatuur van 55°C of 60°C<sup>2</sup> vastgesteld in wet- en regelgeving<sup>3</sup>.

---

<sup>2</sup> Op het tappunt, afhankelijk van wel of geen circulatie.

<sup>3</sup> Drinkwaterwet en drinkwaterbesluit 23 mei 2011

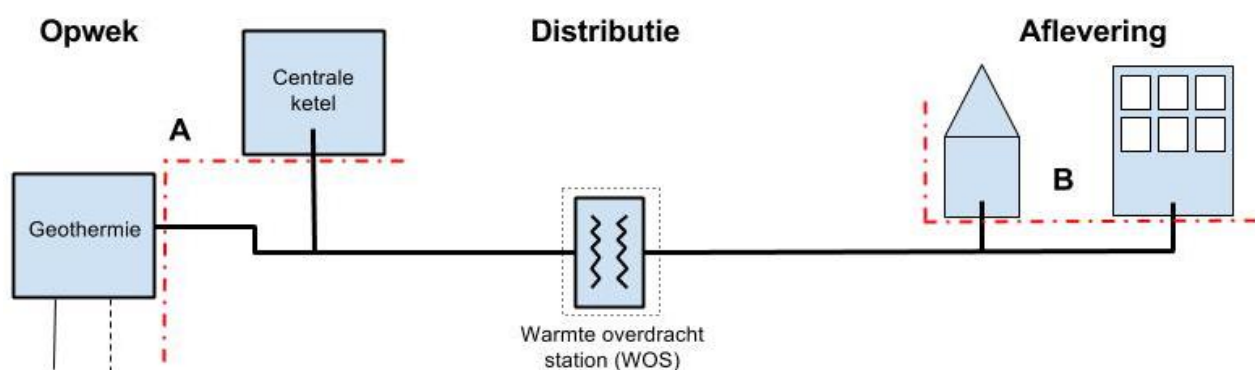
In het buitenland gelden soms andere, soepeler eisen, zoals bijvoorbeeld in Duitsland en Denemarken. De Nederlandse legionella eis van 55/60°C wordt als barrière gezien in de adoptie van lage temperatuur systemen. Om warm tapwater met een minimumtemperatuur van 60°C te leveren in huis is een temperatuur van minimaal 65°C nodig in het warmtenet. Dit is niet te realiseren met een LT-net zonder het gebruik van een lokale naverwarmer. In principe kunnen, in plaats van naverwarmen, ook andere maatregelen worden genomen om legionella te voorkomen bij tapwater onder de 55°C. Voorbeelden zijn het gebruik van desinfectie methoden en leidingen met antibacteriële eigenschappen waardoor de legionella zich niet kan vormen. UV-straling en membraanfiltratie zijn hier voorbeelden van, deze technologieën kunnen ervoor zorgen dat warmtenetten met een aanvoertemperatuur van  $\geq 50^{\circ}\text{C}$  geen warm tapwaterinstallaties nodig hebben. Een andere oplossing zit in het gebruik van kleine watervolumes waardoor legionella niet de kans krijgt zich te ontwikkelen (SP Technical Research Institute of Sweden, 2015). Deze oplossingen leiden in Nederland nog niet tot ontheffing van de verplichtingen uit de Drinkwaterwet rondom Legionella.

Naast deze drie vaak terugkerende barrières worden ook andere barrières genoemd:

- Complexe en langdurige besluitvorming: meerdere stakeholders zijn betrokken bij besluitvorming, zeker in geval van bestaande bebouwing en/of bestaande warmtenetten. Hierdoor is besluitvorming een ingewikkeld en tijdrovend proces.
- Onbekendheid met lage temperatuur warmte: energieaanbieders zien LT-warmtenetten nog niet als een standaard vorm van collectieve warmtelevering. Daarbij zijn ook nog maar weinig projectontwikkelaars of aannemers bekend met lage temperatuur warmte.

## 6 Bepalende factoren lage temperatuur warmte

De transitie van HT- naar LT-warmtenetten vraagt om maatregelen in het warmtenet op het gebied van aflevering, opwek en distributie. Voorbeelden van deze maatregelen zijn de installatie van vloerverwarming, de aansluiting van restwarmtebronnen en de aanleg van extra leidingen. (zie Figuur 6-1). De rode lijnen geven de demarcatie weer tussen opwek en distributie en tussen distributie en aflevering. Beide demarcaties (punten A en B in Figuur 6-1 **Error! Reference source not found.**) worden nader toegelicht in Bijlage A.



**Figuur 6-1. Schematische weergave warmtesysteem**

In deze transitie spelen meerdere factoren een bepalende rol, zoals kosten, impact op de omgeving, risico's, enzovoort. Dit hoofdstuk laat per onderdeel van het warmtesysteem de maatregelen en de bepalende factoren zien. Om inzicht te geven in de meest optimale set van maatregelen en de uiteindelijk voorkeursroutes in de transitie (hoofdstuk Transitiepaden naar lage temperatuur) te bepalen, zijn de maatregelen voorzien van een score per bepalende factor.

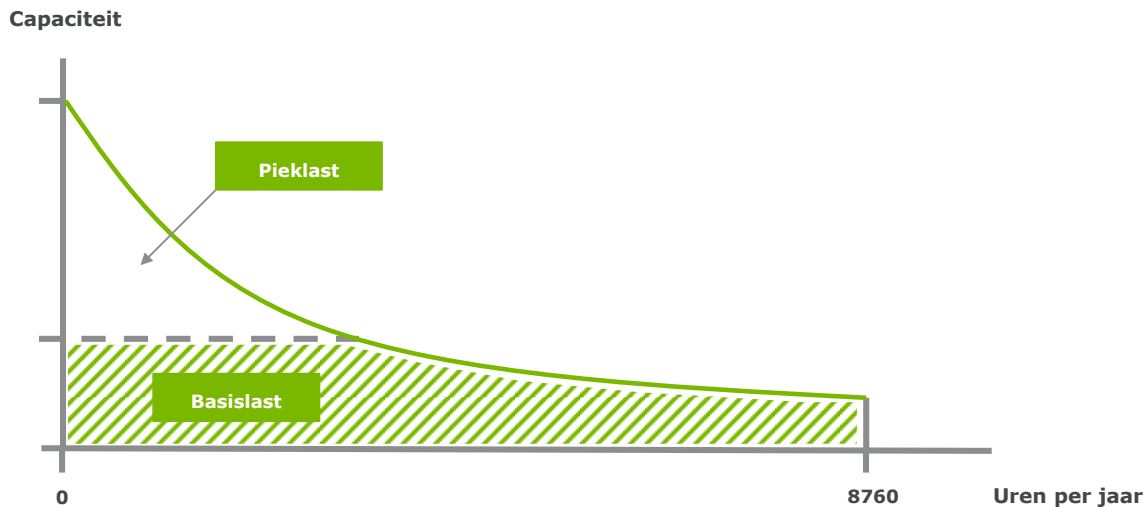
### 6.1 Leeswijzer: bepalende factoren bij de overgang van HT naar LT

Een beschrijving van de bepalende factoren en inschaling is hieronder te vinden:

- Aanvoertemperatuur: Kunnen de opwekkers de juiste aanvoertemperatuur (lager dan 55°C) leveren? Daarbij toont de mogelijke aanvoertemperatuur of de opwekker ingezet kan worden voor pieklevering (*Opwek*).
- Potentieel (grootte): Wat is het toekomstperspectief en dus de grootte van het potentieel die de opwekker heeft of kan krijgen in de toekomst? Het type ondergrond, beschikbare ruimte en de beschikbaarheid van brandstof zijn voorbeelden die hieronder vallen. De argumentatie voor het potentieel, en indirect het onderscheid in +, +/- en - is in Bijlage B Tabellen bepalende factoren te vinden (*Opwek*).
- Kosten (CAPEX & OPEX): Hoe hoog is de kostprijs van de maatregel? Hierbij speelt de kale kostprijs een grote rol; eventuele subsidies zijn hier niet in meegenomen. De investerings- en operationele kosten (naast de opbrengsten) bepalen of een investering rendabel is. In de

scoretabellen is voor elk onderwerp een kostprijs (in €/kW, €/m<sup>2</sup>) voor de investering gegeven en voor de OPEX (alleen gebruikt bij opwek en aflevering) zijn de eventuele onderhouds- en beheerskosten en brandstof/pompenergie gegeven. De verhouding tussen CAPEX en OPEX bepaalt of een opwekker interessant is om in te zetten als back-up of piekvoorziening of juist in de basislast. De CAPEX bevat verschillende investeringskosten. Bij opwek gaat het vooral om de kosten bij een bepaald geïnstalleerd vermogen (€/kW). De kosten voor distributie zijn maatregelafhankelijk maar zullen uiteindelijk neerkomen op een totaalbedrag (om met elkaar te kunnen vergelijken). Tot slot de aflevering, dit geeft een beeld van de kosten per woning. De OPEX gaat over de jaarlijkse energiekosten die een opwekker of installatie vraagt. Het onderlinge verschil bepaalt de inschaling van +, +/- en - . Een + betekent gunstige CAPEX, dus lage investering. (*Opwek, Distributie, Aflevering*).

- **Risico's:** Hoe hoog zijn risico's bij het realiseren van een maatregel? De risico's zijn onderling tegen elkaar afgewogen. De achterliggende redenatie staat beschreven in Bijlage B Tabellen bepalende factoren (*Opwek, Distributie*).
- **CO<sub>2</sub>-uitstoot:** Wat is de CO<sub>2</sub>-uitstoot van bronnen? Deze emissie geeft inzicht in hoeverre de bron duurzaam kan worden ingezet. Voor opwek ligt de scorereage als volgt: de CO<sub>2</sub>-uitstoot bij een + ligt tussen de 0 en 20 kg/GJ<sub>th</sub>, +/- tussen 21 en 100 kg/GJ<sub>th</sub> en een - bij >100 kg/GJ<sub>th</sub>. Voor aflevering ligt deze grens net wat anders. Een + ligt tussen de 0 en 40 kg/GJ<sub>th</sub>, een +/- tussen de 41 en 100 kg/GJ<sub>th</sub> en een - bij >100 kg/GJ<sub>th</sub>. Het verschil is te verklaren (zoals hierboven vermeld) doordat de resultaten onderling tegen elkaar zijn afgewogen (*Opwek, Aflevering*).
- **Piekvraag:** In hoeverre is de maatregel in te zetten om de warmte piekvraag in te vullen of deze af te vlakken? De piekvraag is de capaciteit die een afnemer maximaal kan afnemen. Het is niet altijd economisch of technisch mogelijk voor een bron om fulltime warmte te leveren. Sommige bronnen worden daarom ingezet voor de basislast en sommige juist om in de pieklast te voldoen. Dit wordt vaak weergegeven in een jaarbelastingduurkromme (zie Figuur 6-2). Sommige maatregelen verlagen de piekvraag (door het verlagen van de gehele jaarbelastingduurkromme of door het veranderen van de vorm van de curve), zoals door het plaatsen van isolatie of het aanpassen van het afgiftesysteem. Een + betekent dat het mogelijk is op piekvraag te leveren, bij +/- is het mogelijk om piekvraag te leveren, maar is het de vraag of dit interessant is (in deze situaties zijn er vaak hoge kosten). Een - betekent dat het niet mogelijk is om de piekvraag te leveren (*Opwek, Aflevering*).



**Figuur 6-2. Voorbeeld jaarbelastingduurkromme**

- Schaalgrootte: Hoe flexibel is de opwekker op te schalen in haar warmteinzet? Sommige opweksystemen kunnen zowel individueel als collectief worden ingezet, terwijl andere – door bijvoorbeeld hoge investeringskosten – een minimaal aantal aansluitingen nodig hebben om rendabel te zijn. Deze factor is gegeven in  $10^n$  woningequivalenten (*Opwek*).
- Warmteverlies: Hoe scoort de maatregel in het beperken van warmteverliezen? Warmteverlies in de distributie zorgt ervoor dat meer warmte nodig is om aan de totale vraag te voldoen. Dit gaat ten koste van de economische haalbaarheid en duurzaamheid. Het is niet te kwantificeren in wat voor mate er warmteverlies optreedt. Er is gekeken naar of er een afname (+) of toename (-) of dat het situatieafhankelijk is (+/-) (*Distributie*).
- Pompenergie: Hoeveel energie is nodig om de warmte rond te pompen bij deze maatregel? Aanpassingen in de distributie kunnen zorgen voor een verandering in de mate van benodigde pompenergie. Deze factor is interessant omdat het effect heeft op de jaarlijkse pompkosten en bijbehorende CO<sub>2</sub>-uitstoot van de gebruikte elektriciteit. Er is gekeken of er een afname (+) of toename (-) of dat het situatieafhankelijk is (+/-) (*Distributie*).
- Impact omgeving: Wat is de omgevingsimpact (sociaal en maatschappelijk) van de maatregel? De impact op de omgeving bestaat uit drie elementen: ruimtegebruik, uitvoerbaarheid en impact op afnemers. Ruimtegebruik gaat over de mate van ruimte (m<sup>2</sup>) die de maatregel in neemt. De uitvoerbaarheid geeft aan hoe makkelijk een bepaalde maatregel uit te voeren is. Zo is het in sommige gevallen niet mogelijk om gevels na te isoleren. De impact op afnemers is bijvoorbeeld geluidsoverlast of ingrijpende woningrenovatie. Zowel voor distributie als aflevering is deze factor onderling met elkaar vergeleken. Op basis hiervan is beoordeeld hoe de maatregel/opwek is ingeschaald in grootte van de impact (+, +/- of -), Bijlage B Tabellen bepalende factoren geeft inzicht in de specifieke argumentatie (*Distributie, Aflevering*).
- Totale warmtevraag (warmtenet): Heeft de maatregel impact op de omvang van de totale warmtevraag? Mogelijk heeft de maatregel tot gevolg dat de hoeveelheid warmte die moet worden gedistribueerd door het warmtenet verandert. Ook kan de verhouding tussen basislast en piekvraag veranderen. De inschaling van + (afname), +/- (geen verandering) en - (afname) is onderling afgewogen (*Aflevering*).

- Geschikt voor 40°C: Bevordert de maatregel het gebruik van nog lagere temperaturen, van 40°C? Voor LT-netten is in deze studie de bovengrens van 55°C als aanvoertemperatuur gehanteerd. Sommige maatregelen geven echter de mogelijkheid om gebruik te maken van nog lagere temperaturen voor verwarming. Voor deze bepalende factor betekent een + dat het aanvoer van 40°C bevordert, een – zorgt ervoor dat dit deze aanvoer niet bevordert en een +/- dat het situatieafhankelijk is (*Aflevering*).

## 6.2 Bepalende factoren voor aflevering

Wanneer de temperatuur van het warmtenet wordt verlaagd, heeft dit gevolgen voor de ruimteverwarming en warm tapwatervoorziening.

### 6.2.1 Toelichting scoringstabel afleveringscomponenten

Binnen de scoretabel voor aflevering is er onderscheid gemaakt in ruimteverwarming (RV) en warm tapwater (WW). Ruimteverwarming is verder uitgesplitst in maatregelen voor de warmte-afgifteinstallaties in de woningen (afgiftesystemen) en vraagbeperking van de woning (isolatie). Warm tapwater wordt opgesplitst in interactie of onafhankelijkheid met het warmtenet. In de scoretabel staan op de verticale as de mogelijke acties en op de horizontale as de bepalende factoren.

Tabel 6-1 en tabel 6-2 geven een overzicht van maatregelen op het gebied van warmteaflevering en hun score op verschillende bepalende factoren. In Bijlage B staat een (kwalitatieve) beschrijving van bepalende factoren op het gebied van warmteaflevering inclusief mogelijke invloed van de bouwregelgeving, mate van meer verwarmend oppervlak, wijze van kosteneffectief en veilig warm tapwater, effecten op legionella en gerelateerde veiligheid.

**Tabel 6-1. Scoringstabel geselecteerde factoren ruimteverwarming**

Ruimte verwarming	Maatregel	CAPEX	Impact omgeving	Tot. vraag warmtenet	Piekvraag	Geschikt voor 40°C
<b>Afgiftesysteem</b>	Radiator ventilatoren	+	+	n.v.t.	-	+/-
	LT-radiatoren	+	+/-	n.v.t.	-	+
	Vloerverwarming	+/-	-	n.v.t.	+	+
<b>Isolatie</b>	Laag; Label E	+	+	+/-	+	n.v.t.
	Midden; Label B	+/-	+/-	+/-	+	n.v.t.
	Hoog; Label A+	-	+	+	+	n.v.t.

**Tabel 6-2. Scoringstabel geselecteerde factoren warm tapwater**

Warm tapwater	Installatie	CAPEX	Impact omgeving	Tot. vraag warmtenet	OPEX	CO <sub>2</sub> -uitstoot	Risico's
<b>Interactie met warmtenet</b>	Boosterwarmtepomp	-	+/-	+/-	+	+	+
	Elektrische boiler	+	+/-	+	-	-	+
<b>Onafhankelijk van warmtenet</b>	Warmtepomp boiler (lucht)	+/-	+/-	+	+	+/-	+



## 6.2.2 Maatregelen in de ruimteverwarming

Afgiftesysteem: Bij de overgang van HT- naar LT-verwarming zijn er maatregelen nodig om het warmte-afgiftesysteem aan te passen. Er is onderscheid gemaakt tussen de radiatorventilator, LT-radiator en vloerverwarming. De drie maatregelen nemen in complexiteit en investeringskosten toe.

- *Radiatorventilator*: Eenvoudige maatregel die kan worden uitgevoerd door een monteur of de afnemer zelf. Een radiatorventilator zorgt voor het verhogen van de verwarmingscapaciteit van een bestaande radiator.
- *LT-radiator*: Het vervangen van bestaande HT-radiatoren voor LT-radiatoren duurt ongeveer een tot twee dagen, waarbij de bewoner tijdens de ingreep in de woning kan blijven. Met deze maatregel wordt de verwarmingscapaciteit van het verwarmingssysteem verhoogd, zodat de aanvoertemperatuur kan worden verlaagd.
- *Vloerverwarming*: Van de drie maatregelen is het aanleggen van vloerverwarming de meest complexe maatregel. De werkzaamheden hebben impact op de bewoonbaarheid van een woning of ruimte en duren vaak langer dan twee dagen. Deze maatregelen vraagt een grotere investering. Alternatieven zijn wand en/of plafondverwarming. Vloer-, wand- en plafondverwarming zijn alledrie geschikt voor verwarming met een lage aanvoertemperatuur. De keuze voor implementatie is afhankelijk per situatie.

Vraagbeperking: omdat de warmte-afgiftecapaciteit van LT-verwarming lager is, gaat de overgang van HT naar LT vrijwel altijd gepaard met beperking van de warmtevraag, voornamelijk door isolatie. Er is onderscheid gemaakt in drie niveaus: een lage, midden en hoge mate van isolatie<sup>4</sup>. Hoe hoger de isolatie hoe hoger de warmteweerstand (Rc-waarde; W/m<sup>2</sup>K). Een woning met een hoge Rc-waarde heeft minder warmteverlies. Naast isolatie is in de drie isolatieniveaus ook kierdichting meegenomen in de vraagbeperking. Kierdichting en isolatie gaan hand in hand als het gaat om het beperken van warmteverliezen in de woning. De mate van kierdichting is afhankelijk van het isolatieniveau dat wordt gehanteerd.

- Een woning met *lage isolatie* is niet voorzien van dak-, vloer-, of gevelisolatie, waarbij het aandeel dubbelglas significant meer is dan enkelglas. Een woning met dit isolatieniveau en een HR-ketel heeft een energielabel E.
- Het uitvoeren van *middelgrote* maatregelen vraagt een relatief grote ingreep, waarbij het afhangt van de soort ingreep of het leefklimaat (op sociaal vlak) van de afnemer erdoor wordt aangetast. Voorbeelden voor deze ingreep zijn vloer-, dak-, gevelisolatie en vervangen van de beglazing.

---

<sup>4</sup> Gebaseerd op het model *Data voorbeeldwoningen 2011 ten behoeve van EI-berekening* (RVO) en het onderzoek *Systeemkosten van warmte voor woningen* (Ecofys, 2015).

Het uitvoeren van al deze opties ( $R_c=1,3$  voor gevel,  $R_c=2,5$  voor dak/vloer en HR++ in de hele woning) zorgt ervoor dat de referentiewoning van energielabel E naar B gaat. Belangrijk hierbij is dat het energielabel iets zegt over de energieprestatie van de woning, maar niet direct over het gebruikersgedrag.

- De stap naar *hoge isolatie* vraagt meer voorbereidingstijd, het gaat hier respectievelijk om na-isolatie van dak, gevel en de vloer. Ook is hier een investering nodig in de ventilatie, doordat woningen met een hoge  $R_c$ -waarde kierdicht afgewerkt worden. Er zijn aanvullende spuivoorzieningen nodig om in de zomer de warmte kwijt te kunnen. Een maatregel als deze correspondeert met een energielabel A<sup>+</sup>. Tot slot kan er een koudebehoefte ontstaan tijdens warme periodes. Nieuwbouwwoningen worden nu al steeds vaker met hoge isolatie gebouwd.

### 6.2.3 Maatregelen voor warm tapwater

Alle maatregelen voor warm tapwater moeten voldoen aan de gestelde eisen voor legionellapreventie in een woninginstallatie. Hierin wordt geëist dat de temperatuur aan het mengtoestel of aan het tappunt ten minste 55°C of 60°C is<sup>5</sup>. Deze hoge temperatuur kan niet direct worden geleverd met een LT-warmtenet. Voor de implementatie van LT-netten moet er daarom naverwarmd worden om de vereiste temperatuur voor warm tapwater te garanderen. Legionella eisen zijn niet op Europees niveau vastgesteld. De Nederlandse eisen zijn aan de strenge kant vergeleken met omringende landen met warmtenetten, zoals Duitsland en Denemarken. De maatregelen die binnen deze scoretabel zijn gegeven voldoen aan de Nederlandse eisen.

Er zijn drie maatregelen die het warm tapwater op de juiste temperatuur kunnen brengen. Twee werken in combinatie met voorverwarming via warmte uit het stadswarmtewater en één is hier onafhankelijk. Naast deze maatregelen zijn er ook opties die legionella preventief verwijderen, voorbeelden zijn uv-straling en membraanfiltratie. Echter zijn deze opties in vergelijking met onderstaande maatregelen duur en is hier weinig ervaring mee in woningen.

- *Luchtwarmtepomp + boiler*: dit systeem biedt de mogelijkheid om door middel van lucht en elektriciteit het water uit het warmtenet met een gemiddeld rendement van rond de 220% te verwarmen naar de gevraagde temperatuur (COP van 2,2 (NEN 7120, p.291)). Omdat dit systeem buitenlucht gebruikt als warmtebron kan het zijn dat er extra leidingen nodig zijn voor de verbinding met de tappunten in de woning.

---

<sup>5</sup> Voor de bepalingsmethode, zie 5.2.4.2 en 5.2.4.3. (NEN1006:2015).

- *Booster Warmtepomp (BWP)*: dit systeem is ontworpen voor het maken van warm tapwater in woningen aangesloten op een collectieve warmtebron, maar kan ook voor andere toepassingen worden ingezet. Er wordt in dit onderzoek een COP-waarde van 3,8-4,6 gebruikt (afhankelijk van de aanvoertemperatuur).
- *Elektrische boiler*: een elektrische boiler is een verwarmingselement dat (voorverwarmd) water in een thermisch geïsoleerd vat op de juiste gebruik temperatuur houdt, ook wanneer water wordt gebruikt.

### 6.3 Bepalende factoren voor distributie

De functie van het distributiedeel van het warmtenet is het transporteren van warmte van de opwek(kers) naar de afnemers met minimale verliezen. Er zijn verschillende distributiecomponenten betrokken bij de realisatie van een LT-warmtenet. Naast het leidingsysteem zijn dit de warmteoverdrachtstations en de regeling van het warmtenet.

Randvoorwaardelijk aan de mogelijkheid om de transitie te maken van HT- naar LT-warmtenetten is het kunnen borgen van voldoende resterende warmtecapaciteit. Wanneer de temperatuur van het warmtenet wordt verlaagd, vermindert in veel gevallen ook de capaciteit van het warmtenet, omdat de aanvoer- en retourtemperatuur dichterbij elkaar komen te liggen. Hier staat tegenover dat overcapaciteit kan ontstaan doordat de warmtevraag afneemt door toename van woningisolatie (6.1-6.2) en door klimaatverandering (toename minimale buitentemperatuur). Wanneer er geen overcapaciteit is, kan de temperatuur van een warmtenet alleen worden verlaagd als er tegelijkertijd maatregelen worden genomen om de transport- en distributiecapaciteit te verhogen. Onderstaand zijn de maatregelen in volgorde van toenemende ingrijpendheid gegeven.

1. Geen actie nodig (capaciteit is voldoende)
2. Stroomsnelheid in de leidingen verhogen
3. Aanvoertemperatuur verhogen in pieksituaties
4. Cascaderen
5. Extra leidingen toevoegen
6. Leidingen vervangen voor grotere leidingen

Tabel 6-3 geeft een overzicht van deze distributiemaatregelen en hun score op verschillende bepalende factoren. In bijlage B staat een kwalitatieve beschrijving van bepalende factoren voor de haalbaarheid van de overgang HT naar LT op het gebied van warmtedistributie. Hierbij spelen onder andere effecten op stroomsnelheden in leidingen, leiding uitzettingen, mogelijkheden en beperkingen materiaalkeuzes bij renovatie en uitbreidingen, mogelijkheden voor regulatie overgang per onderstation en distributie deelsysteem door circulatie een rol.

**Tabel 6-3. Scoringstabel bepalende factoren distributie**

Maatregel	CAPEX	Risico's	Impact omgeving	Warmte-verlies	Pomp-energie
Geen actie nodig	n.v.t	n.v.t	n.v.t	n.v.t	n.v.t
Stroomsnelheid verhogen	+	+/-	+	+	-
Aanvoertemperatuur verhogen	+	+	+	-	+
Cascaderen	+/-	+/-	+/-	+	-
Extra leidingen	-	+/-	-	-	-
Leidingen vervangen door grotere	-	+/-	-	+/-	+/-

- Stroomsnelheid in de leidingen verhogen: door het verhogen van de stroomsnelheid kan er een groter volume water per uur door de bestaande leidingen getransporteerd worden. Het verhogen van de snelheid is alleen mogelijk wanneer de leiding bestand is tegen de toenemende waterdruk en -snelheid. Bij oudere netten kan het een risico zijn om de snelheid te verhogen, doordat er een hogere druk in de leidingen de kans op lekkage verhoogt. Het verhogen van de mediumsnelheid zal in veel gevallen een extra investering in pompen betekenen.
- Aanvoertemperatuur verhogen in pieksituaties: wanneer de capaciteit van het warmtenet in de pieksituatie onvoldoende dreigt te worden, kan er voor gekozen worden om tijdelijk het LT-net op een hogere temperatuur te voeden. Op deze manier wordt een groter temperatuurverschil gecreëerd. Op de momenten waarop de aanvoertemperatuur verhoogd wordt valt het net (tijdelijk) niet meer binnen de definitie van een LT-net zoals gehanteerd in dit document. Desondanks is het een interessante optie om kosten-efficiënt tijdelijke capaciteitstekorten te verhelpen, bijvoorbeeld tijdens extreem koude dagen in het jaar.
- Cascaderen: cascadering in een warmtenet betekent dat de warmte die in de retourleiding van het warmtenet zit ook wordt benut door hier afnemers op aan te sluiten die warmte op een lage temperatuur vragen. Het voordeel van cascaderen is dat aan hetzelfde water tweemaal warmte wordt onttrokken. Belangrijke randvoorwaarde is dat de temperatuur van de warmte voor deze 'gecascadeerde' afnemer te allen tijde hoog genoeg is. Een mengstelsel op basis van aanvoer- en retourstroom van het warmtenet kan deze beschikbaarheid borgen. Deze maatregel is ook interessant in situaties waar een traditioneel HT-warmtenet ligt van bijvoorbeeld 70°C in de nabijheid van een bebouwd gebied dat met lagere temperatuur kan worden gevoed via de retourleiding van 40°C. Cascaderen is daarmee een erg interessante stap in het transitiepad van hoge temperatuurnetten naar lage temperatuurnetten.
- Extra leidingen toevoegen: wanneer een warmtenet aangepast dient te worden is het mogelijk dat er wordt gekozen voor het leggen van extra leidingen in plaats van het vervangen van leidingen. Naast de bestaande leidingen worden een extra aanvoer- en retourleiding gelegd om samen met de bestaande leidingen hogere capaciteit te kunnen leveren. Een belangrijk voordeel is dat hiervoor de rest van het warmtenet niet uit bedrijf hoeft. Het leggen van extra leidingen is een ingrijpende en kostbare maatregel waarvoor ruimte in de bodem beschikbaar dient te zijn.

- Leidingen vervangen voor grotere leidingen: capaciteitstekort kan uiteindelijk ook worden opgelost door de leidingen van het bestaande warmtenet te vervangen voor nieuwe, grotere leidingen. Wanneer een stuk leidingnet vervangen wordt kan het mogelijk zijn, afhankelijk van de configuratie van het warmtenet, dat er gedurende een periode minder of zelfs geen warmte geleverd kan worden aan de gebruikers. Dit is de meest ingrijpende en vaak kostbaarste maatregel om capaciteitsproblemen op te lossen.

### 6.3.1 Materiaalkeuze

In een transitie van HT naar LT ontstaan er nieuwe mogelijkheden in het gebruik van type leidingen, zowel in woningen als in het warmtenet zelf. Bij aanvoertemperaturen onder de grens van 80°C is het mogelijk andere typen leidingen en leidingisolatie te gebruiken. Een van de voordelen is dat deze leidingen flexibel zijn en daarmee vaak makkelijker te realiseren door bijvoorbeeld de uitrol vanaf een haspel (Bijlage B, tabel B-5). Bestaande leidingen die nu op hogere temperatuur gebruikt worden kunnen op deze lagere temperaturen gebruikt worden wanneer de temperatuur rustig omlaag wordt gebracht. Met het rustig verlagen van de temperatuur worden thermische spanningen in de leidingen en grondzettingen opgevangen<sup>6</sup>. Een bijkomend voordeel is dat bij een temperatuurverlaging van 90°C naar 50°C het warmteverlies in de leidingen afneemt met 4/7 vanwege het kleinere temperatuurverschil met de bodem waar de leiding doorheen loopt.

## 6.4 Bepalende factoren voor opwek

De keuze voor 'opwek' is geen beperkende factor in de transitie naar een LT-warmtenet. In vergelijking met aflevering en distributie, biedt opwekking veel mogelijkheden als het gaat om lage-temperatuur warmte. Elke bron kan een lage temperatuur leveren, terwijl niet elke bron een hoge temperatuur kan leveren. Een LT-warmtenet biedt dus meer mogelijkheden qua inzet van opwekkers.

---

<sup>6</sup> Ontwerptechnisch en theoretisch is het altijd mogelijk de temperatuur vanaf een HT-warmtenet (bijvoorbeeld tussen de 90°C - 120°C) om laag te brengen naar onder de 55°C, zolang dit rustig wordt uitgevoerd. Voorbeeld: Wanneer een HT-warmtenet uit bedrijf wordt gehaald (bijvoorbeeld door onderhoud) neemt de temperatuur binnen één dag af naar 10°C.

**Tabel 6-4. Overzicht bepalende factoren opwek**

Warmtebron	Voorkeurs temp.	Potentieel	CAPEX	OPEX	Risico's	CO <sub>2</sub> – uitstoot	Piek-vraag	Schaal-grootte (W <sub>eq</sub> )
Ondiepe geothermie	25°C -55°C	+	-	+	-	+	+/-	>10 <sup>3</sup>
Zonnewarmte	<60°C	+/-	-	+	+	+	-	>10 <sup>2</sup>
Biomassa	Alle	+/-	+/-	-	+	+	+/-	Onafh.
Gas	Alle	+	+	+/-	+	-	+	Onafh.
Warmtepomp	<60°C <sup>7</sup>	+	+/-	+/-	+	-	-	Onafh.
Grootschalig – Industriële restwarmte	Bronafh.	+/-	+/-	+	+/-	+	+/-	>10 <sup>3</sup>
Grootschalig – restwarmte (E-centrale)	≥42°C	+/-	+	+/-	+/-	+	+/-	>10 <sup>4</sup>
Kleinschalige restwarmte	Bronafh.	+/-	+	+	+/-	+	-	>10
Power-to-heat /elektrisch bijverwarmen	Alle	+/-	+	+	+/-	-	+/-	>10 <sup>3</sup>

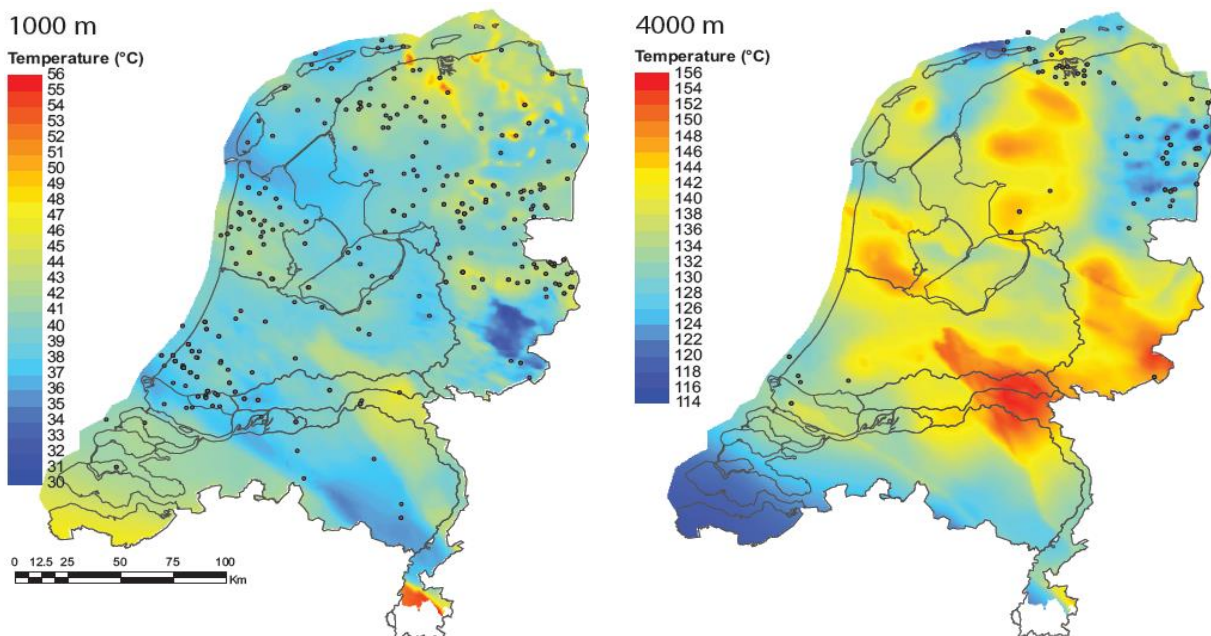
Tabel 6-4 geeft een overzicht van mogelijke warmtebronnen met hierbij de voorkeurstemperatuur en schaalgrootte weergegeven. In Bijlage B staat een (kwalitatieve) beschrijving van bepalende factoren voor de haalbaarheid van mogelijke warmtebronnen. In deze sectie wordt per opwekker beschreven waarom deze opwekker is gekozen en op welke manier de opwekker wordt gebruikt binnen de reikwijdte van deze verkenning. De keuze is gebaseerd op een scoretabel waar voor negen mogelijke warmtebronnen verschillende bepalende factoren zijn geschaald.

Ondiepe geothermie: ondiepe geothermie wordt in dit onderzoek aangeduid met een diepte tussen de 500 – 1500 meter. Een boring met een diepte van meer dan 500 meter valt onder de mijnbouwwet (wetten, 2015, hoofdstuk 1, art 2). Volgens de mijnbouwwet dient bij een geothermieproject een gedegen studie van de ondergrond uitgevoerd te worden en het vergunningstraject dient volgens de voorschriften van de Nederlandse Mijnbouwwet te lopen.

<sup>7</sup> Hoe kleiner het verschil in temperatuur tussen de condensor en verdampers van de warmtepomp, des te efficiënter de warmtepomp is (specifieke COP is verder nog afhankelijk van type koelmiddel en type warmtepomp). Voor een LT-net zijn temperaturen onder de 60°C ideaal om een hoge efficiëntie (COP) te halen. Echter kan een warmtepomp ook hogere temperaturen leveren.

De temperaturen in de grond bij ondiepe geothermie variëren gemiddeld van 25°C - 30°C (500 meter) tot 45°C - 65°C (1500 meter), de temperatuurgradiënt loopt echter erg sterk uiteen binnen Nederland (zie Figuur 6-3) (Bonte, et al, 2012). Ondiepe geothermie kan invulling bieden als duurzame basislast voor een LT-net. Tot op heden zijn er nog weinig ondiepe geothermieprojecten gerealiseerd in Nederland en omliggende landen.

Dieper boren resulteert vaak in een warmtebron met een hogere temperatuur, waardoor een hoger vermogen aan warmte geleverd kan worden. Er moet per situatie gekeken worden of de extra kosten voor het dieper boren (en dus een hogere brontemperatuur, zie Figuur 6-3) opwegen tegen de extra warmteopbrengst uit de bodem. Dit hangt af van verschillende factoren zoals de totale warmtevraag van het aan te sluiten gebied en de lokale potentie van de bodem.



**Figuur 6-3. Temperatuur op 1000 en 4000 meter diepte in de Nederlandse bodem (Bonte et al., 2012)**

Naast de potentie voor geothermie, draagt (ondiepe) geothermie enkele risico's met zich mee. Allereerst is de kans aanwezig dat er een lager vermogen uit de bodem wordt gehaald dan vooraf verwacht, terwijl juist het boren van de bron de grootste investering vraagt. Gezien de investeringen die nodig zijn voor het doen van de boring heeft de overheid een garantieregeling (RNES) tegen het risico van misboring (P50-90 vermogen<sup>8</sup>).

Deze regeling zorgt ervoor dat partijen meer zekerheid hebben bij het investeren in geothermie.

<sup>8</sup> P50-90 vermogen: Het vermogen dat u met 50 á 90% zekerheid aan de ondergrond kunt onttrekken. U kunt zich hiervoor aanmelden, na de aanvraag kunt u financieel ondersteund worden wanneer de boring dusdanig afwijkt van het vooraf bepaalde vermogen.  
[http://www.rvo.nl/sites/default/files/Handleiding\\_SEI%20RNES%20risico%20aardwarmte%2014\\_09\\_2015.pdf](http://www.rvo.nl/sites/default/files/Handleiding_SEI%20RNES%20risico%20aardwarmte%2014_09_2015.pdf)



Verder is het mogelijk dat tijdens het oppompen van het bodemwater gas of olie mee omhoog komt. Dit is voorafgaand aan de boring lastig in te schatten en kan leiden tot eventuele extra kosten voor het investeren in een scheidingsinstallatie of het tijdelijk stilleggen van de warmteproductie (wat indirect gevolgen heeft voor de aangesloten afnemers). Een vaak toegepaste optimalisatie ontstaat wanneer het gas wordt verstookt in een lokale WKK om de pompen van de geothermie-installatie van elektriciteit te voorzien.

Zonnewarmte (zonthermie): zonnewarmte is een techniek waarbij de energie van het zonlicht wordt omgezet in warmte voor toepassing in een gebouw of bedrijf (RVO, 2015). Deze verkenning kijkt naar zonnewarmte op grote schaal, waardoor via een warmtenet meerdere woningen of woonwijken aangesloten kunnen worden. Zonthermie vraagt snel grotere oppervlaktes aan zonnecollectoren (200m<sup>2</sup> voor een piekvermogen van 0,14 MW (Van Zuijlen et al., 2015) om de kosten voor de koppeling met het net terug te verdienen. De opbrengst van zonnethermie is in Nederlande gemiddeld 1,72 GJ<sub>th</sub>/m<sup>2</sup>/jaar. Waarbij het aandeel zonnewarmte in 2012 1,1 PJ was en stijgt naar verwachting tot 1,3 PJ in 2020 (CBS, 2015). Vanwege het tegengestelde jaarpatroon van aanbod van zonnewarmte (vooral in de zomer) en warmtevraag (vooral in de winter) kan zonder buffering slechts een klein deel van de warmte door zonnethermie worden voorzien. Buffering kan toegepast worden als dag-nacht-opslag en als seizoensopslag en kan met verschillende technieken worden gerealiseerd waaronder ondergrondse opslag in watervoerende lagen, ondergrondse opslag in open tanks en opslag in bovengrondse tanks. Afhankelijk van de schaalgrootte en duur van de opslag kan de meest interessante techniek worden gekozen.

Zonnewarmte in combinatie met opslag (vooral seizoensopslag) heeft veel potentie. Vojens in Denemarken spant de kroon met ruim 52.000 m<sup>2</sup> aan zonnewarmte-oppervlak en een opslagcapaciteit van 200.000 m<sup>3</sup> (tussen de 190 en 200 miljoen liter warm water kan hier worden opgeslagen). In landen als Duitsland en Zweden worden nieuwe systemen met een combinatie van zonnewarmte en opslag gerealiseerd, waarmee de techniek steeds volwassener en economisch interessanter wordt. Een overzicht hiervan is terug te vinden op het Solar District Heating platform<sup>9</sup>.

Ook Nederland heeft verschillende zonthermische parken gerealiseerd, het zonne-eiland in Almere (7.000 m<sup>2</sup>) en op het dak van de snoepfabriek Perfetti Van Melle in Breda (2.400 m<sup>2</sup>) waar gebruik wordt gemaakt van een warmteopslag- en terugloopvat.

Biomassa: biomassa kent veel verschillende gebruiksvormen voor de productie van energie zoals energieopwekking door verbranding, vergisting/vergassing tot groen gas of als biobrandstoffen in benzine en diesel. Voor stadswarmte wordt de directe verbranding van biomassa (via ketels of WKK's) op dit moment het meest toegepast, maar worden ook vergisting en verbranding van bio-olie

---

<sup>9</sup> Solar District Heating: Een Europees platform waar kennis op het gebied van zonnewarmte als warmtebron voor warmtenetten wordt gebundeld.



toegepast. Via directe verbranding worden voornamelijk pellets en chips (snoei- en dunningshout) gebruikt als brandstof.

Dit kan logistieke uitdagingen met zich meebrengen wanneer grootschalige biomassa in of nabij steden wordt toegepast. In de discussie over de rol van biomassa in de toekomstige energievoorziening komt ook duidelijk de rol naar voren van biomassa als hoogwaardige energiedrager waarmee in plaats van lage temperatuur warmte ook hoge temperatuur warmte of bio-based producten kunnen worden geproduceerd. In Nederland wordt warmteopwekking via biomassa steeds meer toegepast en verder gestandaardiseerd (Beer et al., 2014). Zo is in het jaar 2013 - 2014 de warmteproductie door biomassaketels voor warmtebedrijven met 2,0 PJ gestegen naar 7,5 PJ (CBS, 2015).

Gas: gas wordt momenteel in Nederland het meest gebruikt voor het leveren van warmte. Over heel Nederland liggen gasnetwerken die grotendeels verbonden zijn met elkaar. Gasbranding is als opwektechniek meegenomen in deze verkenning omdat het geschikt is voor snel op- en afregelen en warmte kan leveren op elk gewenst temperatuurniveau. Omdat er lage investeringskosten mee gemoeid zijn wordt het regelmatig als piek- en back-up opwekker ingezet in systemen met een duurzame basislast.

Warmtepomp: wanneer (rest-)warmte beschikbaar is met een lagere temperatuur dan er gebruikt kan worden op het warmtenet, kan deze warmte met een warmtepomp worden opgewaardeerd. Een warmtepomp onttrekt warmte uit (grond)water of (ventilatie)lucht door een vloeistof te verdampen waarbij warmte wordt onttrokken en die vervolgens samen te persen, waardoor de temperatuur stijgt. Via een warmtewisselaar wordt die warmte gebruikt voor waterverwarming of ruimteverwarming, voor dit proces is gas, HT-warmte of elektriciteit nodig (RVO, 2015, 3).

Warmtepompen worden op zichzelf niet ingezet als opwekker voor het warmtenet, maar zijn een hulpmiddel om warmte dat op een lagere temperatuur beschikbaar is te kunnen benutten. Warmtepompen worden gebruikt in combinatie met een andere opwekker om te kunnen voldoen aan de juiste warmtevraag. Deze warmtepompen kunnen op verschillende locaties in het warmtenet geplaatst worden, van direct naast de LT-opwekker tot aan bij de afnemer (bijvoorbeeld een boosterwarmtepomp). Het rendement van een warmtepomp (COP: Coefficient of Performance<sup>10</sup>) is afhankelijk van de aanvoertemperatuur van het warmtenet en de temperatuur van de warmtebron en varieert typisch van 4 tot 7 voor toepassingen in LT-warmtenetten.

Grootschalige restwarmte: de term restwarmte wordt gebruikt wanneer sprake is van warmte die geen andere bestemming heeft en bijvoorbeeld in het oppervlaktewater of de lucht wordt geloosd. Het effectief gebruik van restwarmte wordt momenteel veel beschreven als kans om de transitie van

---

<sup>10</sup> COP (Coefficient of Performance): Dit is de verhouding tussen het aandeel energie input ten opzichte van de output. Hoe hoger de COP des te efficiënter de installatie (bijvoorbeeld een warmtepomp). Een COP van 3 betekent dat 1 deel energie input nodig is voor 3 delen output.

warmte door te zetten (transitie naar duurzaam, 2016), omdat hierdoor minder primaire energie ingezet hoeft te worden. Restwarmte is echter een breed begrip en er wordt in de verkenning gekeken naar specifiek twee bronnen: centrale restwarmte (industriële restwarmte en restwarmte uit elektriciteitscentrales) en decentrale restwarmte, met duidelijke verschillen ten aanzien van zowel de maatschappelijke als de economische kosten en baten.

Industriële restwarmte: industriële restwarmte is gedefinieerd als warmte wat uit te koppelen is als reststroom uit een industrieel proces. Deze warmte zou normaal gesproken worden geloosd. Voor de uitkoppeling zijn vaak significante investeringen nodig (zowel op de productielocatie, als voor een warmtetransportleiding) waardoor lange termijn leverings- en afnamecontracten nodig zijn. Dit maakt het uitkoppelen van de restwarmte een ingewikkeld proces dat concurreert met energiebesparing van de industrielocatie on-site. In Nederland wordt industriële restwarmte in verschillende gebieden toegepast. In de Rotterdamse Haven wordt naar schatting 150 PJ aan warmte per jaar geloosd. Er zijn verschillende projecten en onderzoeken gaande die mogelijke uitkoppelingen van deze restwarmte mogelijk moeten maken.

Restwarmte uit een elektriciteitscentrale of afvalverbrandingsinstallatie: een andere mogelijkheid is wanneer restwarmte als secundair product ontstaat bij elektriciteitsopwekking. Dit is vaak het geval bij een afvalverbrandingsinstallatie (AVI) of een kolen-, gas of biomassa-centrale waar door verbranding elektriciteit uit warmte worden geproduceerd. In 2013 is er op deze manier ongeveer 3 PJ aan warmte aan warmtenetten geleverd. In sommige gevallen wordt de keuze gemaakt om het proces bewust te sturen zodat er minder elektriciteit wordt geproduceerd en meer warmte wordt geleverd. De term 'restwarmte' is derhalve onderwerp van discussie omdat elektriciteitsderving optreedt ten behoeve van warmteproductie.

Kleinschalige restwarmte: het bewustzijn over beschikbaarheid van (rest)warmte neemt toe. Dit zorgt voor meer partijen die het uitkoppelen van warmte overwegen. Bedrijven kunnen deze restwarmte invoeden op een al bestaand warmtenet, of op lokaal niveau afnemers aansluiten. Een voorbeeld hiervan is de Jaap Eden ijbaan, waar restwarmte uit de koelinstallaties gebruikt wordt om via een warmtepomp verschillende afnemers van warmte te voorzien. Deze kleinschalige restwarmte is vaak op lage temperatuur en/of laag vermogen beschikbaar.

Power-to-Heat: Power-to-Heat (P2H), ook wel elektrisch bijverwarmen, is het principe van het omzetten van elektriciteit in warmte. Het omzetten van elektriciteit in warmte kan met behulp van warmtepompen of direct met een verwarmingselement. In deze verkenning is gekeken naar de directe wijze. Via P2H kan geprofiteerd worden van periodes met lage of zelfs negatieve elektriciteitsprijzen door op die momenten heel voordelig warmte te maken. Daarnaast biedt P2H de mogelijkheid om de piekvraag op te vangen. Vooral Denemarken en Duitsland zijn al een stap verder in de ontwikkeling, gedreven door elektriciteitsoverschotten uit het grotere aantal duurzame energie opwekkers. In Denemarken staat op dit moment al 450 MW aan P2H vermogen opgesteld, waarvan zo'n 90% via direct elektrisch bijverwarmen (Agora Energiewende, 2014). Als het Nederlandse energiesysteem ontwikkelt naar meer duurzame elektriciteitsopwek (zoals globaal voorzien in het Energieakkoord en de Europese klimaatdoelstellingen) neemt de potentie voor P2H toe.

Warmtebuffer: door het gebruik van een warmtebuffer kan de inzet van de meest goedkope en duurzame bronnen worden vergroot en zijn minder piekopwekkers nodig. Daarnaast kan de buffer ook als back-up dienen. Er zijn verschillende soorten en maten warmtebuffers, zoals bijvoorbeeld dagbuffers en seizoensbuffers. Seizoensbuffers zijn interessant voor lagere temperaturen omdat het de mogelijkheid biedt om over het jaar heen een constante afname van warmte te benutten. In onderzoek is op dit moment veel aandacht voor de verschillende vormen van opslag die op dit moment worden toegepast en voor nieuwe vormen van warmte-opslag zoals Phase Change Materials en thermochemische opslag.

De grootte van de buffer is afhankelijk van de hoeveelheid aangeboden of gevraagde warmte. Nuon heeft bijvoorbeeld een bovengrondse warmtebuffer staan met een capaciteit van 22.000 m<sup>3</sup> waarmee in de zomer 16 uur warmte geleverd kan worden. Kosten voor een warmtebuffer variëren tussen de 750 – 2500 €/kW<sub>th</sub>, dit is afhankelijk van de mate van isolatie en of de energie op atmosferische druk of gekozen druk wordt opgeslagen.

## 7 Praktijk casussen

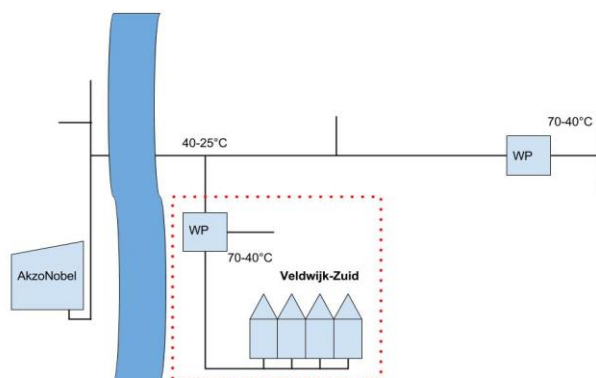
Dit hoofdstuk laat aan de hand van twee praktijkcasussen zien hoe de transitie naar lage temperatuur warmte in de praktijk ingevuld kan worden. Het gaat hier om twee bestaande warmtenetten die van elkaar verschillen in onder andere grootte, ouderdom en type opwekker. De eerste casus behelst een klein secundair net van het warmtenet in Hengelo en de tweede casus betreft de aansluiting van enkele flats op het warmtenet in Rotterdam. In elke casus worden de onderdelen uit de verkenning aangehouden om de transitie naar een LT-net te analyseren.

Per casus wordt allereerst de huidige situatie beschreven van het gebied. Vervolgens worden de benodigde aanpassingen gegeven van de verschillende deelsystemen welke leiden tot een raming van investerings- en operationele kosten. Tot slot worden lessons learned beschreven op het gebied van economisch, sociaal en technisch vlak.

### 7.1 Warmtenet Hengelo

#### Huidige situatie<sup>11</sup>

Momenteel is de situatie in het warmtenet Hengelo als volgt: Restwarmte van 40°C uit de zoutdroging van AkzoNobel wordt gebruikt als bron voor het primaire warmtenet (grootschalige restwarmte van industrie). Deze restwarmte voedt via het primaire net (40°C - 25°C) verschillende afnemers (utiliteit) zonder opwaardering. Verder wordt deze warmte gebruikt als input voor twee warmtepompen (WP), welke de temperatuur opwaarden naar 70°C. Deze 70°C wordt gedistribueerd naar de eindgebruikers. In Figuur 7-1 is het warmtenet in Hengelo schematisch weergegeven. Het gebied dat met een rode stippellijn is omcirkeld is het gebied van het warmtenet dat naar lage temperatuur gebracht wordt.



<sup>11</sup> De in deze verkenning genoemde huidige situatie is de situatie die op het moment van schrijven (deels) in voorbereiding is en begin 2017 operationeel zal zijn.

### Figuur 7-1. Overzicht warmtenet Hengelo

In deze casus wordt één van de secundaire netten beschouwd. Dit secundaire net is gelegen in de buurt Veldwijk-Zuid, waar 102 woningen op zijn aangesloten (rood gearceerde gebied in figuur 7-1). Overige gegevens voor Veldwijk-Zuid staan hieronder:

- De woningen in Veldwijk-Zuid hebben verschillende afgiftesystemen: circa 50% van de woningen wordt verwarmd door radiatoren, en 50% van de woningen wordt verwarmd middels vloerverwarming.
- De gemiddelde jaarlijkse warmtevraag per woning bedroeg over 2014 en 2015 gemiddeld 23 en 24 GJ (variërend van 4 tot en met 56 GJ), dit getal bedraagt de gecombineerde warmtevraag voor ruimteverwarming en voor warm tapwater.

Tabel 7-1 geeft een overzicht van de type woningen en het bouwjaar van de aangesloten woningen. Van het bouwjaar kan de EPC-eis van dat jaar worden afgeleid. Conform de EPC-eis moeten woningen die in de periode 2011-2014 zijn gebouwd, minimaal een EPC hebben van 0,6. Dit komt nagenoeg overeen met een energielabel van A+.

**Tabel 7-1. Type woningen en bouwjaar**

Type woning/bouwjaar	2011	2013	Totaal
Tussenwoningen/hoekwoning	4	-	4
Maisonnettes	16	-	16
Appartementen	30	52	82
<b>Totaal aantal woningen</b>	<b>50</b>	<b>52</b>	<b>102</b>

### Benodigde aanpassingen

Vanuit de huidige situatie kunnen er verschillende scenario's worden opgesteld waarmee woningen gevoed kunnen worden met een lage aanvoertemperatuur van 40°C zonder opwaardering. Het meest waarschijnlijke scenario, waarin er in de aflevering geen aanpassingen nodig zijn, wordt beschreven.

In dit scenario wordt alleen de temperatuur in het warmtenet dat de 102 woningen voedt niet meer door de warmtepomp opgevaardeerd, maar direct naar de woningen gedistribueerd. Om ervoor te zorgen dat de afgiftesystemen het gevraagde vermogen altijd kunnen leveren wordt er gekozen voor het verhogen van het temperatuurregime van het warmtenet in periodes dat de afgiftesystemen een groter vermogen vragen dan dat ze kunnen leveren met 40°C. Dit komt overeen met maatregel 3 uit tabel 6-3. Hieronder worden de benodigde aanpassingen voor aflevering, opwek en distributie beschreven.

#### Aflevering

De isolatie- en afgiftesystemen van de woning zijn in 2011 en 2013 nieuw geplaatst en voldoen daarmee aan de moderne standaarden. De woningen worden niet aangepast, er hoeven dan ook geen kosten in rekening worden gebracht voor isolatie en afgiftesystemen. De helft van de woningen wordt verwarmd door middel van radiatoren waarvan het niet bekend is welke stooklijn deze nodig hebben om de woning warm te krijgen bij elke buitentemperatuur. Wanneer het afgiftevermogen bij 40°C te klein is kan de temperatuur in het warmtenet door middel van een stooklijn geleidelijk worden verhoogd naar 70°C. Het is ook mogelijk te kiezen voor radiatorventilatoren of radiatoren met meer verwarmd oppervlak (in het geval de woning radiatoren bevat), echter gaat deze casus uit

van het verhogen van de stooklijn. De woningen die verwarmd worden met vloerverwarming kunnen het hele jaar gebruik maken van 40°C.

**Tabel 7-2. Morfologisch overzicht woningen warmtenet Hengelo**

Type woningen Warmtenet Hengelo		Aflevering (RV) Isolatie	Aflevering (RV) Afgiftesysteem
Tussen-/hoekwoningen	70°C -40°C	Niks doen	Niks doen
Maisonette woningen	70°C -40°C	Niks doen	Niks doen
Appartementen	70°C -40°C	Niks doen	Niks doen

Bij een aanvoertemperatuur van 40°C is het niet mogelijk de woning direct van warm tapwater te voorzien. Er dient een keuze gemaakt te worden welk type installatie er in de woningen wordt geplaatst om warm tapwater te kunnen maken. Eerder in de verkenning werd duidelijk dat de warmtepomp (op basis van buitenlucht) economisch het meest interessant is wanneer gekeken wordt naar de jaarlijkse energiekosten. Echter kan een boosterwarmtepomp in deze casus ook interessant zijn, omdat de restwarmte vanuit AkzoNobel lage marginale kosten heeft per GJ warmte. Als Warmtenet Hengelo zelf de levering van warm tapwater gaat beheren in de woningen, kunnen de marginale kosten een interessante rol spelen, omdat dan niet de verkoopprijs, maar de marginale kosten worden gebruikt voor het bepalen van de kosten van warm tapwaterlevering. Hieronder volgt een overzicht van de operationele kosten van warm tapwater wanneer de prijs per GJ warmte omlaag gaat naar 12 €/GJ en 4 €/GJ.

**Tabel 7-3. Tapwaterpatroon 1 (150l): operationele kostenverschil warm tapwater installaties**

Prijs warmte (excl. BTW) (€/GJ)	Huidige situatie [€/jaar]	WW installatie	Nieuwe situatie [€/jaar]	Vershil in kosten [€/jaar]
17,9 (excl. BTW)	215	Booster warmtepomp	297	82
		Warmtepomp lucht	274	59
12	144	Booster warmtepomp	239	95
		Warmtepomp lucht	240	96
4	48	Booster warmtepomp	161	113
		Warmtepomp lucht	195	147

**Tabel 7-4. Tapwaterpatroon 2 (180l): verschil in operationele kosten warm tapwaterinstallaties**

Prijs warmte (excl. BTW) (€/GJ)	Huidige situatie [€/jaar]	WW installatie	Nieuwe situatie [€/jaar]	Vershil in kosten [€/jaar]
17,9 (excl. BTW)	260	Booster warmtepomp	358	98
		Warmtepomp lucht	310	50
12	174	Booster warmtepomp	287	113
		Warmtepomp lucht	278	104
4	58	Booster warmtepomp	192	134
		Warmtepomp lucht	232	174

In bovenstaande tabellen zijn de jaarlijkse energiekosten gegeven voor het gebruik van warm tapwater, onderverdeeld in twee gebruikershoeveelheden (150 en 180 litervat). In de linkerrij staan de marginale kosten per GJ.

Elke nieuwe situatie heeft hogere kosten dan de huidige situatie, voor zowel de afnemer als leverancier van warmte. In vergelijking is de boosterwarmtepomp goedkoper dan de lucht-warmtepomp voor lagere warmtepreizen. De grens waar de boosterwarmtepomp goedkoper wordt ligt rond de 12 €/GJ. Dit komt doordat de boosterwarmtepomp een hogere efficiëntie (COP) heeft en als bron het water uit het warmtenet gebruikt. Een opmerking die hierbij moet worden geplaatst is dat in deze casus voor een X aantal uur per jaar de temperatuur in het warmtenet omhoog gebracht wordt om te kunnen voldoen aan de warmtevraag voor ruimteverwarming. Dit zal voornamelijk in koudere periodes zijn. Wanneer dit gebeurt is er geen opwaardering nodig van het warm tapwater. Voor de warmtepomp (op basis van buitenlucht) heeft dit een positieve uitwerking, aangezien deze installatie een lagere COP heeft bij lagere buitentemperaturen. Wat dit precies doet met de kosten voor de warmtepomp, inclusief boiler, valt buiten het onderzoek. Echter kan dit wel impact hebben op de onderlinge kostenafweging (en dus de uiteindelijke keuze in het type warm tapwaterinstallatie) tussen een boosterwarmtepomp en de warmtepomp inclusief boiler.

Wat betreft de boosterwarmtepomp installaties bedraagt de totale investering ongeveer €370.000 euro voor 102 woningen, de kosten bij het investeren in een buitenlucht warmtepomp inclusief boiler ligt rond de €410.000 (zie Tabel C-0-8 – Overzicht kostenpost warm tapwater installaties).

**Tabel 7-5. Totale investeringskosten warm tapwaterinstallatie**

Warm tapwater kosten	CAPEX (€) Warm tapwaterinstallatie	Overige kosten*
Tussenwoningen/hoekwoning (4)	1.980 x 4	1.670 x 4
Maisonnettes (16)	1.980 x 16	1.670 x 16
Appartementen (82)	1.980 x 82	1.670 x 82
<b>Totaal</b>	<b>202.000</b>	<b>170.000</b>

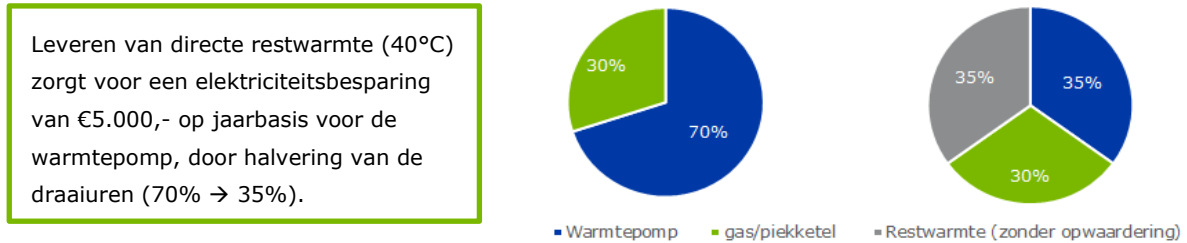
\*Overige kosten: dit zijn de kosten voor manuren en extra materiaalkosten die nodig zijn om de warmwater installatie te installeren in de woning (C.4 Kosten warm tapwaterinstallaties).

#### Opwek

De opwekker in deze casus staat vast. Bij AkzoNobel (industriële restwarmtebron) levert restwarmte uit zoutdroging als bron voor het LT-warmtenet. Deze restwarmte (circa 40°C) wordt anders in de lucht of het Twenthekanaal geloosd. Binnen deze casus is niet gezocht naar alternatieven voor de hoofdopwekker, omdat de huidige opwekker duurzaam is, voldoende capaciteit heeft, leveringszekerheid biedt en lage operationele kosten heeft. Naast de hoofdopwekker wordt ook gebruik gemaakt van een centrale warmtepomp die warmte opwaardeert naar 70°C en een gasgestookte piekketel. Door de temperatuur in het warmtenet te verlagen worden de centrale warmtepomp en de piekketel minder ingezet.

In Warmtenet Hengelo wordt 70% van de totale warmtevraag door de restwarmte via de warmtepompen geleverd en 30% door de piekketel. In deze case wordt verondersteld dat door het verlagen van de temperatuur van het wijknet (wanneer de capaciteit van het warmtenet en de afgiftesystemen dit aankunnen) het aantal draaiuren van de warmtepomp halveert (van 70% totale warmtevraag via de warmtepomp naar 35%). Er is minder elektriciteit nodig omdat de LT-warmte nu direct met 40°C de ruimteverwarming kan verzorgen. De elektriciteitskosten nemen af met 5.000

euro op jaarbasis, bij een COP van 4 (Tabel 7-6). Figuur 7-2 laat zien dat 35% van de totale warmtevraag in de nieuwe situatie wordt geleverd door restwarmte (zonder opwaardering)<sup>12</sup>.



**Figuur 7-2. Voorbeeld bij halvering draaiuren van de warmtepomp**

**Tabel 7-6. Jaarlijkse besparingskosten elektriciteit warmtepomp**

Besparingskosten elektriciteit warmtepomp	Totale vraag WOS (GJ)	Huidig (70%)	Nieuw (35%)
Warmtevraag (GJ <sub>th</sub> /jaar)	2450	1715 GJ <sub>th</sub>	858 GJ <sub>th</sub>
Benodigde elektriciteit (GJ <sub>elec</sub> )	-	429 GJ <sub>elec</sub>	215 GJ <sub>elec</sub>
Kosten (€)	-	<b>10.125</b>	<b>5.060</b>

#### Distributie

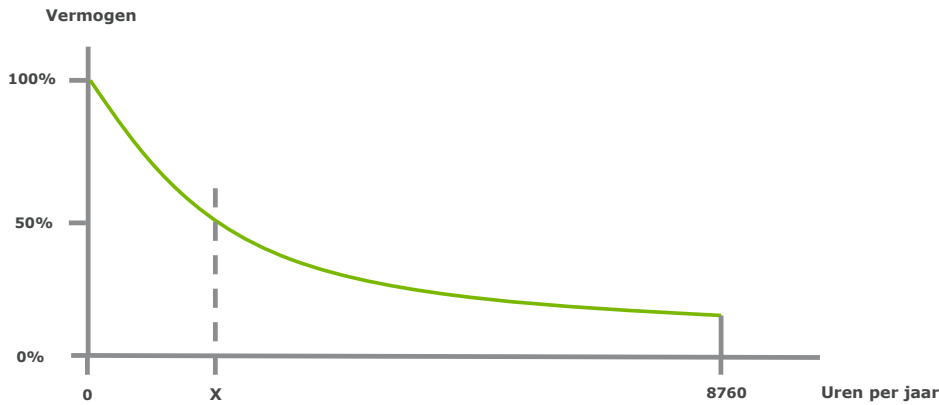
De temperatuur in het warmtenet wordt verlaagd, maar wordt voor een bepaald aantal uur per jaar verhoogd om aan de warmtevraag van de woningen te kunnen voldoen. Het aantal uur dat deze verhoging nodig is wordt bepaald door twee factoren waar nader onderzoek voor nodig is:

- De huidige capaciteit van het warmtenet;
- De temperatuur die de radiatoren in de bestaande woningen nodig hebben.

De verhoging van de temperatuur kan behaald worden door gebruik te maken van de huidige centrale warmtepomp en/of de pekketels. Hieronder is zowel een stooklijn als een jaarbelastingduurkromme getekend. Deze twee zijn afhankelijk van elkaar.

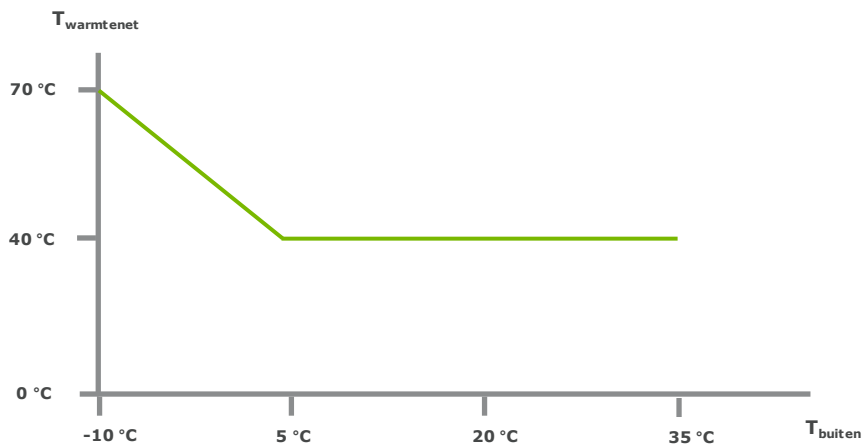
<sup>12</sup> Hier wordt aangenomen dat de pekketels in de nieuwe situatie op jaarbasis nog steeds 30% van de totale warmtevraag zullen leveren.





**Figuur 7-3. Indicatie jaarbelastingduurkromme warmtenet Hengelo**

De kosten voor het distributiedeel vallen relatief laag uit (zie tabel 7-7). Er is een besparing op warmteverlies in de uren dat de temperatuur lager is dan in de huidige situatie, namelijk in de uren dat er met een aanvoer van 40°C. Dit komt door het kleinere temperatuurverschil van de aanvoer- en retourleiding. Verder zijn er enkele aanpassingen nodig in het leidingwerk bij de warmtepomp. Momenteel gaat alle warmte door de warmtepomp, in de nieuwe situatie is er een bypass nodig die de warmte direct in het warmtenet kan laten stromen. Dit betekent een investering in leidingwerk en appendages. De kosten hiervoor liggen in de orde van grootte van €10.000.



**Figuur 7-4. Stooklijn Warmtenet Hengelo achter de WOS**

**Conclusie**

Om de transitie richting een lage temperatuur warmtenet te maken, moet gekeken worden naar de totale kosten en opbrengsten. De volgende (besparings-) kosten zijn gegeven voor de CAPEX en OPEX:

**Tabel 7-7. Kostenoverzicht totaal en per woning**

Kosten overzicht totaal/per woning	Kosten totaal	Per woning
<b>Investering/extra kosten</b>		
Investering warm tapwaterinstallaties	370.000 [€]	3.650 [€]
Investering aanpassingen leidingwerk en appendages	10.000 [€]	98 [€]
Toename energierekening (afnemer)	9.996 [€/jaar]	98 [€/jaar]
<b>Opbrengsten</b>		
Besparingskosten elektriciteit warmtepomp	5.060 [€/jaar]	50 [€/jaar]

Een laatste besparing, die niet direct kwantitatief kan worden gemaakt, is de besparing in warmteverliezen van de distributieleidingen. Waar eerst een temperatuurregime van 70°C - 40°C werd aangehouden, is deze nu op 40°C - 25°C ingeregeld. Door het kleinere temperatuurverschil van de aanvoer- en retourleiding met de omgeving zorgt dit ervoor dat de warmteverliezen in de leidingen met een factor 2 afnemen (ook beschreven in hoofdstuk 6.3).

### Lessons learned

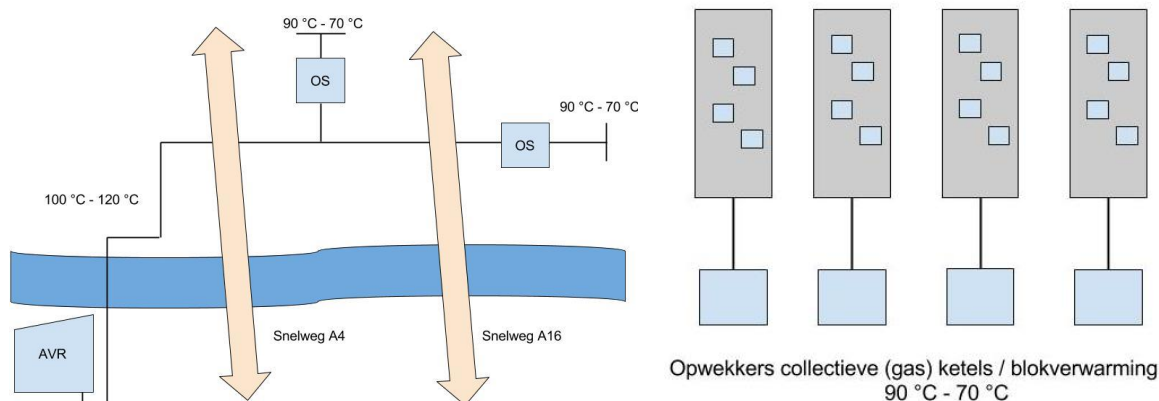
Verschillende lessen zijn te leren op basis van de gemaakte keuzes in het gerealiseerde ontwerp in Hengelo en de hierboven beschreven stapsgewijze aanpak om een deel van het Warmtenet Hengelo naar een lage temperatuur te brengen. De belangrijkste lessen en inzichten uit deze casus:

- Sociaal: op sociaal vlak betekent een aanpassing als in deze casus wordt behandeld dat 70% van de bewoners goedkeuring moet geven. De woningen in de wijk zijn namelijk sociale huurwoningen waarvoor een minimale acceptatiegraad nodig is. Verder speelt de beperkte ruimte in de sociale huurwoningen een rol omdat de ruimte voor een boosterwarmtepomp met buffer gevonden dient te worden in de bestaande situatie.
- Economisch: economisch gezien is het interessant om als warmteleverancier de warm tapwaterinstallaties in eigen beheer te nemen. Hiermee kan de warmte na de boosterwarmtepomp verkocht worden in plaats van voor de warmtepomp, waarmee de vergelijking tussen de boosterwarmtepomp en de warmtepomp (op basis van lucht) in het voordeel van de boosterwarmtepomp komt voor de warmteleverancier. Hiermee kan voor de gebruikers én een lagere warmteprijs en een totale ontzorging geboden worden.
- Duurzaamheid: de energiebelasting op elektriciteit die afnemers gebruiken om een boosterwarmtepomp aan te drijven is een stuk hoger dan de energiebelasting op centrale opwaardering. Hiermee wordt een duurzamer alternatief gedemotiveerd door de werking van de energiebelasting.
- Techniek: het gebruik van boosterwarmtepompen is in opkomst, maar nog onvolwassen. Deze onvolwassenheid is een van de redenen waarom er ten tijde van de ontwikkeling van Warmtenet Hengelo gekozen is om de woningen collectief met 70°C te voeden.

## 7.2 Warmtenet Rotterdam

### Huidige situatie

Rotterdam heeft één van de grootste en oudste warmtenetten van Nederland. In deze casus wordt gebruik gemaakt van de Leiding over Noord, waar de afvalverbrandingsinstallatie in Rozenburg (AVR) de gebouwde omgeving voorziet van warm water. De leiding is ongeveer 17 kilometer lang en gaat vanaf Rozenburg, via Vlaardingen en Schiedam naar Rotterdam.



**Figuur 7-5. Huidige warmtenet Rotterdam, Leiding over Noord (links); Huidige situatie flatgebouwen (rechts)**

De warmte die vrijkomt uit het afvalverbrandingsproces verhit water naar een temperatuur van tussen de 100°C – 120°C. Vanaf hier wordt het gedistribueerd naar verschillende verdeelstations (OS) in de regio Rotterdam. Deze verdeelstations, ook wel onderstations, scheiden het primaire net van het secundaire net door een warmtewisselaar. Wanneer de warmte het verdeelstation bereikt, draagt het de warmte over en verlaagt het de aanvoertemperatuur naar tussen de 70°C – 90°C (afhankelijk van het gebied). De reden voor verlaging is dat op deze manier de gebouwde omgeving direct wordt voorzien van zowel ruimteverwarming als warm tapwater.

Deze casus beschrijft de renovatie van vier hoogbouwflats, elk met 160 appartementen (galerijwoningen), welke eigendom zijn van een woningcorporatie. Momenteel zijn deze gebouwen nog niet aangesloten op het warmtenet maar zijn per flatgebouw aangesloten op blokverwarming<sup>13</sup> (aanvoertemperatuur 90°C – retourtemperatuur 70°C). De galerijwoningen zijn verouderd en toe aan renovatie. De stap om aan te sluiten op het warmtenet heeft als toegevoegde waarde dat het zal zorgen voor een CO<sub>2</sub>-reductie ten opzichte van de huidige situatie. Dit omdat de warmte voor de gebouwen niet langer geleverd wordt door (aard)gasketels. Overige gegevens van de flats staan hieronder:

- Elke woning bevat conventionele radiatoren;

<sup>13</sup> Blokverwarming houdt in dit geval in dat de flatgebouwen voorzien zijn van collectieve warmte, echter is deze warmte niet afkomstig uit het warmtenet maar wordt warm gestookt door middel van een collectieve (gas)ketel.

- De flatgebouwen zijn gebouwd tussen 1960-1970;
- De galerijwoningen hebben gemiddeld energielabel E;
- Elke flat heeft één collectieve (gas)ketel;
- De gemiddelde warmtevraag van de galerijwoning is 40 GJ per jaar voor ruimteverwarming.

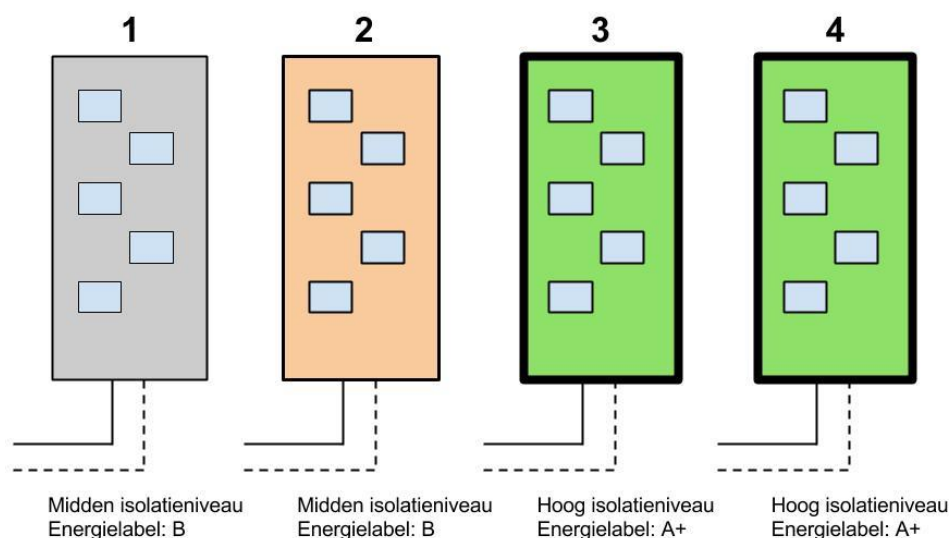
### **Mogelijke aanpassingen voor nieuwe situatie**

#### *Aflevering*

Naast de CO<sub>2</sub>-emissiereductie, zorgt het toevoegen van een midden of hoge isolatieschil ervoor dat de warmtevraag voor de afnemer afneemt. Doordat de woningen op een projectmatige manier en natuurlijk moment worden vervangen zijn de investeringskosten beperkt (Bijlage E Methodologie scoretabel & keuzeschema).

In de huidige plannen wordt overgestapt op een temperatuurregime voor de binneninstallatie van 70°C – 40°C. Dit zorgt voor minder warmteverliezen in de woning.

In figuur 7-6 en tabel 7-8 zijn verschillende opties gegeven, waaronder de huidige optie van de woningcorporatie om de flatgebouwen te verlagen naar een 70°C – 40°C. Deze keuze wordt afgewogen tegen drie opties die naar een LT-warmtenet gaan met een 50°C - 30°C temperatuurregime. Elke optie beschrijft welke mate van isolatie en type warmte-afgiftesysteem nodig is om dit mogelijk te maken.



**Figuur 7-6. Overzicht opties voor de transitie naar een lagere temperatuur van het warmtenet**

**Tabel 7-8. Uitwerking opties voor de transitie naar een lagere temperatuur van het warmtenet**

Opties	T <sub>regime</sub>	Isolatie	Warmte-afgifte systeem	Kosten/woning	Opmerkingen
1	70-40	Midden isolatie	Niks doen	€4.400	Niet mogelijk om de stap naar een LT-warmtenet te maken.
2	50-30	Midden isolatie	Vloerverwarming	€9.600	Vloerverwarming kan een beperkende factor zijn, gezien het om galerijwoningen in hoogbouw gaat waarbij geluiddemping extra aandacht behoef.
3	50-30	Hoog isolatie	LT-radiatoren	€10.950	Op basis van een simulatie <sup>14</sup> , is er hier een kans aanwezig dat enkele momenten per jaar de woning niet binnen twee uur warm te krijgen is op de gewenste temperatuur.
4	50-30	Hoog isolatie	Vloerverwarming	€15.200	Vloerverwarming kan een beperkende factor zijn, gezien het om galerijwoningen in hoogbouw gaat waarbij geluiddemping extra aandacht behoef.

In de kolom 'opmerkingen' is terug te lezen dat vloerverwarming een beperkende factor kan zijn in hoogbouw. Het is een grote ingreep die direct voelbaar is voor afnemers. In tegenstelling tot bijvoorbeeld LT-radiatoren, die in deze situatie makkelijker zijn toe te passen gezien de woningen al radiator aansluitingen bevatten.

<sup>14</sup> Uit de simulatie uitgevoerd door Greenvis blijkt dat deze optie enkele momenten in het jaar niet de gevraagde warmte kan leveren binnen twee uur. Een opmerking hierbij is dat het om een simpele modelsimulatie gaat, een specifieke situatie kan dan andere uitkomsten geven.

Aan de hand van deze gegevens zijn in tabel 7-9 de totale kosten bepaald voor de investering in isolatie en het warmte-afgiftesysteem. Optie 1 heeft de laagste investeringskosten. Echter is deze optie niet te combineren met een LT-warmtenet. Deze optie gaat uit van een 70°C – 40°C warmtenet, gebaseerd op huidige plannen van de woningcorporatie.

**Tabel 7-9. Kostenoverzicht opties isolatie en warmte-afgiftesysteem**

Kosten	Opties [€]			
	1	2	3	4
-				
Isolatie	4.400	4.400	10.000	10.000
Warmte-afgiftesysteem	-	5.200	950	5.200
Kosten per woning	4.400	9.600	10.950	15.200
Aantal woningen	640	640	640	640
Totaal kosten	<b>2.816.000</b>	<b>6.144.000</b>	<b>7.008.000</b>	<b>9.728.000</b>

De overblijvende opties 2 tot en met 4 worden nu met elkaar vergeleken.

Vanwege de keuze voor een aanvoertemperatuur van 50°C, moeten de galerijwoningen worden voorzien van een warm tapwaterinstallatie om aan de legionearichtlijnen te voldoen. De beste optie hiervoor is de boosterwarmtepomp. Luchtwarmtepompen zijn lastig te realiseren in hoogbouw galerijwoningen door het gebrek aan buitenoppervlak (dak, tuin, balkon, etc.). Een elektrische boiler is goedkoop in aanschaf, maar zorgt (door de lagere efficiëntie dan de boosterwarmtepomp) voor een hogere jaarlijkse energierekening voor de afnemer en een hogere CO<sub>2</sub>-emissie<sup>15</sup>.

Als alternatief kan gekozen worden voor een elektrische boiler. Er zijn momenteel gesprekken met de gemeente om zonneboilers voor de hoogbouwflats te realiseren. Dit is alleen interessant in combinatie met een elektrische boiler door de lage investeringskosten van de elektrische boiler (terugverdientijd van ongeveer acht jaar, zie discussie in Bijlage E Methodologie scoretabel & keuzeschema).

Een boosterwarmtepomp kan niet uit met een zonneboiler (een terugverdientijd van boven de 20 jaar), echter heeft dit type warm tapwaterinstallatie een hoger rendement en een betere duurzaamheidsprestatie dan een elektrische boiler. Hieronder zijn de investerings- en jaarlijkse energiekosten voor zowel een boosterwarmtepomp als de elektrische boiler weergegeven.

**Tabel 7-10. Investeringskosten warm tapwaterinstallatie**

CAPEX warm tapwaterinstallatie	Kosten boosterwarmtepomp [€]	Kosten elektrische boiler [€]
--------------------------------	------------------------------	-------------------------------

<sup>15</sup> Een boosterwarmtepomp heeft een gemiddelde COP van 4,8 bij een aanvoertemperatuur van 50°C, een elektrische boiler heeft een rendement van 95%. Beide worden verondersteld individueel uitgevoerd te zijn. Een collectieve oplossing zorgt voor extra leidingwerk voor het warm tapwater. Door individuele installaties kunnen de huidige leidingen gebruikt worden (namelijk die van de lage temperatuur warmte).

Investeringskosten	2.000	700
Overige kosten	1.700	600
Kosten per woning	3.700	1.300
Aantal woningen	640	640
Totaal kosten	2.368.000	832.000

**Tabel 7-11. Jaarlijkse energiekosten (warm tapwater); tapwaterpatroon 150 liter per dag**

Warm tapwater installatie	Huidige situatie [€/jaar]	Nieuw situatie [€/jaar]	Vershil in kosten huidig-nieuw [€]
Boosterwarmtepomp	215	297	82
Elektrische boiler	215	439	224

tabel 7-12 laat de afname van de warmtevraag voor ruimteverwarming zien wanneer een energielabelsprong naar B en A+ wordt gemaakt. Hoewel door het elektriciteitsverbruik de kosten voor warm tapwater toenemen, neemt de totale energierekening af door de besparing in warmtevraag. De huidige warmtevraag van de afnemer, met energielabel E, ligt gemiddeld op 40 GJ op jaarbasis voor ruimteverwarming. Na het investeren in midden isolatie, verlaagt de vraag naar 24 GJ en bij een A+ label naar 14 GJ<sup>16</sup>. Dit in combinatie met de toenemende kosten voor warm tapwater levert alsnog een reductie op van de jaarlijkse energierekening van de afnemer (tabel 7-13).

**Tabel 7-12. Warmtevraag ruimteverwarming per type energielabel**

Energielabel	Energievraag ruimteverwarming [GJ/jaar]	Jaarlijkse kosten ruimteverwarming <sup>17</sup> [€/jaar]
E; huidige situatie	40	860
B; midden isolatie	24	520
A+ hoge isolatie	14	303

<sup>16</sup> Het gaat hier om een gemiddelde galerijwoning. Alle warmtevragen zijn afkomstig uit voorbeeldwoningen 2011 (RVO) en Vesta 2.0 – uitbreidingen en dataverificaties (2013).

<sup>17</sup> Exclusief jaarlijkse vaste kosten en gebaseerd op het maximumtarief voor warmte (inclusief BTW).

Hieronder worden de totale investeringskosten gegeven voor optie 2 tot en met 4.

**Tabel 7-13. Totale investeringskosten optie 2, 3 en 4**

Kosten aflevering	Optie 2		Optie 3		Optie 4	
	Per woning [€]	Totaal [€]	Per woning [€]	Totaal [€]	Per woning [€]	Totaal [€]
Warm tapwater kosten	4.400	2.816.000	10.000	6.400.000	10.000	6.400.000
Isolatie	5.200	3.328.000	950	608.000	5.200	3.328.000
Warmte-afgiftesysteem	3.700	2.368.000	3.700	2.368.000	3.700	2.368.000
Warm tapwaterinstallatie						
<b>Totaal</b>	<b>13.300</b>	<b>8.512.000</b>	<b>14.650</b>	<b>9.376.000</b>	<b>18.900</b>	<b>12.096.000</b>

#### Opwek

De huidige opwekker in deze casus betreft een gasketel die elk flatgebouw collectief van warmte voorziet. Wanneer de flatgebouwen worden aangesloten op het warmtenet, zal er warmte worden geleverd vanuit de AVR. De restwarmte kan worden ingezet waardoor er minder gas verstoekt hoeft te worden. Het primair energieverbruik daalt en dat levert een CO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub>-emissiereductie op. Als de flatgebouwen op een LT-warmtenet worden aangesloten zal het in de toekomst beter mogelijk zijn om andere duurzame warmtebronnen op het warmtenet aan te sluiten. Een LT-net kan daarnaast helpen de kostprijs van deze warmte te beperken. Ter indicatie geldt dat de warmte 15% tot 20% goedkoper<sup>18</sup> is bij een LT-net op 50°C in plaats van een net op 70°C.

Een andere mogelijkheid is het cascaderen (afkoppelen van de warmte van de retourleiding) uit het huidige warmtenet. Het voordeel hiervan is dat aan hetzelfde water tweemaal warmte wordt onttrokken. Echter de gecascadeerde warmte moet te allen tijde hoog genoeg zijn, een mengsysteem op basis van aanvoer- en retourstroom van het huidige warmtenet kan deze beschikbaarheid borgen.

#### Distributie

Het warmtenet in Rotterdam behoort tot een van de grootste netten in Nederland. De structuur van het net is in sterke mate bepaald door het ontstaan en de groei van vier delen:

- De Binnenstad/centrum (Stad) is ontstaan en geleidelijk uitgebreid/verdicht in de periode na de tweede wereldoorlog tot nu. Dit gebied is gekoppeld met het RoCa (Rotterdam Capelle) gebied.
- Het RoCa-gebied (Rotterdam-Capelle) aan de oostzijde van Rotterdam. Dit gebied is aanvankelijk als losstaand net ontstaan omstreeks 1976, in een periode van sterke (woning) nieuwbouwactiviteiten. De koppeling met de Binnenstad is eind twintigste eeuw aangelegd.

<sup>18</sup> Gehanteerde uitgangspunten hierbij zijn grootschalige warmtepompen (>1 MW), bivalent systeem (warmtepomp levert 70%, piekketel 30%), rendementseis 8%, looptijd 15 jaar, elektriciteitsprijs 85 EUR/MWh, gasprijs ~9 EUR/GJ.



De totale lengte van het warmtenet bestaat uit bijna 900 km primaire en secundaire leidingen (exclusief huisaansluitingen) en heeft ruim 43.000 afnemers. Om de flats aan te kunnen sluiten zal er een hydraulische scheiding nodig zijn door middel van een warmtewisselaar in een warmteoverdrachtstation, om de juiste temperatuur af te koppelen uit het bestaande net naar het (nieuw aan te leggen) LT-net. De kosten hiervoor hangen voornamelijk af van de lengte van de leiding en het gevraagde vermogen van de vier flats bij elkaar.

Een voordeel om de stap richting een LT-warmtenet te maken zijn de warmteverliezen in de leidingen. Er is 400 meter aan nieuwe leiding nodig om de aansluiting van de flatgebouwen op het warmtenet te kunnen maken. Ruwweg kan worden gezegd dat de warmteverliezen bij een 70-40 warmtenet 33% lager zijn dan bij een 90-70 net. Voor een LT-net van 50-30 geldt dat de verliezen bijna 60% lager zijn<sup>19</sup>. Het is duidelijk dat warmteverliezen een steeds groter aandeel krijgen bij afnemende warmtevraag door isolatie, waardoor het effect van verlagen van het temperatuurregime steeds groter wordt op de totale warmtevoorziening.

De afstand tussen opwekker en afnemer dient bij LT-warmtenetten niet te groot te zijn omdat de investeringen in het net dan te groot worden. De capaciteit van het net is erg afhankelijk van het temperatuurverschil tussen de aanvoer en retourleiding ( $Q = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta T$ ). De totale warmtevraag van 3.000 kW<sub>th</sub> voor de 640 galerijwoningen samen (incl. gelijktijdigheid) bepaalt de kosten die nodig zijn voor het warmteoverdrachtstation. Deze kengetallen bieden de volgende kostenpost voor de distributie<sup>20</sup>.

**Tabel 7-14. Kosten leidingwerk en warmteoverdrachtstation**

Distributieleiding kosten	Kosten [€]
Kosten leidingwerk	400.000
Warmteoverdrachtstation (incl. warmtewisselaar)	120.000
Totaal kosten distributie	<b>520.000</b>

In vergelijking met de totale kosten voor de aflevering, vallen de distributiekosten stukken lager uit. Dit is 6% van de totale investering voor optie 2, 5,5% voor optie 3 en 4,3% voor optie 4.

### Conclusie

Het is afhankelijk van de partij, welke optie economisch interessant is. Vooral het perspectief tussen de afnemer en (in dit geval) de woningcorporatie. De afnemer zal direct baat hebben bij een renovatie door een lagere jaarlijkse energierekening. Dit betekent voor de woningcorporatie echter een flinke investering. De energieprestatievergoeding (EPV) kan hier verandering in brengen<sup>21</sup>.

<sup>19</sup> Op basis van een enkele DN200 leiding, conform NVN 7125 (EMG).

<sup>20</sup> Gebaseerd op kengetallen vanuit Greenvis en Eneco.

<sup>21</sup> EPV: Energieprestatie vergoeding. Een vergoeding die een woningcorporatie aan de huurders mogen vragen, wanneer de woningen naar nul-op-de-meter of (bijna)energie neutraal worden gerenoveerd.

Daarbij kan gedacht worden aan nieuwe technologieën (zoals uv-straling en membraanfiltratie) en nieuwe legionellawetgeving voor warm tapwater. Deze alternatieve technologieën vragen momenteel nog een grote investering ten opzichte van de conventionele installaties.

Deze casus laat zien dat indien verregaande isolatiemaatregelen worden genomen, realisatie van een LT-warmtenet mogelijk is met beperkte aanpassing van het afgiftesysteem. Een efficiënte warm tapwatervoorziening maakt eveneens gebruik van de lage temperatuur warmte. Het totaal van maatregelen zorgt daarmee dat de bewoners onder de streep een lagere energierekening hebben. Op systeemniveau maakt een dergelijk LT-warmtenet het mogelijk om distributieverliezen te beperken en duurzame bronnen op lage temperatuur (ook de retour van een bestaand HT-warmtenet) aan te sluiten.

### **Lessons learned**

Verschillende lessen zijn te leren op basis van de gemaakte keuzes in de huidige situatie en de hierboven beschreven stapsgewijze aanpak om de flats aan te sluiten op een LT-warmtenet. De belangrijkste uit deze casus:

- **Sociaal:** Er is extra ruimte nodig voor de boosterwarmtepomp (inclusief buffer), dit zorgt ervoor dat er minder leefruimte is voor de bewoner. Dit kan zorgen voor weerstand, gezien galerijwoningen gemiddeld 90 m<sup>2</sup> aan woonoppervlak hebben. Verder moet rekening worden gehouden dat wanneer aanpassingen worden gedaan, 70% van de bewoners goedkeuring moet geven. De woningen in de wijk zijn namelijk sociale huurwoningen waarvoor een minimale acceptatiegraad nodig is.
- **Economisch:** economisch gezien moet de afweging gemaakt worden voor welke optie uiteindelijk de keuze wordt gemaakt. Opties 2, 3 en 4 verschillen veel in kosten. Hierbij is vooral de keuze voor vloerverwarming in de bestaande bouw lastig. Vaak wordt gekozen voor LT-radiatoren omdat deze technisch makkelijker te implementeren zijn. Verder is de afweging voor een lagere investering maar een hogere energierekening of juist een hogere investering en dus een lagere energierekening voor de afnemer interessant.
- **Techniek:** De techniek laat zien dat de stap richting een LT-warmtenet verschillende voordelen biedt, zoals minder warmteverliezen in de leidingen en woning. Bovendien verhoogt het de kans op toepassing van andere bronnen op lagere temperatuur. Het gebruik van boosterwarmtepompen voor warm tapwater is in opkomst. Hierbij geldt dat plaatsing van zonneboilers in combinatie met een boosterwarmtepomp economisch niet haalbaar is.

## 8. Conclusies en aanbevelingen

De ontwikkeling van lage temperatuur warmtenetten is een van de oplossingen om te komen tot een (bijna) energie neutrale gebouwde omgeving. Om steeds scherper geformuleerde duurzaamheidsdoelstellingen te behalen is de incorporatie van duurzame warmtebronnen een randvoorwaarde. Parallel aan de verduurzaming van bronnen is er een toenemende nadruk op energie efficiëntie in de gebouwde omgeving. Beide huidige trends leiden tot een groeiende aandacht voor het gebruik van lage temperatuur warmte in stadsverwarming. Lokale omstandigheden bepalen welke warmteoplossing technisch en economisch het beste past. Duurzame warmte via lage temperatuur warmtenetten is niet de enige verduurzamingsoptie. Ook met hoge temperatuurnetten, elektrische apparaten of biogas is het mogelijk om energie neutraal te verwarmen. Afhankelijk van de beschikbaarheid van lokale bronnen, bestaande lokale infrastructuur en het type gebruikers past de ene optie beter dan de andere.

Op basis van de context zoals geschetst hierboven kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

1. **De transitie van hoge naar lage temperatuur warmtenetten loopt via meerdere routes.** Met name in bestaande warmtenetten moet rekening worden gehouden met de gehele keten van opwek tot aflevering. In praktijk betekent dit dat binnen warmtenetten mengvormen zullen ontstaan van hoge en lage temperatuur afnemers, distributie op verschillende temperaturen binnen een netwerk en variabele aanvoertemperaturen in het warmtenet over het jaar heen.
2. **Het implementeren van de warmtetransitie naar lage temperatuur begint bij de afnemers, pas daarna volgen netwerk en bron. De transitie hoeft niet in een keer, maar kan geleidelijk of gefaseerd verlopen.** Zowel warmtebronnen als het –netwerk zijn redelijk flexibel ten aanzien van de bedrijfstemperatuur. De bottleneck in de transitie naar lage temperatuur warmte zit aan de kant van de afnemers. Het garanderen van voldoende warmte voor verwarming en veilig tapwater, maakt dat eerst hier maatregelen moeten worden getroffen. De transitie zelf kan geleidelijk plaatsvinden, waarbij afnemers gefaseerd geschikt worden gemaakt voor lage temperatuur warmte. Dit kan zowel groepsgewijs, per wijk, als voor individuele woningen verlopen.
3. **Lage temperatuur netten zijn technisch mogelijk, maar vaak organisatorisch en financieel uitdagend, met name in bestaande bouw.** Alle technische stappen in de opwek, distributie en aflevering zijn gangbaar en worden in de praktijk toegepast. Met name in nieuwbouw situaties met goed geïsoleerde woningen is internationaal veel ervaring met de aanleg van lage temperatuur netten en bronnetten. Een uitdaging is om warmte van deze temperatuur te gebruiken in de bestaande bouw. Bij de afnemers moeten maatregelen worden getroffen om op lage temperatuur te worden aangesloten.

Deze maatregelen vragen verregaande na-isolatie (naar label A+) en vaak aanpassing van het verwarmingssysteem in de woning. De kosten voor deze aanpassingen hangen af van de bestaande woningsituatie en het type woning. Voor appartementen en tussenwoningen bedragen de investeringen tussen de 5000 en 19000 euro (tabel 4-2). Vanuit organisatie- en kosten-perspectief is het wenselijk de maatregelen collectief te nemen.

4. **Sociale acceptatie is een specifiek aandachtspunt voor LT warmtenetten vanwege de benodigde maatregelen in bestaande woningen.** Het verlagen van de temperatuur van een warmtenet heeft impact op het hele systeem, inclusief de woning. Een belangrijke succesfactor voor het slagen van de transitie is sociale acceptatie van de oplossing en een draagvlak onder de bewoners. Vanwege de sterke verwevenheid tussen aanpassingen in het netwerk en de huisgebonden maatregelen is dit voor lage temperatuur warmtenetten nog belangrijker dan voor hoge temperatuur netten.
5. **Het gebruik van LT-warmte in bestaande bouw vraagt verregaande projectmatige woning isolatie en aanpassing van het afgiftesysteem.** Lage temperatuur systemen hebben een lagere warmte-afgifte capaciteit dan hoge temperatuur systemen. De voornaamste barrière bij de transitie van een hoge naar een lage temperatuurssysteem is de warmtevraag in een woning. Isolatie moet deze warmtevraag terugbrengen, voordat met lage temperatuur kan worden verwarmd. Voor de meeste woningen betekent dit een isolatie naar label A+. Dit is verregaande na-isolatie met aanzienlijke kosten, zeker als de isolatiemaatregel op niet op grootschalige- en projectmatige basis wordt uitgevoerd.
6. **De toepasbaarheid van LT-warmtenetten is complementair aan *all electric* oplossingen.** Woningen met verregaande isolatie kunnen ook effectief worden verwarmd met huisgebonden elektrische warmtepompen. De keuze voor de ene dan wel andere oplossing zal sterk afhangen van de kosten en toepasbaarheid in de woning en de lokale realiseerbaarheid van een warmtenet. Naar verwachting zijn warmtepompen beter technisch en economisch toepasbaar bij grondgebonden woningen en een warmtenet aansluiting bij gestapelde bouw.
7. **Legionella wetgeving hindert de levering van warm tapwater via LT-netten.** Deling van de legionellabacterie wordt voorkomen bij hogere watertemperaturen. Om deze reden is het in Nederland wettelijk niet toegestaan om warm tapwater te leveren onder 55°C - 60°C. Afnemers van lage temperatuurwarmte hebben huisgebonden naverwarming, zoals een elektrische boiler, nodig om in hun warm tapwater te voorzien. In omliggende landen zijn voorbeelden van soepeler Legionella wetgeving. Aanvullend onderzoek naar technologieën voor legionella bestrijding of internationale synchronisatie van wetgeving kan leiden tot verlaging van de minimum temperatuurseis.

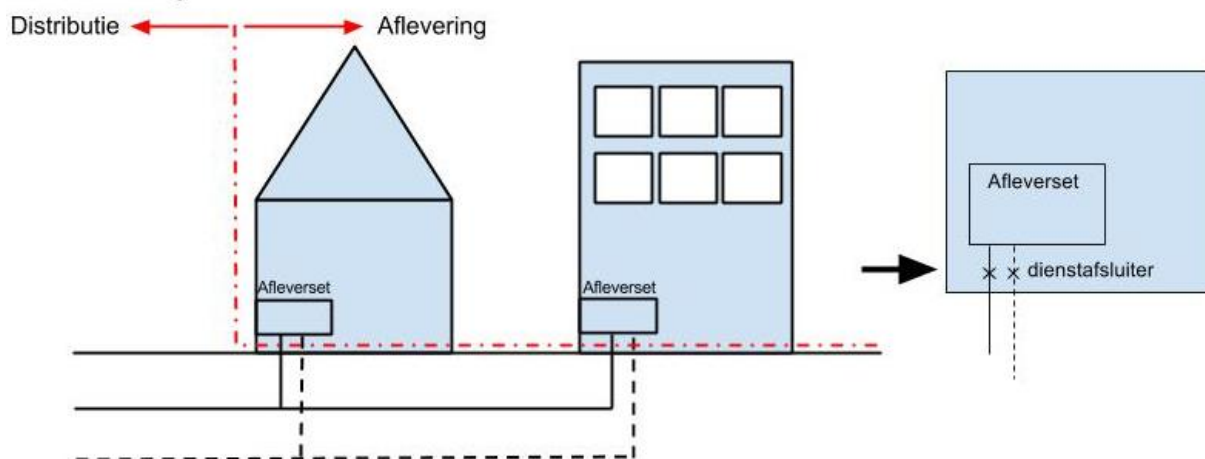
8. **De huidige vorm van energiebelasting heffen is een negatieve stimulans voor het decentraal opwaarderen van lage temperatuur warmte.** Met lokaal (per woning) opwaarderen van warmte voor warm tapwater dient de hoogste energiebelastingsschijf voor elektriciteit bij elke woning betaald te worden terwijl voor centraal opwaarderen gebruik gemaakt kan worden van lagere schijven. Zoals in de casus Warmtenet Hengelo zichtbaar is valt de keuze dan sneller op centraler opwaarderen waardoor een deel van de lage temperatuur warmte niet direct ingezet kan worden voor ruimteverwarming.
9. **Aanbeveling: De ontwikkeling van een helder afwegingskader en stappenplan voor de keuze tussen HT en LT warmtenetten en all electric toepassingen, bevordert de keuze voor toekomstvaste en maatschappelijk optimale warmteoplossingen.** Een maatschappelijke kosten-baten analyse waarin de inzet van warmtenetten wordt vergeleken met all electric toepassingen maakt inzichtelijk wanneer welke warmteoplossing moet worden ingezet. Een dergelijke analyse moet inzicht geven in de lokale bepalende factoren rondom deze keuze en de kansen, voordelen en nadelen op economisch en technisch vlak. De behoefte aan een afwegingskader is met name relevant voor besluitvorming bij het verlaten van aardgasaansluitingen of bij grootschalige renovatie. Het afwegingskader moet richting geven niet alleen op technisch vlak, maar ook economisch en sociaal.
10. **Aanbeveling: Door stimulering van innovaties kunnen bestaande barrières worden weggenomen en randvoorwaarden worden verruimd.** Verschillende barrières en randvoorwaarden zijn technisch en economisch van aard. Zo kunnen door slimmigheden de kosten voor renovatie worden verlaagd met inventieve technieken of kunnen alternatieve technieken voor legionellapreventie de aantrekkelijkheid van lage temperatuur warmtenetten verhogen. Een lage temperatuur warmte aansluiting zou als keuzeoptie ingepast kunnen worden in nul-op-de-meter renovatieconcepten, naast de reeds bestaande all-electric concepten.
11. **Aanbeveling: Het meenemen van de optie LT in het Vesta model.** Het MAIS model rekent verschillende warmte opties door, zoals een groot warmtenet met geothermie, Nul-op-de-meter en een hybride warmtepomp scenario, gebaseerd op de kengetallen van het Vesta model. Het is interessant om in dit model de optie LT-warmtenet toe te voegen als rekenvoorbeeld.

## Bijlage A Definitie onderdelen warmtenet

### A.1 Aflevering (B)

Aflevering is het deel van het systeem waar de warmte vanuit het primaire of secundaire distributieleiding wordt overgedragen aan een afgiftesysteem. Afnemers kunnen zakelijke afnemers zijn, woningen met een collectieve of individuele aansluiting of wijkstations in geval van collectieve warm tapwatersystemen. De aflevering bestaat uit afgiftesystemen die de warmte uit het distributienet omzetten naar een nutsfunctie (bijvoorbeeld het verwarmen van de woning en de voorziening van warm tapwater) en eventueel een buffering bij de afnemer. De scheidslijn van distributie naar aflevering bevindt zich bij de dienstafsluiters<sup>22</sup> (één set van afsluiters – aanvoer en retour– die de fysieke scheiding vormt tussen de aansluitleiding en de aansluiting) (zie Figuur A-0-1).

#### B: Aflevering



**Figuur A-0-1. Schematische weergave aflevering**

<sup>22</sup> Er zijn verschillende andere varianten van definities mogelijk om de scheiding tussen distributie en aflevering aan te geven. De keuze van een andere (juridisch juiste) definitie heeft echter geen gevolgen voor de inhoud van deze verkenning.

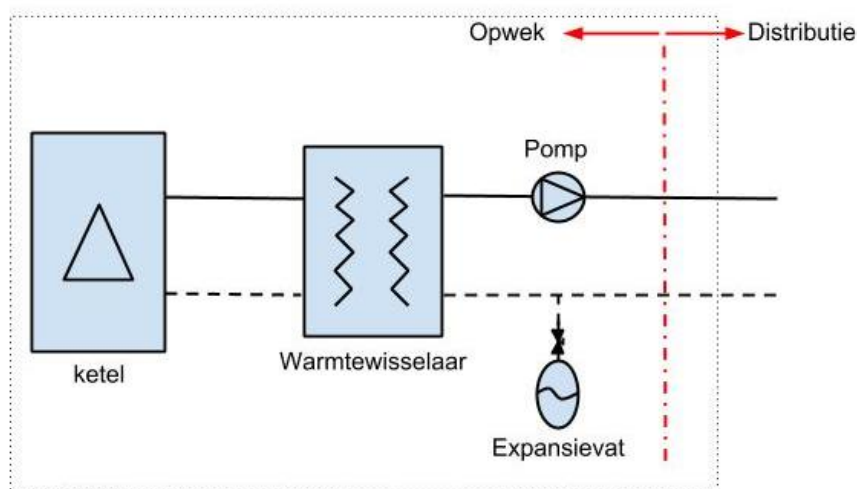
## A.2 Opwek (A)

Een opwekinstallatie levert warmte die via het leidingnet wordt getransporteerd naar de afnemers. Tot een opwekinstallatie behoren alle onderdelen die thermische energie toevoegen aan het hydraulische circuit en installaties die de stroming in het net mogelijk maken. Hiertoe behoren bijvoorbeeld:

- Biomassaketels;
- Restwarmte-uitkoppeling;
- Warmtepompen;
- Gasketels (voor piek- en back-upcapaciteit) en
- Buffering bij de opwek.

Wat betreft de installaties gaat het om pompen, expansie- en waterbehandelingssystemen. De fysieke grens tussen opwek en distributie ligt bij de flenzen van de opwekinstallatie (waar de leidingen vanuit het gebouw de grond ingaan). Het expansieventiel, pomp, waterbehandelingssystemen en overige hulpsystemen zijn onderdeel van de opwek (zie Figuur A-0-2).

### A: Opwek



**Figuur A-0-2. Schematische weergave opwek**

### **A.3 Distributie**

Het deel distributie in een warmtenet is een samenstel van aanvoer- en retourleidingen, warmteoverdrachtsstations en de regeling hiervan. Met als functie de warmte afkomstig uit de opwek te transporteren richting de afleverzijde van het warmtenet. Een distributienet kan bestaan uit een primair hoofdtransportnet (hogere druk en temperatuur) en secundaire transportnetten (lagere druk en temperatuur: distributie in een gebouw of een wijk). Een secundair net kan hydraulisch gescheiden zijn van een primair netwerk door een warmtewisselaar. Installaties die, naast het leidingwerk, onderdeel kunnen uitmaken van een distributienet zijn pompen (de pompen die niet bij de opwekkers zijn opgesteld) en warmteoverdrachtstations.



## Bijlage B Tabellen bepalende factoren

**Tabel B-0-1. Bepalende factoren aflevering**

Aflevering - RV		Impact omgeving				Totale warmtevraag (warmtenet)			
Mate van ingreep.	Capex	Ruimtegebruik	Uitvoerbaarheid	Sociale impact	Toename of afname van de warmtevraag van het warmtenet door het inpassen	Piekvraag	Geschikt voor 40°C		
	<i>Mate van ingreep.</i>	<i>Initiële kosten voor optie.</i>	<i>De hoeveelheid ruimtegebruik in de woning.</i>	<i>Aspecten die komen kijken bij de uitvoerbaarheid van de optie.</i>	<i>De impact -in de breedste zin- van de optie op de afnemer van warmte.</i>	<i>Toename of afname van de warmtevraag van het warmtenet door het inpassen</i>	<i>Kan de optie piekmomenten van warmtevraag aan. Of zorgt het voor</i>	<i>Kan de optie naast de werking op 55 °C ook aangesloten zijn op een aanvoer van</i>	
Afgiftesysteem	Radiator ventilatoren	175-220 €/meter (incl. BTW) - Climate booster [23]. Manuren tarief: €39,00.	Neemt geen extra ruimte in beslag [22].	Mogelijkheid om zelf te bevestigen of door monteur (zal niet langer dan een dag in beslag nemen).	Klein. Weinig geluid (<25 dBA).	n.v.t.	Zorgen zelf niet direct voor verlaging van de piekvraag.	Het is mogelijk, echter afhankelijk van: - Wat voor radiatoren zijn aanwezig. - Wat is je huidige temperatuur regime. - Wat is de isolatie sterkte van de woning.	
	LT-radiatoren	[29] tabel 43: - Tussenwoning (1940-2000): €1.236 - €1.620; - Appartement (1960-2000): €829 - €910; - Vrijstaand (1940-2000): €1.847 - €2.444.	Bij het vervangen van een radiator op HT naar LT is vaak een verdubbeling in breedte nodig [22].	Afhankelijk van de situatie. LT radiatoren/convectoren kunnen extra ruimte in beslag nemen. Per radiator ongeveer 2,5 uur	Aanpassingen kunnen binnen een dag zijn gedaan (max twee dagen).	n.v.t.	Kleine impact op verlaging van de piekvraag.	LT radiatoren zijn geschikt voor een temperatuur tussen de 25 °C en 55 °C graden (afhankelijk van soort radiator/convectoren).	
	Vloerverwarming	[29] tabel 42 - vloerverwarming - Tussenwoning (1940-2000): €6.266 - €8.211; - Appartement (1960-2000): €4.957 - €5.977; - Vrijstaande woning (1960-2000): €10.372 - €12.389.  (Wand: 70 €/m2 (excl. installatie). Plafond: 40-50 €/m2 (excl.	Vloer: varieert van 0-9 cm Wand: Varieert tussen de 0 en 30 mm. Plafond: niet bekend.	Er is een grote ingreep nodig voor toepassen van deze maatregelen. Radiatoren zullen worden verwijderd.	Grote ingreep waarbij bewoners hun huis tijdelijk uit moeten. Boren in de muur is (bijna) niet meer mogelijk. Meer ruimte door weghalen radiatoren.	n.v.t.	Warmtevraag wordt gelijkmatiger. Minder snel afkoelen van binnenklimaat. Zorgt voor lagere piekvraag.	Geschikt.	
Isolatie	Midden; Label B	Dak (plat): 190 €/m2. Dak (hellend): 50 €/m2. Vloer: 20 €/m2. Glas: dubbel > HR++ = 150 €/m2. Spouwmuur: 20 €/m2 [24].	n.v.t.	Goed uitvoerbaar, m.u.v. monumentale panden.	Vrij grote ingreep nodig om de dak en vloer van isolatie te voorzien. Beglazing en spouwmuren zijn relatief eenvoudige	Positieve impact op verlaging warmtevraag.	Verbeteringen in isolatie zorgen voor een verlaging van de warmtevraag. Wat leidt tot een lagere piekvraag [21].	n.v.t.	
	Hoog; Label A+	Tussenwoning (1940-2000): €7.904 - €9.292; Appartement (1940-2000): €5.220 - €5.795; Vrijstaande woning (1940-2000): €16.629 - €18.283; Ventilatie: €1.905 [29]. (bestaande uit: dakisolatie (100 mm), gevelisolatie (100 mm) en	n.v.t.	Aanpak per blok/rij gewenst, veel partijen bij betrokken. Kierdichting/infiltratie speelt hier een rol in.	Aanzienlijke verbouwing waar de bewoner overlast van heeft.	Positieve impact op verlaging warmtevraag (grootst).	Verbeteringen in isolatie zorgen voor een verlaging van de warmtevraag. Wat leidt tot een lagere piekvraag [21].	n.v.t.	

**Tabel B-0-2 - Bepalende factoren aflevering warm tapwater**

Aflevering - WW	CAPEX	Impact omgeving	Totale warmtevraag (warmtenet)	OPEX	CO2 uitstoot	Risico's	
	<i>Mogelijke toepassingen.</i>	<i>Initiële kosten voor optie.</i>	<i>Onderverdeeld in Ruimtegebruik, uitvoerbaarheid en sociale impact.</i>	<i>Toename of afname van de warmtevraag van het warmtenet door het inpassen van de optie.</i>	<i>Onderhouds- en maintenance kosten plus energiekosten (1 GJ = 277,78 kWh).</i>	<i>CO2 uitstoot in kg/G.</i>	<i>Kans op risico's plus de mogelijke gevolgen.</i>
<b>Interactie warmtenet</b>	<i>Booster warmtepomp</i>	2 kW W/W WP tapwater = €2865 (incl. materialen). Exclusief materiaal = €1980 (150 liter vat).	Geluidsproductie, vrij makkelijk te installeren (aangesloten op het warmtenet). Extra ruimte nodig voor het voorraadvat. Afmetingen = 595 x 372 x 352 (mm)	Dit systeem zit aan het warmtenet verbonden wat niet direct leidt tot een lagere warmtevraag.	Relatief laag door de hoge COP waarde (rond de 3,5-5).	130 kg CO2/GJ [7]. Bespaard CO2 ten opzichte van WP+boiler. COP 3,5-5 > 26-37 kg CO2/GJ.	Niet bekend
	<i>Elektrische boiler</i>	Elektrische accumulatieboiler (200 L) ligt rond de €800 (excl. BTW, niet geplaatst) [29].	Hoog elektrisch verbruik voor afnemer (Δt van 50K rond de 580 C/jaar). Elektriciteitsnet is altijd aanwezig + makkelijk te installeren. Diameter = 600; Hoogte = 1250 (mm) bij 190 L vat [19].	Werkt op elektriciteit. Door het elektrisch verhitten van het water neemt de totale warmtevraag van het warmtenet af.	Elektrisch rendement van 95% wat zorgt voor hoog elektra verbruik bij verwarmen water.	130 kg CO2/GJelec [7]. Rendement = 95% 136,8 kg CO2/GJth.	Niet bekend
<b>Onafhankelijk warmtenet</b>	<i>Warmtepomp boiler (op basis van lucht)</i>	€1710 excl. BTW [19]; Installatie kosten: €300 - €400 (150 liter).	Geluidsproductie. Gemiddeld verbruik rond de 180 C/jaar. Installatie vaak op zolder, extra leidingen nodig voor aansluiting + extra kosten voor close-in boiler. Diameter = 600; hoogte = 1600 mm (bij 200 L vat)	De warmtevraag zal afnemen (WP gebruikt elektriciteit (COP), efficiënt omgaan met warmte.	Afhankelijk van de COP waarde. Deze ligt rond de 2,2.	130 kg CO2/GJ [7]. COP 2,2 > 60 kg CO2/GJ.	Niet bekend

**Tabel B-0-3. Bepalende factoren opwek (deel 1)**

Opwekking	Temperatuur	Potentieel (grootte)	CAPEX	OPEX
	Temperatuurregime waarbinnen de opwekker optimaal werkt.	Potentieel van de opwekker in de toekomst.	Initiële investering opwek (distributie is niet meegenomen) in €/kW(thermisch).	Onderhouds- en maintenance kosten plus energiekosten (1 GJ = 277,78 kWh). De kosten zijn in €/GJ.
<b>Ondiepe geothermie (500-1.500 meter)</b>	Temperatuur afhankelijk van diepte. Bij een diepte tussen de 500 - 1.500 m varieert de temperatuur tussen 25 °C - 55 °C [1].	Groot potentieel en gebiedsafhangelijk [1].	Vanaf 1.500 €/kWth [2,3,4].	O&M kosten [2]: - vast: 0,22 €/GJth_output (12 MWth_output); - variabel: 2,2 €/GJ_output. Energiekosten: COP 15.
<b>Zonnewarmte (zonthermie)</b>	Het optimale rendement ligt rond de 55 °C. de techniek kan hogere temperaturen leveren, echter zijn dit andere type systemen. Lager is ook eenvoudig mogelijk.	Potentieel hoog in zomer, potentieel laag in winter. Aandeel zonnewarmte in 2012 was 1,1 PJ per jaar en stijgt naar verwachting tot 1,3 PJ per jaar in 2020 [8].	600 €/kWth (420 €/m2 voor meer dan 200 m2 oppervlak) [2].	O&M kosten [2]: - vast: 1,9 €/kWth_output (0,14 MW installatie); - vast+variabel = 0,2% van investeringskosten (voor 1MW). Pompenergie [2] = 1 MWh/jaar (200m2 opp) = 3,6 GJ/jaar COP 36 [14].
<b>Biomassa</b>	Levering op alle mogelijke temperaturen.	In 2006 leverde biomassa die in Nederland gebruikt werd een primaire energieproductie van 82 PJ. Beschikbaarheid van biomassa ligt tussen de 184 en 214 PJ (2020). Doel: 200 PJ in 2020 uit binnenlandse biomassa [9].	460 €/kWth [2] (warmte - houtpellets > 5MWth). 167 €/kW bij alleen uitkoppeling van restwarmte vanuit biomassa-centrale [31].	O&M-kosten [2]: - vast: 27,6 €/kWth_output (5MWth houtpellet); - brandstofprijssplag = 15 €/ton; - variabel: 9 - 17 €/ton = 5,4 - 9,4 €/GJ (afhankelijk van keuze) > houtpellets: 9,4 €/GJ.
<b>Gas</b>	Levering op alle mogelijke temperaturen. Lage temperaturen zijn interessant doordat je dan een hogere verbrandingswaarde hebt.	Technisch: veel gas voor komende decennia en de aanwezigheid van een nationaal gasnetwerk. Milieukundig: energiebesparing plus toename van duurzame bronnen zullen naar alle waarschijnlijkheid de inzet van gas verminderen [10].	60-100 €/kWth (inclusief leiding, installatie, etc.) > 1 MW. Aansluitkosten (0,5 MW ongeveer €20.000).	O&M-kosten: - 1.400 €/jaar (periodieke onderhoud + periodieke inspectie) 9,364 €/GJ (10 tot 100 TJ, niet huishouden, excl. BTW en incl. belasting) [15].
<b>Warmtepompen</b>	Levering op alle mogelijke temperaturen. Hoe lager de delta T des te efficiënter de warmtepomp functioneert (met voorverwarming is <60°C efficiënt). Hogere temperaturen geven ook hogere kosten.	Groot potentieel, het ondersteund LT-netten. Verwachting dat investeringskosten omlaag gaan en dat de technologie efficiënter wordt [18].	300 - 400 €/kWth (bij een 1 MWth installatie, incl. aansluitkosten).	0,085 €/kWth = 23,61 €/GJ_elec (500 tot 2.000 MWh, niet-huishouden, excl. BTW en incl. belasting) [15]. Variabele kosten: COP 4 á 7 > 5,9 á 3,8 €/GJth Vaste kosten: Onderhoudskosten = 5 €/draaiuur/MW compressor (COP 4 geeft 1,25 €/draaiuur/ MWth).
<b>Grootschalig - Industriële restwarmte</b>	Afhankelijk van soort bron. Kan zowel lage temperatuur als hoge temperatuur uitkoppelen.	Gebiedsafhangelijk: bij aanwezigheid van industrie, bedrijventerreinen, etc. zal de potentie hoger liggen.	Kosten uitkoppeling totaal (incl. aanpassingen bestaande installatie) 250 €/kWth voor industriële restwarmte (excl. warmtedistributie).  Hoe lager de uitkoppelingstemperatuur hoe lager de kosten per GJ zijn.	OPEX is afhankelijk van de aanvoertemperatuur en contractafspraken. - MAIS-model geeft vaste prijs 0,27 €/GJth (kostprijs) en variabele kosten 7,45 €/GJth (operationele kosten) (bij 5.000 aangesloten woningen) [31].
<b>Grootschalig - Restwarmte elektriciteitscentrale</b>	Afhankelijk van soort bron. Kan zowel lage temperatuur als hoge temperatuur uitkoppelen. Des de hoger de temperatuur bij het uitkoppelen, des te meer elektriciteitsderving [27].	Gebiedsafhangelijk: bij aanwezigheid van industrie zal de potentie hoger liggen.	Uitkoppelen bij bron kost 167 €/kWth [29].  Kosten warmtewisselaar = 60 €/kWth (bij een overdrachtsverlies over de warmtewisselaar van één graad Kelvin, hoe hoger het overdrachtsverlies hoe lager de kosten).	OPEX is afhankelijk van de aanvoertemperatuur en contractafspraken. - MAI-model geeft 4,13 €/GJ als kostprijs voor een STEG en 10,67 €/GJ als operationele kosten (bij 5.000 aangesloten woningen) [31].
<b>Kleinschalig restwarmte</b>	Afhankelijk van soort bron. (vb. melkpoederfabriek die zwembad en school warmte levert) [28].	Gebiedsafhangelijk: bij aanwezigheid van industrie, bedrijventerreinen, etc. zal de potentie hoger liggen.	Kosten warmtewisselaar = 60 €/kWth (bij een overdrachtsverlies over de warmtewisselaar van één graad Kelvin, hoe hoger het overdrachtsverlies hoe lager de kosten). Hoe lager de uitkoppelingstemperatuur hoe lager de kosten per GJ zijn.	OPEX is laag en afhankelijk van de aanvoertemperatuur en contractafspraken. - MAIS-model geeft voor kleine wijk (750 aansluitingen met biomassa-centrale) kostprijs van 3,06 €/GJ en 11,16 €/GJ als operationele kosten [31].
<b>Power-to-Heat (elektrisch bijverwarmen)</b>	Levering op alle mogelijke temperaturen, deels afhankelijk van installatiekeuze.	Veel potentie bij lage elektriciteitsprijs en groei van duurzame elektriciteitsvoorzieningen (wind/zon). Zowel regionaal/decentraal als lokaal interessant.	Nominale investeringskosten [16]: - 60-90 €/kWth (10MWth boiler, excl. costs connecting to grid); - 50-70 €/kWth (20MWth boiler); - Kosten versterken lokaal grid en transformatiestation ligt rond de 130 €/kWth.	Weinig onderhoud nodig. Inzetten bij negatieve elektriciteitsprijzen. Overschot aan duurzame energie.
<b>Warmtebuffer</b>	Levering op alle mogelijke temperaturen. De exacte temperatuur is afhankelijk van de bouw van het systeem (vb. de warmtebuffer Diemen (22.000 m3) heeft een temperatuur opslag van 125	Potentieel is oneindig. Bovengrondse buffercapaciteiten variëren van 100 m3 tot 50.000 m3 [11].	Tankopslag: 700 - 2.500 €/kWth [12]. Wanneer energie op atmosferische druk wordt opgeslagen is de investering lager dan bij gekozen druk.	Hangt af van warmteverlies (mits isolatie voldoende is, liggen de verliezen en dus OPEX laag).

**Tabel B-0-4. Bepalende factoren opwek (deel 2)**

Opwekking	Risico's	CO <sub>2</sub> -uitstoot	Piekvraag	Schaalgrootte
	<i>Kans op risico's plus de mogelijke gevolgen.</i>	<i>CO<sub>2</sub> uitstoot in kg/GJth (CO<sub>2</sub> emissies bij gebruik fossiele pompenergie - elektriciteit).</i>	<i>Mogelijkheid opwekker om warmte te leveren tijdens piekuren.</i>	Aantal aansluitingen (Weq).
<b>Ondiepe geothermie (500-1.500 meter)</b>	Mogelijkheid op mislukte boring (garantieregeling tegen risico van misboring) [5]. Oppompen van olie en/of gas [3].	12 kg CO <sub>2</sub> /GJth [6].	Geldt als basislast. Warmteprijs daalt bij hogere uitnutting. Bij voorkeur zoveel mogelijk vollasturen produceren. Kan piekvraag leveren, echter niet economisch interessant.	1 dublet per ca. 1.000 woningen (LT-geothermie, 1.000 meter diepte) [27].
<b>Zonnewarmte (zonthermie)</b>	Geen tot weinig kans op risico's.	0,468 kg CO <sub>2</sub> /kWh = 130 kg CO <sub>2</sub> /G <sub>elec</sub> [7]. COP 36 > 3,6 kg CO <sub>2</sub> /GJth.	Zonthermie biedt niet de mogelijkheid om tijdens piekvraag warmte te voorzien. Puur voor basislast.	Grootte van de opwekker is afhankelijk van capaciteit bij de afnemers en buffercapaciteit, rond de 100 aansluitingen.
<b>Biomassa</b>	Leveringszekerheid van biomassa na contractperiode.	Biomassaketel = 8,3 kg CO <sub>2</sub> /GJth [6]. Biomassa WKK = 3,8 kg CO <sub>2</sub> /GJth [6].	Bio-olie is geschikt voor leveren van piekvraag (lage kosten), chips zijn niet interessant op basis van de relatief hoge prijs.	Goed schaalbaar via verschillende technieken: van individueel - collectief (Purmerend is hier een voorbeeld van).
<b>Gas</b>	Veiligheidsrisico's. Schommelingen in de gasprijs.	STEG = 23 kg CO <sub>2</sub> /GJth [6]. WKK gasmotor = 28 kg CO <sub>2</sub> /GJth [6]. WKK industrie = 23 kg CO <sub>2</sub> /GJth [6]. 56,4 kg CO <sub>2</sub> /GJth [13].	Kan leveren tijdens piekvraag.	Alle groottes: individueel - collectief.
<b>Warmtepompen</b>	Risico op koudemiddel uitfasering. Niet flexibel in temperatuur veranderingen.	0,468 kg CO <sub>2</sub> /kWh = 130 kg CO <sub>2</sub> /G <sub>elec</sub> . COP 3 á 4 > 43,3 á 32,5 kg CO <sub>2</sub> /GJth [7]. Vrij hoge emissiewaarden, tenzij duurzame elektriciteit wordt gebruikt.	Niet ideaal voor het leveren van piekvraag (hoge CAPEX/OPEX).	Alle groottes: individueel - collectief.
<b>Grootschalig - Industriële restwarmte</b>	De warmtebron dient zowel op korte (dag en uurbasis) als op lange termijn (geen plannen voor stopzetting/verhuizing) een betrouwbare leverancier te zijn [26].  Afhankelijk van continuïteit primaire proces restwarmte leverancier.	Industriële restwarmte = 0,0 kg CO <sub>2</sub> /GJth [6], gerekend met volledige afvalwarmte.	Warmte in een industrieel proces is een secundair proces en kan niet flexibel inspelen in piekvraag.	Restwarmte voor individuele woningen is erg duur. Restwarmte wordt dan ook alleen ingezet bij collectieve systemen. De inzet is toepasbaar vanaf een schaalgrootte van +/- 1.000 woningen [26]. - 6,0 MWth als ondergrens voor uitkoppeling [29].
<b>Grootschalig - Restwarmte elektriciteitscentrale</b>	De warmtebron dient zowel op korte (dag en uurbasis) als op lange termijn (geen plannen voor stopzetting/verhuizing) een betrouwbare leverancier te zijn [26].	AVI= 7,0 kg CO <sub>2</sub> /GJth [6].	Kan leveren tijdens piekvraag (echter tot bepaalde mate, anders inzet nodig van piek/back-up ketels).	Ligt aan de grootte van de opwekker. - AVI vraagt minimaal 3,0 MWth als ondergrens - STEG zit op 10 MWth als ondergrens [29]. Grote elektriciteitscentrales bieden grote hoeveelheid restwarmte, hoe meer restwarmte uitgekoppeld uit dezelfde centrale hoe voordeliger.
<b>Kleinschalig restwarmte</b>	Afhankelijk van continuïteit primaire proces restwarmte leverancier.  Een belemmering kan de workload zijn rondom contractvorming en organisatie.	Het gaat om overtollig restwarmte. Zal vrijwel geen CO <sub>2</sub> -uitstoot zijn. Mits er een continuïteit aan energie nodig is voor het uitkoppelen van de warmte.	Kan niet flexibel inspelen op piekvraag. Voorbeeld van melkpoederfabriek: hier wordt warmtebuffer gebruikt om het piekvermogen van 780 kW te leveren.	Afhankelijk van het warmte-/electriciteitsnet. - ondergrens ligt op 0,5 MWth [29].
<b>Power-to-Heat</b>	De elektriciteitsprijs moet een substantieel aantal uren per jaar laag zijn. Hoe meer P2H er is, hoe minder de verdien capaciteit.	0,468 kg CO <sub>2</sub> /kWh = 130 kg CO <sub>2</sub> /GJ [7]. Tenzij duurzame energie wordt gebruikt.	Tijdens piekvraag kan het elektrisch verwarmde water worden gebruikt.	Interessant op grote schaal voor wanneer de elektriciteitsprijs laag ligt. Schaalgrootte vanaf 1.000 woningen. Kleine schaal zijn er betere technologieën voor elektrisch verwarmen.
<b>Warmtebuffer</b>	Beperkt.	0,468 kg CO <sub>2</sub> /kWh = 130 kg CO <sub>2</sub> /GJ [7] wordt bespaard bij gebruik van de warmtebuffer (buffer levert warmte wanneer de elektriciteitsbehoefte laag is).	Kan de piek in warmtevraag opvangen (energie opwekker met kleiner thermisch vermogen kan worden ingezet) [17].	Technisch op alle groottes: individueel - collectief.

**Tabel B-0-5. Bepalende factoren distributie**

Distributie	CAPEX	Risico's	Impact omgeving	Warmteverlies	Pompenergie
Maatregel	Initiële kosten voor maatregel (geen subsidie meegenomen).	Eventuele risico's tijdens realisatie van maatregel.	Uitvoerbaarheid, ruimte gebruik en gelateerde impact.	Verandering van warmteverlies.	Verandering van pompenergie.
Niks doen	n.v.t	n.v.t	n.v.t	n.v.t	n.v.t
Stroomsnelheid verhogen	Mogelijke vervanging pompen /appendages. Snelheid verhogen vraagt een hoger debiet [m3/uur], dit kan door pompen parallel te plaatsen. Een grote (opgenomen vermogen 2 x 9 kW) pomp kost rond de €24.000 [32].	Technische risico's: - levensduur kan korter uitvallen door snellere slijtage; - geluidsoverlast; - lekkage.	Heeft geen directe impact. - uitvoerbaarheid = positief; - ruimtegebruik = positief; - impact omgeving = positief.	Geen verandering in warmteverlies.	Toename pompenergie vanwege toegenomen flow en pompdruk.
Aanvoertemperatuur verhogen	Weinig tot geen inpassing nodig.	Minimaal aantal risico's Afhankelijk van beschikbaarheid bij opwek.	Heeft geen directe impact. - uitvoerbaarheid = positief; - ruimtegebruik = positief; - impact omgeving = positief.	Toename warmteverlies.	Geen verandering in pompenergie.
Cascaderen	Afhankelijk van grootte. Er zijn kosten voor warmtewisselaar, gebouw, regelsysteem, pompen. Kosten warmtewisselaar = 60 €/kWh (bij een overdrachtsverlies over de warmtewisselaar van één graad Kelvin, hoe hoger het overdrachtsverlies hoe lager de kosten).	Kan gebrek aan ervaring zijn. Nog niet vaak toegepast.	Uitvoerbaarheid = gebiedsafhankelijk. Ruimtegebruik = neemt ondergrondse ruimte in beslag. Impact omgeving = gebiedsafhankelijk.	Weinig tot geen verandering in warmteverlies.	Toename in pompenergie
Extra leidingen	Bij een 30 kW aansluiting liggen de kosten op 550 €/m, bij 30 MW rond de 1.750 €/m [31].  Kostenpost WOS: - terrein/gebouw/installatie = €120.000 tot €140.000 - WOS (100 tot 450 kW) = €30.000 tot €35.000 - WOS (451 tot 900 kW) = €35.000 tot €40.000.	Risico's met betrekking tot aanleg zoals overlast.  Wanneer een bestaande WOS wordt aangepast moet rekening worden gehouden met de volumestroom in het secundaire net en de afstellingen van het temperatuurregime.	Erg gebiedsafhankelijk (woonwijk/stad). Uitvoerbaarheid/sociale impact is aanzienlijk wanneer de grond open moet, maar kleiner in buitengebied dan stad. Extra ruimtebeslag in ondergrond.	Toename warmteverlies.	Toename pompenergie vanwege toegenomen flow en weerstand.
Leidingen vervangen	Bij een 30 kW aansluiting liggen de kosten op 550 €/m, bij 30 MW rond de 1.750 €/m [31].	Tijdens vervanging tijdelijk geen warmtelevering mogelijk.	Gebiedsafhankelijk (woonwijk/stad). Uitvoerbaarheid/sociale impact is aanzienlijk wanneer de grond open moet, maar kleiner in rustig gebied dan stad. Ruimtegebruik erg afhankelijk van type leiding dat wordt bijgeplaatst (d.w.z. grotere leiding is meer ruimte).	Afname in warmteverlies door nieuwe leidingen en lagere aanvoertemperatuur, ondanks toename door grotere diameters.	Toename pompenergie vanwege toegenomen flow, echter liggen deze kosten lager als hij "extra leidingen".

**Tabel B-0-6. Type leiding en isolatie mogelijkheden wanneer de stap naar LT wordt gemaakt (SP Technical Research Institute of Sweden, 2015, p43)**

Aanvoer temperatuur (°C)	Leidingen	Isolatie	Typische kosten voor materiaal [€/m] (excl. grondkosten, diameter 50 mm)
120	Traditionele niet flexibele leidingen van staal.	Polyurethaan	54
120	Flexibele leidingen van zacht staal, koper of gegolfd roestvrijstaal.	Polyurethaan	48
120	Flexibele leidingen van koper.	Mineraal wol	88 (diameter 54 mm)
80	Flexibele leidingen met leidingen van PEX of polybutyleen (PB)	Polyurethaan of polyolefine (vb. Polyethyleen)	48
80	Leidingen bestaande uit PEX and blokken met isolatie	Blokken van geëxpandeerd polystyreen	48

## Bijlage C Berekeningen referentiewoningen

**Tabel C-0-1. Routes naar een LT-aanvoer van warmte op 50°C en 40°C**

Referentiewoningen		LT-warmte op 50°C		LT-warmte op 40°C	
		Woningisolatie	Afgiftesysteem	Woningisolatie	Afgiftesysteem
Tussen-/ hoekwoning Lage isolatie	90-70	A+ label	LT-radiatoren	A+ label	LT-radiatoren
	70-40	B label	LT-radiatoren	B label	Vloerverw.
Tussenwoning Midden isolatie	70-40	A+ label	LT-radiatoren	A+ label	Vloerverw.
Appartement Lage isolatie	90-70	A+ label	Vloerverw.	A+ label	Vloerverw.
	70-40	B label	LT-radiatoren	A+ label	Rad. ventilator
Appartement Midden isolatie	70-40	A+ label	LT-radiatoren	A+ label	Vloerverw.

Uit de berekeningen volgt dat het theoretisch mogelijk is om bij een woning met een laag isolatieniveau vloerverwarming toe te passen. Dit wordt echter niet meegenomen in dit deze verkenning om de volgende redenen:

- Het is niet realistisch dat in een woning vloerverwarming wordt toegepast en geen eenvoudige isolatie verbeteringen als HR++ of gevelisolatie.
- De woning kan op deze manier worden aangesloten op een LT-net, maar de warmtevraag blijft hoog. Dit zou betekenen dat de energierekening voor de afnemer hoog blijft.
- Tot slot geeft deel II van het ISSO-handboek installatietechniek (p.823) een logaritmische tabel waarin de warmtestroomdichtheid ( $W/m^2$ ) tegen de hartafstand van de verwarmingsbuizen (cm) wordt afgezet. Hieruit blijkt de gevraagde situatie(s) buiten de tabel valt. Hiermee wordt in deze verkenning aangenomen dat het niet aannemelijk is om toe te passen.

### **C.1 Tussenwoning (1965-1974) | lage isolatie | 90-70 T<sub>regime</sub> | naar 50 aanvoer**

In deze referentiewoning is het nodig om een hoog niveau van isolatie toe te voegen om de woning aan een laag temperatuurnet te kunnen koppelen. Hiermee wordt een Rc van 5.0 bereikt (label A+). Voor het afgiftesysteem kunnen zowel LT-radiatoren als vloerverwarming worden gebruikt. De laatste vraagt echter een hogere investering.

Omdat de woning op dit moment beperkte isolatie en conventionele radiatoren heeft vragen deze maatregelen een relatief hoge investering. Hiermee wordt echter wel het warmteverbruik gereduceerd tot 25% van het originele verbruik (zie Tabel C-0-2).

**Tabel C-0-2. Tussenwoning | lage isolatie | 90-70°C → 50-30°C**

Optie 1	Huidig	Nieuw
Kosten isolatie [€]	-	17.200
Kosten afgiftesysteem	Traditionele radiatoren	LT-radiatoren 1.500
Totale kosten	-	<b>18.700</b>
Warmtevraag [kW]	15,7	4,2

**C.2 Tussenwoning (1965-1974) | laag isolatie | 70-40 T<sub>regime</sub> | naar 50 aanvoer**

Er zijn twee opties mogelijk om toe te passen (zie Tabel C-0-3 en Tabel C-0-4). Van beide zijn de kosten berekend om de economisch meest interessante optie te bepalen.

**Tabel C-0-3. Tussenwoning | lage isolatie | 70-40°C → 50-30°C (optie 1)**

Optie 1	Huidig	Nieuw
Kosten isolatie [€]	-	9.000
Kosten afgiftesysteem	Traditionele radiatoren	LT radiatoren 1.500
Totale kosten	-	<b>10.500</b>
Warmtevraag [kW]	15,7	10,4

Wat zichtbaar is, is dat de kosten in optie 1 5.000 euro per woning lager liggen dan in optie 2. Dit komt doordat het extra isoleren naar 'groot' ten opzichte van investeren in het afgiftesysteem veel meer kost. Optie 2 is interessant wanneer er vanuit het perspectief van de afnemer wordt gekeken, de totale warmtevraag voor ruimteverwarming ligt namelijk een factor 2,5 lager. Er zou gekeken moeten worden of dit opweegt tegen de extra investering die nodig is voor isolatie en de terugbetaaltijd hiervan. Daarbij kunnen de huidige radiatoren voldoende capaciteit leveren en is geen investering nodig wat betreft het afgiftesysteem.

**Tabel C-0-4. Tussenwoning | lage isolatie | 70-40°C → 50-30°C (optie 2)**

Optie 2	Huidig	Nieuw
Kosten isolatie [€]	-	17.200
Kosten afgiftesysteem	Traditionele radiatoren	-
Totale kosten	-	<b>17.200</b>
Warmtevraag [kW]	15,7	4,3

### C.3 Appartement (1965-1974) | laag isolatie | 70-40 T<sub>regime</sub> | naar 50 aanvoer

In deze situatie zijn er twee opties (zie Tabel C-0-5 en Tabel C-0-6). De tabellen hieronder laten zien dat er een groot verschil in kosten zit tussen de twee opties.

**Tabel C-0-5. Appartement | lage isolatie | 70-40°C → 50-30°C (optie 1)**

Optie 1	Huidig	Nieuw
Kosten isolatie [€]	-	4.400
Kosten afgiftesysteem	Traditionele radiatoren	LT-radiator 950
Totale kosten	-	<b>5.350</b>
Warmtevraag [kW]	7,6	5,4

Het verschil is zowel op economisch vlak als in de warmtevraag verschillend. Optie 1 is het meest voordelig doordat de totale investering 4.500 per woning lager ligt. Terwijl de warmtevraag in optie 2 maximaal 3,1 kW vraagt ten opzichte van 5,4 in optie 1.

**Tabel C-0-6. Appartement | lage isolatie | 70-40°C → 50-30°C (optie 2)**

Optie 2	Huidig	Nieuw
Kosten isolatie [€]	-	9.900
Kosten afgiftesysteem	Traditionele radiatoren	-
Totale kosten [€]	-	<b>9.900</b>
Warmtevraag [kW]	7,6	3,1

### Tussenwoning (1965-1974) | laag isolatie | 70-40 T<sub>regime</sub> | naar 40 aanvoer

In deze situatie zijn er twee opties (zie Tabel C-0-7 en Tabel C-0-8). Deze twee opties verschillen qua investering het niet veel van elkaar (€600), terwijl de warmtevraag in de duurdere variant met een factor 3,5 afneemt.

**Tabel C-0-7. Tussenwoning | lage isolatie | 70-40°C → 40-25°C (optie 1)**

Optie 1	Huidig	Nieuw
Kosten isolatie [€]	-	9.000
Kosten afgiftesysteem	Traditionele radiatoren	Vloerverwarming 7.600
Totale kosten	-	<b>16.600</b>
Warmtevraag [kW]	15,7	13,8

**Tabel C-0-8. Tussenwoning | lage isolatie | 70-40°C → 40-25°C (optie 2)**

Optie 2	Huidig	Nieuw
Kosten isolatie [€]	-	17.200
Kosten afgiftesysteem	Traditionele radiatoren	-
Totale kosten	-	<b>17.200</b>
Warmtevraag [kW]	15,7	4,3



#### C.4 Kosten warm tapwaterinstallaties

De keuze voor een warm tapwaterinstallatie is erg situatieafhankelijk. Er gekeken is naar de mogelijkheden van een booster warmtepomp, elektrische boiler en lucht-warmtepomp met boiler. Om een indruk te geven van de kosten van de verschillende opties zijn de investeringen en gebruikskosten (CAPEX en OPEX) in Tabel C-9 samengevoegd. Een gedetailleerde toelichting staat beschreven in de Bijlage E Methodologie scoretabel & keuzeschema.

**Tabel C-0-9. Overzicht kostenpost warm tapwater installaties<sup>23</sup>**

CAPEX	Booster warmtepomp	Elektrische boiler	WP+boiler
Arbeid [€]	600	400	1.000
Materiaal installatie [€]	2.000	700	1.700
Overige materialen [€]	1.100	200	1.400
Vervangen oude installatie [€]	-	-	-
<b>Totaal [€]</b>	<b>3.700<sup>24</sup></b>	<b>1.300</b>	<b>4.100</b>
Energiekosten [€/jaar] <sup>25</sup>	<b>415</b>	<b>570</b>	<b>340</b>

<sup>23</sup> De kosten zijn gebaseerd op een eengezinswoning (tussenwoning/hoekwoning).

<sup>24</sup> Komt in aanmerking voor ISDE-subsidie.

<sup>25</sup> De jaarlijkse energiekosten zijn bepaald bij een aanvoertemperatuur van 40°C en een tapwaterpatroon van 180l/dag (Bijlage E Methodologie scoretabel & keuzeschema).

## Bijlage D Lijst geïnterviewde personen

**Tabel D-0-1. Geïnterviewde personen**

Geïnterviewde	Organisatie
Anna Boss	SP Technical Research Institute of Sweden
Anne Marieke Schwencke	AS I-Research
Eric Willems	Huygen Adviseurs
Henk Heijkers	Gemeente Den Haag
Leon Ammerlaan	Ammerlaan - The Green Innovator
Lydia Dijkshoorn	RVO
Marek Brand	Danfoss (Denemarken)
Rene Verhoeven	Mijnwater BV
Sven Werner	Halmstad University (Zweden)

## Bijlage E Methodologie scoretabel & keuzeschema

Voor zowel de scoretabellen als de keuzeschema's zijn kengetallen en aanvullende informatie gebruikt die ten grondslag liggen. Deze bijlage is onderverdeeld in drie hoofdstukken, te beginnen met de kengetallen die zijn gebruikt om de CAPEX en OPEX inzichtelijk te maken voor de warm tapwaterinstallaties. Vervolgens wordt een toelichting gegeven hoe het simulatiemodel voor de keuzeschema's is opgebouwd. En tot slot wordt in deel drie van de bijlage aanvullende informatie verschaft die toelicht welke aannames en of waardes er zijn gebruikt voor Figuur 4-2.

### Toelichting CAPEX warm tapwaterinstallaties

De CAPEX bestaat uit kosten voor het weghalen van de oude installatie, het plaatsen van de nieuwe installatie en benodigde materialen. Het verwijderen van de huidige installatie zal verschillen per type installatie. In het geval één woning niet op een warmtenet zit, zullen er kosten zijn aan het verwijderen van de oude installatie. Als de woning wel op een warmtenet aangesloten is, heeft het vaak al een warm tapwater installatie en is er hooguit vervanging of aanpassing nodig in de leidingen (Tabel C-0-9).

### Kengetallen OPEX warm tapwaterinstallaties

De gebruikskosten (OPEX) hangen af van de dagelijkse vraag naar warm tapwater (180l/dag) en de temperatuur bij de inlaat van de installatie (50°C of 40°C aanvoer). Aan de hand hiervan kan de OPEX op jaarbasis worden berekend (hieronder).

**Tabel E-0-1. Kosten in €/jaar voor een gezin met een tapwaterpatroon van 180l/dag**

Tapwater bron	T <sub>aanvoer</sub>	180 l /dag	
		Euro/dag	Euro/jaar
Booster warmtepomp	50	1.03	376,5
	40	1.14	415,0
Elektrische boiler	50	1.29	471,9
	40	1.55	567,3
Warmtepomp lucht	50	0.86	312,3
	40	0.93	338,0

De elektrische boiler heeft de laagste investeringskosten maar hogere jaarlijkse gebruikskosten. Het verschil in gebruikskosten met de andere technologieën is dermate laag dat het meer dan tien jaar duurt voordat een boiler duurdere kosten heeft. Om de installaties te vergelijken is de efficiëntie van de installatie van belang en de kosten per GJ, de gebruikte kengetallen staan hieronder.

**Tabel E-0-2. Kengetallen warm tapwater installaties (Milieucentraal: kosten warmte/gas/elektra per GJ)**

Warm tapwater installatie	Efficiëntie
Booster warmtepomp	COP 3,8 (40°C aanvoer)   COP 4,6 (50°C aanvoer)
Elektrische boiler	95%
Warmtepomp lucht	COP 2,2
Prijs per GJ	€/GJ
Warmte	17,9 (excl. BTW)
Elektra	55,60

Een tappatronen van 180l is gebruikt als referentie, deze groottes komen in het algemeen veelvuldig voor. Verder is er sprake van voorverwarming, wat betekent dat deze temperaturen afhankelijk zijn van het warmtenet (50°C of 40°C aanvoer). Verder wordt gekeken naar de hoeveelheid verbruikte energie op jaarbasis. Er zijn geen vastrechtkosten meegenomen, deze zijn al meegenomen in de energierekening van de afnemers.

### Zonneboiler in combinatie met LT-warmte

Zonneboilers worden steeds vaker genoemd als duurzame optie voor warmte. De afgelopen 20 jaar worden er elk jaar ongeveer 7.500 systemen op Nederlandse woningen geïnstalleerd (CBS, 2016). De zonnepwarmte wordt vooral gebruikt voor warm tapwater (douchen, afwassen, et cetera). In combinatie met lage temperatuur verwarming kan de warmte ook worden gebruikt om de ruimte te verwarmen, echter door het verschil tussen aanbod van warmte (in zomer) en vraag naar warmte (in winter) is de bijdrage (zonder langdurige opslag die veelal niet haalbaar is voor één woning) beperkt. Vanaf 2016 kan voor een zonneboiler subsidie worden aangevraagd. Wanneer dit wordt meegenomen wordt in een gemiddeld huishouden met vier personen de zonneboiler na 20 jaar of meer terugverdiend, behalve als er voor warm tapwater een elektrische boiler wordt gebruikt; dan is de terugverdientijd aanzienlijk lager (ongeveer acht jaar).

### Simulatiemodel keuzeschema

Het model is ontwikkeld om de warmtevraag en verwarmingsvermogen van een galerijwoning en een rijtjeshuis/hoekwoning te bepalen. Aan de hand van de input van het model (type woning, bouwperiode, isolatiegraad, verwarmingsinstallatie en temperatuur regime van het warmtenet) rekent het model door of de verwarmingsinstallatie aan de warmtevraag kan voldoen. Om dit model zo dicht mogelijk tegen de realiteit te brengen zijn de volgende keuzes gemaakt:

De gegevens van de woningen zijn afkomstig uit het model voorbeeldwoningen RVO (2011), welke gekoppeld zijn aan de energieprestatie van de woning. Het gaat hier om het vloeroppervlak, de afmetingen van de muren en ramen, de oriëntatie van het gebouw en de Rc-waardes. De buitentemperatuur, de windsnelheid en de zonne-instraling worden bepaald met het referentiejaar (NEN 506).

Het model deelt de muren van de woning op in een aantal elementen. Voor elke tijdstap wordt voor elk element een warmtebalans opgelost. Er is een constante interne warmteproductie van 4.18 W/m<sup>2</sup> en een constant ventilatie en infiltratie debiet van 10 dm<sup>3</sup>/(s m<sup>2</sup>) gebruikt. De infiltratie en ventilatie wordt uitgedrukt in een warmestroom:  $\dot{Q} = \dot{V} * \rho * C_p * (T_{buiten} - T_{binnen})$ .

Daarnaast vindt er ook nog warmteoverdracht plaats door convectie, geleiding en straling. Alle warmtestromen worden gesommeerd in de energiebalans. Daarnaast wordt het effect van de thermische massa van het element meegenomen:

$$\sum \dot{Q} = m_{element} \cdot C_p \frac{T_{element}^t - T_{element}^{t-\Delta t}}{\Delta t}$$

Tijdens de simulaties wordt de warmtebalans opgelost. De warmtevraag wordt bepaald door middel van iteratie terwijl de maximale beschikbare warmtevraag gelimiteerd wordt door het beschikbare vermogen van de verwarmingsinstallatie.

Het model wordt gebruikt om gedurende één jaar het thermische gedrag van de woningen te simuleren. Om het comfort in de woning te behouden is er een minimum binnentemperatuur van 20°C met een nachtverlaging van 3°C ingesteld. In de zomer wordt de woning extra gekoeld door natuurlijke ventilatie. De berekeningen worden gedaan met een opwarmtijd van 0, 1 en 2 uur.

Het verwarmingsvermogen van de radiators is gebaseerd op de specificatie van enkele fabrikanten. De gemodelleerde woningen zijn standaard uitgerust met conventionele radiatoren (twee platen) die vervangen kunnen worden door LT-radiatoren (drie platen). Tijdens de simulaties wordt de aanvoertemperatuur van de verwarmingsinstallatie verlaagd van 90°C of 70°C naar 50°C of 40°C. De invloed hiervan op de radiator is beschreven met correlaties uit ISSO, waarbij het verwarmend oppervlak van de radiatoren gelijk wordt gehouden. Het toevoegen van extra verwarmend oppervlak van +/- 20%, als extra radiator in de woning, in de simulatie blijkt geen directe invloed te hebben op zowel de warmtevraag als keuze in isolatie en afgiftesysteem. Het extra vermogen dat door het gebruik van radiator ventilatoren wordt toegevoegd is bepaald met relaties voor natuurlijke en gedwongen convectie. Daarnaast worden ook de effecten van vloerverwarming gemoduleerd.

## **Onderbouwing Tabel 4-2. Kostenoverzicht aanpassingen referentiewoningen**

### **Projectmatige- & individuele aanpak**

De kosten die in figuur 4-2 zijn weergegeven zijn als volgt opgebouwd. Uit EPA-maatwerkadvies (2013) worden alle kostenkengetallen voor de bestaande woningbouw gegeven, met als doel financiële onderbouwing te geven van de kosten die gemoeid zijn met het nemen van energiebesparende maatregelen en het effect daarop op de maand-/woonlasten (RVO, 2013). Er zijn verschillende variabelen die invloed hebben op de totale prijs voor een woning. In totaal zijn dit er vier voor eengezinswoningen (hoek-/tussenwoningen) en vier voor meergezinswoningen (galerijwoningen).

- Projectmatige- of enkelvoudige aanpak: wordt de renovatie voor één enkele woning of meerdere woningen (projectmatig) gedaan.
- Moment van uitvoering: op zichzelf staand of tijdens een natuurlijk moment (wanneer iets toe is aan vervanging).

Deze twee stappen bieden vier opties, de totaal kosten hiervan bevatten zowel materiaal als arbeidskosten. In deze verkenning is rekening gehouden met een projectmatige aanpak op een natuurlijk moment. Ofwel, de aanpak van meerdere woningen tegelijk waar de materialen toe zijn aan vervanging. De andere drie opties betekenen dat de kosten per aanpak hoogstwaarschijnlijk hoger zullen uitvallen. De marges hiervan zijn vrij uiteen. Voor een tussenwoning (bouwjaar jaren 60-70) met label B naar label A+ gaat het om meerkosten van €2.000,- (een verschil van 25%) wanneer een enkelvoudige en niet-natuurlijk moment wordt aangehouden.

### Prijsontwikkeling

Verder moet rekening worden gehouden met de maturiteit. Een investering van nu kan in de toekomst anders uitvallen. De tabellen hieronder geven een leercurve aan voor twee situaties (C-label en hoger, B-label en lager). Deze tabellen laten de situatie zien waarop de kosten uit de verkenning zijn gebaseerd en de boven- en ondermarge van de te verwachten prijsontwikkeling (CE Delft, 2013). De verwachte prijsontwikkeling is afhankelijk van de ontwikkeling in materiaalprijzen, arbeidskosten en productiviteit. Wat zichtbaar is, is dat de tabellen vrijwel overeenkomen.

**Tabel E-0-3. Leercurve kostenontwikkeling woning label C > hoger (Vesta 2.0 – uitbreidingen en dataverificatie, 2013)**

	2010	2020	2030	2040	2050
Min	100	85	73	63	54
Max	100	101	104	109	115

**Tabel E-0-4. Leercurve kostenontwikkeling woning label B > lager (Vesta 2.0 – uitbreidingen en dataverificatie, 2013)**

	2010	2020	2030	2040	2050
Min	100	85	72	61	52
Max	100	101	105	110	116

Deze bovenstaande leercurve tabellen bieden inzicht in de prijsontwikkeling van een renovatie. Wanneer een investering wordt gedaan voor een woning label B en lager, in het jaar 2030. Is het noodzakelijk de kosten die nu in de verkenning zijn opgenomen te vermenigvuldigen met minimaal 0,72 en maximaal 1,05. Een meer gedetailleerde verklaring is te vinden in het document: Vesta 2.0 – uitbreidingen en dataverificaties (2013).

Overige opmerkingen:

- Het gehanteerde prijspeil is september 2010 zowel voor materiaal als arbeidskosten.
- De kostenkengetallen voor materiaal zijn exclusief btw.
- Arbeidskosten zijn verlaagd van 21% - 6%. Het 6% tarief is van toepassing op het vernieuwen, vergroten, herstellen of vervangen en onderhouden van (delen van) de woning.

### **Opwarmtijd**

De opwarmtijd bepaalt binnen hoeveel uur de woning aan de gevraagde temperatuur moet voldoen. Als grens in deze verkenning, is er gehanteerd dat de woning heel het jaar door binnen een uur de woning moet kunnen verwarmen. Deze grens is niet wettelijk verplicht en resulteert ook in grote veranderingen wanneer deze lager wordt ingesteld (bijvoorbeeld: 10 uur per jaar dat de woning niet warm te krijgen is binnen een uur). Met veranderingen worden de maatregelen in isolatie en afgiftesystemen bedoeld.

## Bijlage F Overzicht bestaande literatuur

Deze bijlage geeft een samenvatting van de belangrijkste literatuur over de transitie naar lage temperatuur warmte. Per bron wordt een korte omschrijving van het doel van de studie gegeven. Verder worden overige gebruikte bronnen weergegeven. Verschillende bronnen hebben een getal [X] staan. Dat houdt in dat de bron is gebruikt als kwalitatieve onderbouwing voor de scoretabellen uit bijlage B.

### **Interessante literatuur voor verdere referentie**

*Agora Energiewende, 2014 – Power-to-heat zur integration von ansonsten abgeregeltem Strom aus Erneuerbaren Energien.*

Dit onderzoek richt zich op de integratie van Power-to-Heat met elektriciteit uit hernieuwbare bronnen. Het biedt een handleiding gebaseerd op een analyse van potentiële en energie-economische effecten (in het Duits geschreven).

*Brand, 2014 – Heating and Domestic Hot Water Systems in Buildings Supplied by Low-Temperature District Heating*

In deze PhD studie staat lage temperatuur warmte centraal, mogelijke uitdagingen op het gebied van ruimteverwarming en warm tapwater worden besproken en potentiële oplossingen geïdentificeerd. De studie is onderverdeeld in twee delen: deel 1 focust zich op de haalbaarheid van warm tapwater voorziening zonder legionella risico en deel 2 focust zich op de systemen voor ruimteverwarming in sterk en niet sterk geïsoleerde woningen.

*Builddesk, 2009 - Hybride LT warmtenet Waalsprong Nijmegen [27]*

Deze studie buigt zich over het construeren van een realistische business case voor een "hybride lage temperatuur warmtenet" in Nijmegen. De term hybride houdt in dat er twee type warmtebronnen worden ontsloten: warmte uit koelwater voor ruimteverwarming en de inzet van warmtepompen voor de productie van warm tapwater en ruimteteoeling. De studie gaat na of dit type warmtenet technisch, financieel en qua exploitatie haalbaar kan zijn.

*CE Delft, 2009 - Overzicht van grootschalige en kleinschalige warmtenetten in Nederland*

In deze studie worden de warmtenetten, - leveranciers en -producenten binnen Nederland in kaart gebracht. De studie is uitgevoerd in opdracht van de Energiekamer (NMa) met als doel een duidelijk beeld te schetsen van de warmtevoorziening binnen Nederland.



*CE Delft, 2014 - MKBA Warmte Zuid-Holland*

In opdracht van Programmabureau Warmte Koude Zuid-Holland heeft CE Delft, samen met Infinitus, een maatschappelijke kosten en baten analyse opgesteld van duurzame warmte in Zuid-Holland en Nederland. De MKBA moet inzicht geven in hoe de 20PJ duurzame energie in 2020 het meest efficiënt gerealiseerd kan worden. Een lage-temperatuurwarmtenet (40/25 °C) is onderdeel van de mogelijke collectieve warmteoplossingen.

*Dalla Rosa, A., 2014 - Towards 4th generation district heating: experience and potential of low temperature district heating*

Deze samenvattende studie geeft een uitgebreide beschrijving van lage temperatuur warmte: de voordelen, de mogelijke uitdagingen, hoe het risico op legionella kan worden aangepakt, welke lessen er getrokken kunnen worden op basis van lage temperatuur projecten en hoe het financiële plaatje van lage temperatuur stadsverwarming eruitziet.

*Danish Energy Agency, 2014 - Guidelines for Low Temperature District Heating*

Op basis van praktijkervaringen op het gebied van lage temperatuur warmte in Denemarken worden in deze studie richtlijnen opgesteld voor de ontwikkeling van stadsverwarming. De richtlijnen richten zich met name op het ontwerp van lage temperatuur distributienetwerken.

*EnEff: Wärme, 2016 – Research for Energy Efficiency*

EnEff: Wärme is een onderzoeksprogramma in Duitsland gefocust op energie efficiënte warmte en koude netwerken. Veel pilot projecten gaan specifiek over lage temperatuur warmte (bijvoorbeeld "LowExtra: low-exergy transmission pipes for storing and distributing heat" en "New Neckarpark Stuttgart urban district: local heating and cooling energy from waste water"). Verdere informatie is te vinden op <http://www.eneff-stadt.info/en/>.

*EZ, 2015 – Warmtevisie*

De warmtevisie geeft een analyse van de rol die warmte kan spelen binnen het Nederlands energiesysteem. Een van de speerpunten is een toename in het aandeel restwarmtebenutting en duurzame warmte.

*Hellebrand, K., et al., 2012 - Kansen voor ondiepe geothermie voor de glastuinbouw.*

Zoals de naam aangeeft richt deze studie zich op het potentieel en de kansen van ondiepe geothermie voor de Nederlandse glastuinbouwsector. De potentie wordt bekeken aan de hand van bodembeschikbaarheid, de mogelijke boortechnieken en kosten en de mate van systeemintegratie.

*Programmabureau Warmte Koude Zuid-Holland, 2015 - Warmte in alle openheid.*

In deze notitie wordt de mogelijkheid van een open warmtemarkt en de condities die daarvoor nodig zijn uitgewerkt voor de regio Zuid-Holland.

*SP Technical Research Institute of Sweden, 2015 - A concept for low-temperature thermal grid heating and high-temperature cooling.*

Deze studie is onderdeel van een Europees programma genaamd Celsius City. Celsius staat voor Combined Efficient Large Scale Integrated Urban Systems en focust zich op de mogelijkheden om warmte en koude op een slimme manier te distribueren binnen de stedelijke omgeving. De studie richt zich binnen dit programma specifiek op voordelen, implicaties, oplossingen en strategieën voor lage temperatuur warmte.

### **Overig gebruikte literatuur**

ACM. (2015). <https://www.acm.nl/nl/publicaties/publicatie/15137/Besluit-maximumprijs-levering-warmte-2016/> [20]

Afman, M.R., Wielders, L.M.L. (mei 2014). *Achtergrondgegevens stroometikettering 2013*. [7]

AgentschapNL & Arcadis. (2013). *Maatregelen EPA-Maatwerkadvies Bestaande Woningbouw 2013* [30]

Arcadis, AgentschapNL. (2013). *Maatregelen EPA-Maatwerkadvies Bestaande Woningbouw*.

Agentschap NL – ministerie van EZ. (2013). *SEI risico's dekken voor Aardwarmte*. <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2013/10/Handleiding%20SEI%20%20Aardwarmte%202010.pdf> [5]

Allesoverzonnepanelen. (2014). *Overzicht energielabels ten opzichte van de Energie-Index van gebouwen*. <http://www.allesoverzonnepanelen.nl/systeem/energielabel/>

Beer, J., Slingerland, E., Meindertsma, W. (2014). *Warmteladder, afwegingskader warmtebronnen voor warmtenetten*. <http://www.ecofys.com/files/files/ecofys-2014-warmteladder.pdf> [6]

Bonte, D., et al. (2012). *Subsurface temperature of the onshore Netherlands: new temperature dataset and modelling*. <http://www.thermogis.nl/downloads/Bonte-NJG-91-4-5.pdf> [1]

CBS. (2016). *Zonnewarmte; aantal installaties, collectoroppervlak en warmteproductie*. <http://statline.cbs.nl/Statweb/publication/?VW=T&DM=SLNL&PA=82003NED&D1=2&D2=1&D3=a&HD=160629-1010&HDR=T&STB=G1,G2>

CBS. (2015). *Aardgas en elektriciteit, gemiddelde prijzen van eindgebruikers*. <http://statline.cbs.nl/StatWeb/publication/?VW=T&DM=SLNL&PA=81309NED&D1=0-1%2c3%2c5%2c7-8%2c11%2c15&D2=0&D3=a&D4=a&HD=121114-1344&HDR=G1%2cG2%2cT&STB=G3> [15]

Climate Booster. <http://www.climatebooster.nl/uitvoeringen/> [23]

Department of Energy & Climate Change. (2016). *Heat Pumps in District Heating*. Page 128  
[https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/489602/DECC\\_Heat\\_Pumps\\_in\\_District\\_Heating\\_-\\_Final\\_report.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/489602/DECC_Heat_Pumps_in_District_Heating_-_Final_report.pdf) [18]

Drake Landing Solar Community. (2016). <http://www.dlsc.ca/how.htm>

ECN. (2003). *Handbook voor opslag duurzame energie*.  
[https://www.ecn.nl/fileadmin/ecn/corp/Nieuwsbrief\\_NL/eerder-verschenen-nieuwsbrieven/0184.html](https://www.ecn.nl/fileadmin/ecn/corp/Nieuwsbrief_NL/eerder-verschenen-nieuwsbrieven/0184.html)  
[17]

Ecofys. (2015). *Systeemkosten van warmte voor woningen*.[http://www.ecofys.com/files/files/ecofys-2015-systeemkosten-van-warmte-voor-woningen\\_02.pdf](http://www.ecofys.com/files/files/ecofys-2015-systeemkosten-van-warmte-voor-woningen_02.pdf) [21]

Grundfos prijzenlijst pompen. (2015). <http://be.grundfos.com/prijslijst-2015.html> [32]

International Energy Agency. (2014). *Technology Roadmap – Energy storage*.  
<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapEnergyStorage.pdf>  
[11]

Jaga LT radiatoren. [http://www.jagapro.nl/sites/default/files/product/downloads/Tempo\\_0.pdf](http://www.jagapro.nl/sites/default/files/product/downloads/Tempo_0.pdf) [22]

Kiemt. (2015). <http://www.kiemt.nl/mijnwater-ontwikkelt-controller-voor-innovatief-duurzaam-warmtenetwerk/>

Leguijt, C., Schepers, B.L., Folkert, R., van den Wijngaart, R. (2013). *Vesta 2.0, Uitbreidingen en dataverificatie* [29]

Leguijt, C., Schepers, B.L., van den Wijngaart, R., Folkert, R., Hilferink, M. (2011). *Functioneel ontwerp vesta* [33]

Logemann, E. (2015). *Onderzoeksrapport toepassingsmogelijkheden voor warmteopslag*. [12]

MAIS model validatie voorbeelden [31]

Midea – Warmtepompboilers. [http://www.climacon.nl/storage/files/CLI-2555\\_folder%20warmteboilers-120213\\_%28495%29.pdf](http://www.climacon.nl/storage/files/CLI-2555_folder%20warmteboilers-120213_%28495%29.pdf) [19]

Ministerie van EZ. (2015). *Energierapport – transitie naar duurzaam*. [10]

NEN 7120+C2. (2012). *Energieprestatie van gebouwen – bepalingmethode*

Rijksoverheid. (2009). *Duindorp, warmte uit zeewater: energieneutrale wijkverbetering te Scheveningen*.

Rijksoverheid. (2009). *Nationaal actieplan voor energie uit hernieuwbare bronnen*. [9]

RVO. *Melkpoederfabriek verwarmt zwembad en school in Beilen*.

<http://www.rvo.nl/sites/default/files/bijlagen/Melkpoederfabriek%20verwarmt%20zwembad%20en%20school%20in%20Beilen.pdf> [28]

RVO. Restwarmte uit industrie/AVI/elektriciteitscentrale, etc. in combinatie met mogelijke maatregelen op gebouwniveau.

<http://www.rvo.nl/sites/default/files/bijlagen/Concept%20C10%20restwarmte%20industrie.pdf> [26]

RVO. (2011). *Voorbeeldwoningen 2011 – EPA detailgegevens site*.

RVO. (2013). *Zonneboilers voor de industrie*.

<http://www.rvo.nl/sites/default/files/2013/09/Zonneboilers%20voor%20de%20industrie.pdf> [14]

RVO. (2015). *System integration – Hybrid Energy infrastructures, final report*. Page 37.

<http://topsectorenergie.nl/wp-content/uploads/2015/04/Systeemintegratie-Eindrapport-Perceel-3-Hybride-Infrastructuren-DNVGL-22-april-2015.pdf> [16]

Tigchelaar, C., Liedelmeijer, K. (2013). *Energiebesparing: Een samenspel van woning en bewoner – Analyse van de module Energie WoOn 2012*.

van den Bosch, R., et al. (2013). *Stappenplan: winning aardwarmte voor glastuinbouw*.

[https://www.kasalsenergiebron.nl/content/docs/Aardwarmte/Stappenplan\\_Aardwarmte.pdf](https://www.kasalsenergiebron.nl/content/docs/Aardwarmte/Stappenplan_Aardwarmte.pdf) [4]

Voorbeeldwoningen 2011 – EPA detailgegevens site – 9 december 2010.

<http://www.rvo.nl/onderwerpen/duurzaam-ondernemen/gebouwen/woningbouw/particuliere-woningen/voorbeeldwoningen> [24]

Winkel, T., et al. (2013). *Invulling van 16% hernieuwbare energie in 2020*.

<ftp://ftp.ecn.nl/pub/www/library/report/2013/o13026.pdf> [8]

Zijlema, P.J. (2013). *Berekening CO<sub>2</sub> emissiefactor aardgas jaar 2012-2013*. Pagina 9.

<http://www.rvo.nl/sites/default/files/2013/09/Zijlema%202012%20Berekening%20CO2-emissiefactor%20aardgas%20jaar%202012%20en%202013.pdf> [13]

Zuijlen, C.L., Lensink, S.M. (2015). *Eindadvies basisbedragen SDE+ 2016*.

[http://geothermie.nl/fileadmin/user\\_upload/documents/bestanden/SDE/ecn\\_einadvies\\_2016\\_e15052.pdf](http://geothermie.nl/fileadmin/user_upload/documents/bestanden/SDE/ecn_einadvies_2016_e15052.pdf) [2]

