

Warmtenetten: Technische karakterisering

WIEfm Rapport werkpakket 4



Colofon

Datum 2 mei 2019
Referentie WIEfm-WP4
Versie 1.0
Afdeling Lectoraat Duurzame Energievoorziening
Auteur T.J.G. Papa, S.I. Wijnant-Timmerman, R.P. van Leeuwen

Afbeelding op de omslag van Danfoss A/S

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

Samenvatting

Deze deelstudie, binnen werkpakket 4 van Wiefm, richt zich voornamelijk op het technische aspect van de warmtenetten. Het doel is om de belangrijke aspecten die het technische functioneren van warmtenetten bepalen, vast te leggen met behulp van een karakterisering van warmtenetten. Vervolgens wordt deze karakterisering toegepast op een aantal bestaande warmtenetten en wordt onderzocht welke aspecten de duurzaamheid bepalen en welke lessen daaruit geleerd kunnen worden.

Er is een literatuuronderzoek uitgevoerd op grond waarvan de belangrijkste technische parameters zijn vastgesteld waarmee een warmtenet gekarakteriseerd kan worden. Op grond hiervan is een karakteriseringstabel opgesteld.

De duurzaamheid van het warmtenet kan vastgesteld worden op basis van de Primary Energy Ratio (PER), welke wordt weergegeven door de hoeveelheid geleverde warmte gedeeld door het fossiele brandstof gebruik. De duurzaamheid van een warmtenet hangt voornamelijk af van het aandeel duurzame energie aan de opwekkant.

Uit het literatuuronderzoek is gebleken dat de lineaire warmtedichtheid de belangrijkste factor is voor het warmteverlies in het net. De lineaire warmtedichtheid is gedefinieerd als de getransporteerde warmte per jaar gedeeld door de tracé lengte van het net. Andere aspecten die het leidingverlies bepalen zijn: Het temperatuurniveau, leiding layout en mate van isolatie van de leidingen en de diameter van de leidingen: hoe groter de diameter (bij gelijkblijvende warmtelevering) hoe hoger het warmteverlies en de kapitaalkosten.

Er is een zevental cases bestudeerd en gekarakteriseerd en geanalyseerd. De warmtedichtheid is uitgezet tegen het warmteverlies van het distributie net. De resultaten hiervan zijn vergeleken met een Europese benchmark studie naar 832 warmtenetten. De 7 bestudeerde Nederlandse netwerken hebben een lage lineaire warmtedichtheid vergeleken met de Europese netwerken. Het feit dat er veel leidingwerk ligt voor de warmtevraag heeft niet alleen gevolgen voor de energieverliezen maar ook voor het kostenaspect, want uit de bestudering van de business cases is gebleken dat de kosten van de warmtenetten grotendeels bepaald worden door de omvang van de leiding netten. Als de lineaire warmtedichtheid hoger is dan heeft dit positieve gevolgen voor zowel het energieverlies als de kosten kant.

Voor het merendeel van de onderzochte cases geldt dat de aanvoer temperaturen tussen de 70 en de 80 graden liggen en dat retour temperaturen tussen de 40 en 60 graden liggen, daarmee zijn de warmtenetten grotendeels derde generatie warmtenetten van midden temperatuur niveau. Eén warmtenet, dat van Thermobello (Eva Lanxmeer, Culemborg), heeft als toevoertemperatuur 50 graden. Dit lage temperatuurnet heeft als enige van de 7 onderzochte netten een laag warmteverlies, van rond de 10 %. Bij de overige variëren de warmteverliezen van 25 % tot 35 %. Wel kan gesteld worden dat verlagen van de nettovoer temperatuur beneden de 70 à 75 graden alleen mogelijk is als er aanvullende voorzieningen worden getroffen voor warm tap water.

Toekomstige ontwikkelingen in warmtenetten moeten gezocht worden in lage temperatuurtoepassingen. Dan zal de warm tapwatervoorziening losgekoppeld moeten worden van het temperatuurniveau van het warmtenet, of een aanvullende voorziening moeten worden getroffen hiervoor.

De PER wordt voornamelijk bepaald door het aandeel duurzame energie. Belangrijk is dat dit duurzame aandeel zo hoog mogelijk is. Dat houdt in dat eventuele aanwezige warmtepompen bij voorkeur worden aangedreven door duurzame elektriciteit en dat de duurzame installatieonderdelen een hoge bezettingsgraad hebben. Bestudeerde cases laten zien dat de aanwezige buffervaten sterk variëren qua grootte, en dit heeft invloed op het mogelijk aantal draaiuren van de duurzame installatie.

Inhoudsopgave

Samenvatting	3
1 Inleiding	6
1.1 Probleemstelling en doelstelling	6
1.2 Deelvragen	6
1.3 Aanpak en leeswijzer	6
2. Beschrijving warmtenetten	8
2.1 Inleiding	8
2.2 Warmtenetten in Nederland	8
2.3 De basisonderdelen van het warmtenet	9
2.3.1 Bronnen van een warmtenet	9
2.3.2 Warmtevragers	12
2.3.3 Distributienet	13
2.4 Voor- en nadelen van warmtenetten	18
2.5 Typering warmtenetten	19
2.5.1 Generaties warmtenetten	19
2.5.2 Eerste generatie warmtenetten	20
2.5.3 Tweede generatie warmtenetten	21
2.5.4 Derde generatie warmtenetten	21
2.5.5 Vierde generatie warmtenetten	22
2.5.6 De uitdagingen voor vierde generatie warmtenetten	22
2.5.7 Temperatuurniveaus warmtenetten	23
2.6 Overzicht temperatuurniveaus warmtenetten en warmtevragers	24
2.7 Gebiedsaspecten	25
2.7.1 Lineaire warmtedichtheid	25
2.8 Distributieverliezen	26
2.9 Duurzaamheid van het net	28
2.10 Karakteriseringstabel warmtenet	29
3. Beschrijving Cases	31
3.1 Inleiding	31
3.2 Warmtenet 1: Apeldoorn zuidbroek	31
3.2.1 Beschrijving warmtenet	31
3.2.2 Duurzaamheid warmtenet	33
3.2.3 Analyse	33

Datum 27 mei 2019

Titel Warmtenetten: Technische karakterisering

Pagina 5 / 65

3.3	Warmtenet 2: Thermobello/EVA-Lanxmeer, Culemborg	34
3.3.1	Beschrijving warmtenet.....	34
3.3.2	Duurzaamheid warmtenet.....	34
3.3.3	Analyse	35
3.4	Warmtenet 3: Roombeek, Enschede.....	35
3.4.1	Beschrijving warmtenet.....	35
3.4.2	Duurzaamheid warmtenet.....	36
3.4.3	Analyse	36
3.5	Warmtenet 4: Zwolle Muziekwijk	37
3.5.1	Beschrijving warmtenet.....	37
3.5.2	Duurzaamheid warmtenet.....	37
3.5.3	Analyse	38
3.6	Warmtenet 5: Almelo Windmolenbroek	38
3.6.1	Beschrijving warmtenet.....	38
3.6.2	Duurzaamheid warmtenet.....	38
3.6.3	Analyse	39
3.7	Warmtenet 6: Meppel Nieuwveenselanden	39
3.7.1	Beschrijving warmtenet.....	39
3.7.2	Duurzaamheid warmtenet.....	41
3.7.3	Analyse	41
3.8	Warmtenet 7: Ede.....	42
3.8.1	Beschrijving warmtenet.....	42
3.8.2	Duurzaamheid warmtenet.....	43
3.8.3	Analyse	43
3.9	Overzicht cases	43
3.10	Toekomstige ontwikkelingen	45
4.	Conclusies en aanbevelingen.....	47
5.	Bibliography.....	49
	Bijlage 1. Voorbeelden van Europese LT netten	51
	Bijlage 2. Temperatuur niveaus van oudere grootschalige warmtenetten	52
	Bijlage 3. Karakteristieke aspecten van de diverse generaties warmtenetten	53
	Bijlage 4. Warmteverliezen in Europese netten	54
	Bijlage 5. Gegevens behorend bij de cases	56
	Bijlage 6. Karakteriseringtabel voor de 7 onderzochte cases	64

1 Inleiding

Het WiE^{fm} project heeft als doel om duurzame verwarming in de Euregio aan te jagen en te bevorderen. De focus van dit project ligt daarbij hoofdzakelijk op duurzame warmtenetten. Voorwaarde voor een goed functionerend warmtenet is dat deze technisch goed functioneert, maar ook de economische rentabiliteit en de organisatorische en bestuurlijke aspecten daarvan zijn van belang. In deze studie wordt bekeken hoe warmtenetten functioneren en wordt gestreefd om lessen te leren uit deze cases, om toe te passen in nieuwe cases.

Deze deelstudie focust zich voornamelijk op het technische aspect van de warmtenetten, in een andere deelstudie, zie (Hof & Lier, 2019), worden de verbanden gelegd naar de economische en governance aspecten. Voor alle drie de deelgebieden wordt er eerst gekeken naar hoe de netten te karakteriseren zijn, en vervolgens wordt deze karakterisering uitgewerkt aan de hand van een aantal geselecteerde warmtenetten in Oost-Nederland.

1.1 Probleemstelling en doelstelling

Probleemstelling

Hoe zijn warmtenetwerken te karakteriseren en pas deze karakterisering toe op bestaande cases. Wat valt er te leren op basis van bestaande netwerken? Bepaal dit aan de hand van een literatuuronderzoek en werk deze karakterisering uit voor een aantal te selecteren warmtenetten.

Doelstelling

Het doel is om de belangrijke aspecten die het technische functioneren van warmtenetten bepalen, vast te leggen en daarmee warmtenetten te karakteriseren. Vervolgens wordt deze karakterisering toegepast op een aantal bestaande warmtenetten en wordt bepaald welke aspecten de duurzaamheid bepalen en welke lessen daaruit geleerd kunnen worden.

1.2 Deelvragen

- Welke indeling van netten is er te maken op basis van de literatuur?
- Wat zijn de onderdelen van een warmtenet en hoe zijn deze te karakteriseren?
- Welke aspecten in het warmtenet bepalen de duurzaamheid van een warmtenet?
- Hoe ziet de karakteriseringstabel eruit (welke kentallen moeten achterhaald worden) om de cases technisch te analyseren?

De karakterisering wordt toegepast op een aantal geselecteerde netwerken waarbij de volgende deelvragen worden beantwoord:

- Wat zijn de ontwikkelingen op het gebied van warmtenetten? Welke ontwikkeling is wenselijk? Wat belemmert deze ontwikkeling? Wat zijn de aanbevelingen?
- Wat is er geleerd van bestaande projecten?

1.3 Aanpak en leeswijzer

Karakterisering van de netten vindt plaats op grond van literatuuronderzoek, dit is uitgewerkt in hoofdstuk 2.

Daarin wordt behandeld wat voor type netten er zijn en uit welke onderdelen de warmtenetten bestaan. Ook wordt de ontwikkeling in warmtenetten besproken. In dit hoofdstuk wordt ook ingegaan op de factoren die bepalend zijn

voor het functioneren van een warmtenet. Op basis van dit literatuuronderzoek wordt een (technische) karakteriseringtabel opgesteld, die als basis dient voor de karakterisering van een aantal geselecteerde cases. De typering en theorie, toegelicht in hoofdstuk 2, wordt gebruikt om de warmtenetten in de praktijk te analyseren (zie hoofdstuk 3) en om verbeteringen aan te dragen.

2. Beschrijving warmtenetten

2.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft het literatuuronderzoek naar warmtenetten. In dit hoofdstuk wordt het warmtenet geïntroduceerd en wordt besproken wat voor type warmtenetten er zijn in Nederland (paragraaf 2.2). Vervolgens wordt ingegaan op de onderdelen van een warmtenet (paragraaf 2.3). Hierin wordt het basisidee van een warmtenet uitgelegd, waarbij wordt ingegaan op de energiebronnen, de warmteafnemers en het distributienet zelf. Er wordt ingegaan op de omstandigheden waaronder het zinvol is om warmtenetten toe te passen en op de voor- en nadelen van warmtenetten.

De warmtenetten hebben zich in de loop van de jaren ontwikkeld, en kunnen daarbij getypeerd worden als 1^e, 2^e, 3^e en 4^e generatie warmtenetten. Ontwikkelingen naar meer innovatieve warmtenetten worden hierbij ook besproken.

Hiermee wordt de basis gelegd voor de typering van warmtenetten. Vanuit de typering wordt een tabel opgebouwd, die ingevuld wordt aan de hand van een aantal bestudeerde, bestaande warmtenet projecten.

2.2 Warmtenetten in Nederland

Om een idee te krijgen van de omvang van het aantal warmtenetten in Nederland wordt in deze paragraaf informatie weergegeven afkomstig uit een inventarisatie van CE Delft (Schepers & Valkengoed, 2009). Deze inventarisatie is gedaan in 2009, dus de huidige aantallen zullen nu naar verwachting groter zijn. Er wordt volgens het rapport (Schepers & Valkengoed, 2009) in Nederland onderscheid gemaakt tussen twee soorten warmtenetten: grootschalige warmtenetten en kleinschalige warmtenetten.

Tabel 2-1: Overzicht grootschalige warmtenetten In Nederland uit (Schepers & Valkengoed, 2009)

Warmtenet	Primaire energiebron	Verbruikers (x1.000)
Almere	Gas	42,9
Amernet	Steenkool	31,1
Amsterdam	Gas	7,5
Den Haag - Ypenburg	Gas	8,9
Duiven – Westervoort	Afval	8,7
Enschede	Gas	5,2
Helmond	Gas	6,4
Leiden	Gas	6,3
Purmerend	Gas	24,3
Rotterdam	Gas	43,5
Utrecht – Stad	Gas	41,7
Utrecht – Leidsche Rijn	Gas	
Utrecht - Nieuwegein	Gas	
Totaal		226,5

Grootschalige warmtenetten zijn warmtenetten met 5.000 aangesloten verbruikers of meer, voor een overzicht zie **Tabel 2-1**. Er zijn 13 warmtenetten in Nederland die in 2009 aan dit criterium voldeden. Kleinschalige warmtenetten zijn warmtenetten met minder dan 5.000 aangesloten verbruikers. Onder de kleinschalige warmtenetten vallen de stadsverwarmingsprojecten met enkele duizenden verbruikers, maar ook de blokverwarming: warmtenetten die met een beperkt aantal huizen een gezamenlijke warmteinstallatie hebben, dit betreft vaak appartementen complexen. In Nederland wordt de hoeveelheid kleinschalige warmtenetten (met name de blokverwarming) niet bijgehouden, maar wordt een warmtenet van een beperkt aantal huizen wel als volwaardig warmtenet beschouwd. Een schatting van CE Delft uit 2009 (Schepers & Valkengoed, 2009) toont aan dat er destijds 300 kleinschalige warmtenetten waren, beheerd door energiebedrijven, en 6.600 kleinschalige warmtenetten, beheerd door woningcorporaties, verenigingen van eigenaren etc.

De grootschalige warmtenetten zijn voor het grote deel warmtekracht centrales, en wat opvalt is dat het grootste deel gas als primaire energiebron heeft.

Bij kleinschalige warmtenetten ligt dat anders. In bijlage 2 van (Hof & Lier, 2019) is een overzicht opgenomen van de in april 2017 aanwezige warmtenetten in Overijssel en Gelderland. In Overijssel was in 2017 in 7 van de 25 gemeenten een warmtenet aanwezig en in Gelderland in 10 van de 49. In beide provincies heeft ongeveer de helft van de gemeenten concrete plannen voor een warmtenet, of staat de ambitie in hun beleid. De bestaande warmtenetten zijn voor het merendeel kleinschalige warmtenetten. Ook waren er in 2017 19 private initiatieven, dit zijn op één na allemaal kleinschalige warmtenetten, ze worden gestookt op hout, houtmot, pellets of biomassa.

2.3 De basisonderdelen van het warmtenet

De basis motivatie om warmtenetten toe te passen is het nuttig gebruiken van restwarmtebronnen (energie die anders verloren gaat) of het nuttig inzetten van 'lastige' brandstof. De grootschalige meest gasgestookte warmtenetten die in voorgaande paragraaf 2.2 genoemd zijn, zijn een voorbeeld van restwarmte benutting. De warmte die vrijkomt bij de elektriciteitsproductie (restwarmte) wordt daarbij nuttig ingezet door warmte te leveren aan de omgeving. Een andere motivatie is het nuttige gebruiken van lastige brandstoffen. Onder lastige brandstof wordt verstaan een energiebron die moeilijk is in te zetten voor de individuele gebruiker. Een voorbeeld daarvan is afvalverbranding. Meer voorbeelden van bronnen voor warmtenetten zijn te vinden in 2.3.1.

De functie van een warmtenet is om warmtebronnen te verbinden met afnemers (Frederiksen & Werner, 2013). Warmte, over het algemeen in de vorm van warm water, wordt ingezet voor ruimteverwarming en/of warm tapwater voor huizen, kantoorpanden, en publieke gebouwen. De warmte kan ook toepast worden als bron voor industriële processen, van een relatief lage temperatuur. Vaak worden warmtenetten toegepast voor benutten van warmte, die anders verloren zou gaan.

Een warmtedistributiesysteem (of warmtenet) bestaat uit de volgende vier hoofdonderdelen:

- Warmtebronnen of warmteleverancier(s), die de warmte leveren voor het warmtenet (zie 2.3.1) .
- Warmtevragers of warmteconsumenten met bijbehorende afleversets (zie 2.3.2).
- Distributienet, in de vorm van buizen die een verbinding maken tussen de warmtebron en de warmteafnemer (zie 2.3.3).
- Stromingsmachines en regeltechniek, zoals pompen, kleppen en regelkasten.
- De regelstrategie van het warmte netwerk en de daarmee gemoeide uitdagingen worden behandeld in het rapport regeltechnische aspecten van warmtenetwerken (Leeuwen, Wijnant, & Papa, 2019).

2.3.1 Bronnen van een warmtenet

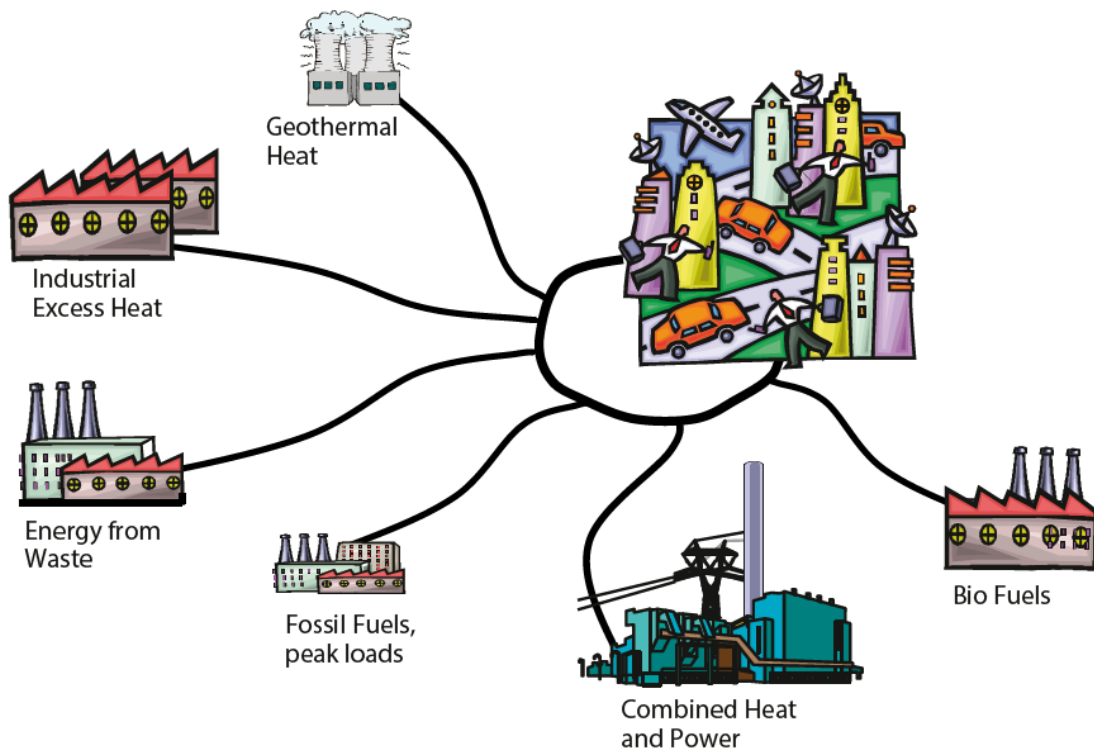
Er kunnen diverse warmtebronnen worden toegepast voor een warmtenet. Zo worden restwarmtebronnen toegepast uit (industriële) processen die niet op locatie benut kunnen worden, zoals industriële restwarmte, en warmte uit het rioolstelsel (riothermie). Daarnaast worden ook duurzame brandstoffen gebruikt, die anders niet of lastig benut kunnen worden maar door een warmtenet wel op grote schaal kunnen worden ingezet, zoals bijvoorbeeld biomassa of waterstof.

Dit is tevens het sterke punt van warmtenetten: op deze manier kunnen restwarmtebronnen, die anders onbenut blijven, of die lastig individueel bij woningen te brengen zijn, toch nuttig ingezet worden. In (Frederiksen & Werner, 2013) (blz 21), (Lake, Rezaie, & Beyerlein, 2017) en (Vliet, et al., 2016) worden de volgende bronnen voor een warmtenet genoemd, zie ook Figuur 2-1:

- Restwarmte van een elektriciteitscentrale (WKK).
- Warmte afkomstig van een afvalverbrandingsinstallatie.
- Industriële restwarmte.
- Moeilijke brandstoffen: dit zijn brandstoffen die lastig te verbranden zijn in lokale verbrandingsovens of toestellen en daarom centraal verbrand worden zoals diverse biobrandstoffen als hout, stro en residuen van olijven.
- Geothermie. Hierbij (Vliet, et al., 2016) wordt onderscheid gemaakt tussen ondiepe geothermie van 500-1500 meter en diepe geothermie (4000 meter). Bij ondiepe geothermie kunnen temperaturen van 25°C - 30°C optreden op 500 meter diepte en tot 45°C – 65°C op 1500 meter. Bij diepe geothermie (4000 meter) kunnen de temperaturen oplopen tot ca 160 °C. In alle gevallen zijn de temperaturen in de bodem afhankelijk van de locatie.
- Zonthermische energie.
- Energie uit laag temperatuur bronnen zoals oppervlakte water en grondwater (aquathermie), en warmte uit rioolsystemen (riothermie), in combinatie met een warmtepomp.

Voor het opvangen van de piekverbruiken worden vaak fossiele brandstoffen ingezet die worden verbrand in hulpstook installaties. Sommige van de bronnen worden al regelmatig toegepast bij warmtenetten, zoals bijvoorbeeld warmte uit WKK's en afvalverbrandingsinstallaties. Duurzame bronnen waarvan verwacht wordt dat ze in de toekomst een grotere bijdrage zullen leveren zijn (Frederiksen & Werner, 2013):

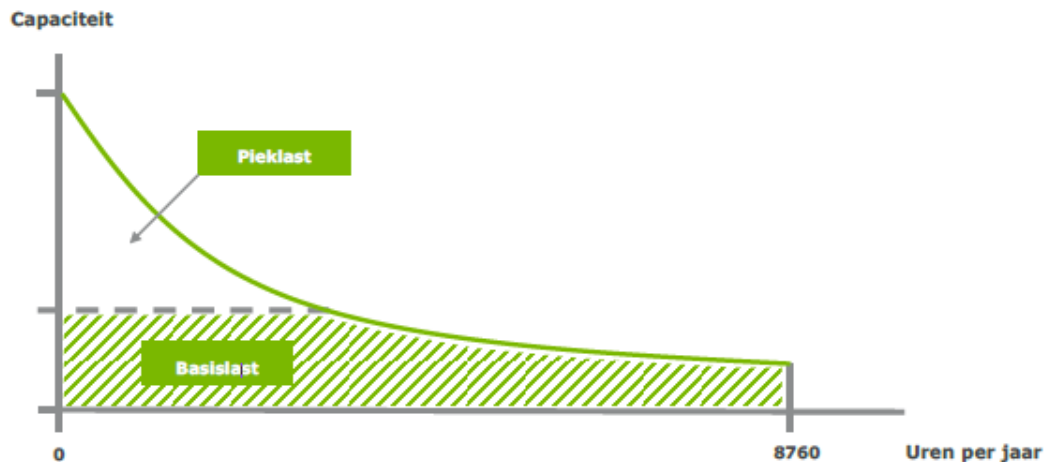
- Grote velden met zonnecollectoren, waarbij zonnecollectoren warm water leveren voor verwarmingsdoeleinden
- Grootchalige warmtepompen, die bijvoorbeeld hun warmte onttrekken aan de bodem.



Figuur 2-1: Voorbeeld van de diversiteit van warmtebronnen in een warmtedistributienetwerk (Frederiksen & Werner, 2013)

In (Vliet, et al., 2016) is een overzicht van mogelijke warmtebronnen gegeven met de voorkeurstemperatuur en schaalgrootte, daarnaast is in bijlage B-03 en B-04 van dat rapport een (kwalitatieve) beschrijving van bepalende factoren voor de haalbaarheid van deze warmtebronnen gegeven.

Voor de dimensionering van de installaties en de benodigde vermogens wordt gebruik gemaakt van een jaarbelastingduurkromme (zie *Figuur 2-2*).



Figuur 2-2: Voorbeeld van een jaarbelastingduurkromme uit (Vliet, et al., 2016)

Het is vaak niet de economisch optimale oplossing om de duurzame bron alle warmte te laten leveren, want over het algemeen is de aanschaf van een duurzame installatie veel hoger dan de aanschaf van gasketels. Daarom wordt er vaak voor gekozen om de basislast (ca. 80 tot 90 % van de warmtevraag) te voorzien met de duurzame installatie, en wordt de pieklast geleverd door goedkopere gasketels (zie belastingduurkromme *Figuur 2-2*). Op die manier is het economisch goed haalbaar een installatie grotendeels duurzaam te bedienen. Inzet van warmtebuffering werkt ook mee om pieklasten te reduceren en zorgt voor een zo groot mogelijk aandeel duurzame warmte.

2.3.2 Warmtevragers

Er kan voor warmtesystemen onderscheid gemaakt worden in hoge temperatuur vragers, wat voornamelijk in de industrie plaatsvindt, en lage temperatuur gebruikers, wat voornamelijk in de gebouwde omgeving plaatsvindt. Voor deze studie ligt de focus op de gebouwde omgeving, daarom wordt warmtegebruik door de industrie slechts kort aangestipt.

Industrieel gebruik

Als gekeken wordt naar industriële warmte (Frederiksen & Werner, 2013), (blz. 60), dan wordt onderscheid gemaakt in:

- hoge temperaturen (≥ 400 °C). Dit komt voor bij de productieverwerking van metaal, keramiek en glas. Dit bedraagt ca 43 % van de warmtevraag in de industrie.
- midden temperaturen (100-400 °C). Dit zijn voornamelijk de chemische industrie, papier- en karton- en voedselindustrie. Dit bedraagt ca 27 % van de warmtevraag.
- lage temperaturen (≤ 100 °C). In de industrie is dit vaak warmte voor ruimteverwarming, was- en spoelprocessen en voor voedselbereiding. Ook wordt deze warmte ingezet voor maken van warmwater en verwarmen van industriële panden (ca 30 % van de warmtevraag).

Gebouwde omgeving: ruimteverwarming

Voor ruimteverwarming in de gebouwde omgeving zijn de warmteafgifte systemen (of warmtegebruikers) in te delen op basis van temperatuurniveaus. De volgende temperatuur indeling worden gehanteerd (Groot, Leguijt, Benner, & Croezen, 2008), (Vliet, et al., 2016), (Lund, et al., 2015) (Gilani, Bachmann, & Kriegel, 2017)

- ZHT: Zeer hoge temperatuur > 90 (toevoer), water onder druk of stoom
- HT: Hoog temperatuur (90-70) (aanvoer- retour): dit zijn gangbare temperatuur niveaus voor wat oudere verwarmingssystemen. Er wordt gebruik gemaakt van radiatoren.

- MT: Midden temperatuur (70-40): Om het warmteverlies tegen te gaan is bij midden temperatuursystemen de temperatuur verlaagd. Ook hier wordt gebruik gemaakt van radiatoren. Vergeleken met de hoogtemperatuursystemen zijn er grotere radiator oppervlakken benodigd.
- LT: Laag temperatuur (55/50-20) (Vliet, et al., 2016) en ZLT: Zeer laag temperatuur (maximaal 35 graden toevoer): De meest recente ontwikkeling zijn de lage en zeer temperatuur warmteafgifte systemen. Voor de lage en zeer lage temperatuur systemen zijn aanpassingen benodigd aan de warmteafgifte systemen, ten opzichte van conventionele hogere temperatuur systemen, omdat bij lage temperaturen grote warmtewisselende oppervlakken benodigd zijn. Er wordt gebruik gemaakt van de volgende systemen (Vliet, et al., 2016):
 - Radiator met radiatorventilator: Door een ventilator op de radiator te plaatsen wordt de warmtecapaciteit van de bestaande radiator verhoogd.
 - LT – radiatoren en convectoren: Deze radiatoren/convectoren hebben een groter warmtewisselend oppervlak en zijn speciaal ontwikkeld voor lage temperatuur.
 - Vloer- wand- of plafond verwarming: Met dit systeem kan een zeer groot warmtewisselend oppervlak worden gecreëerd, waarmee bij lage temperatuur verwarmd kan worden. Dit is de meest ingrijpende oplossingen in geval van renovatie.

Bij het toepassen van lage en zeer lage temperatuursystemen moeten er daarnaast aanvullende isolatiemaatregelen worden genomen, om voldoende comfort te handhaven in de woning.

Gebouwde omgeving: Warm Tapwater

De warmte uit het warmtenet wordt veelal ook toegepast voor de bereiding van warm tapwater. De benodigde temperatuur voor tapwater is minstens 55 °C (Frederiksen & Werner, 2013), blz 54) à 60 graden (Vliet, et al., 2016). Deze temperatuur is vereist vanwege de kans op legionella in leidingen bij temperaturen beneden de 55 °C. In het geval van een lage temperatuur of zeer lage temperatuur warmtenet, moet het warm tapwater op een andere manier worden verkregen door bijvoorbeeld gebruik te maken van booster-warmtepompen of elektrische boilers (Vliet, et al., 2016).

Afleversets

De binneninstallatie van de warmteafnemer wordt via een afleverset aangesloten op het warmtedistributienet. Deze afleverset meet en regelt het warmteverbruik. Het water van het warmtenet stroomt vaak direct de woning in. Het gebeurt ook dat de warmte wordt over gedragen door een warmtewisselaar. In beide gevallen kunnen de specificaties (druk en temperatuur) van de binneninstallatie verschillen van die in het warmtenet. De warmte voor warm tapwater wordt altijd via een warmtewisselaar onttrokken aan het warmtenet, omdat water uit het warmtenet niet direct gebruikt kan worden als tapwater (Friedel, Oostendorp, & Wagener, 2013), (DHC Holland, 2014). RVO heeft een onderzoek laten doen om inzicht te krijgen in de afleverinstallaties die in Nederland worden gebruikt en de rol van deze afleversets. (DHC Holland, 2014).

2.3.3 Distributienet

Het distributiedeel van het net bestaat uit leidingen (aanvoer- en retourleidingen) die de warmte van de opwekker overbrengt naar de warmtevragers.

Afhankelijk van de grootte van het net zijn er diverse uitvoeringsvormen mogelijk. In het rapport van CE (Schepers & Valkengoed, 2009) zijn de bestaande warmtenetten in Nederland geïnventariseerd, waarbij onderscheid is gemaakt tussen grootschalige en kleinschalige warmtenetten.

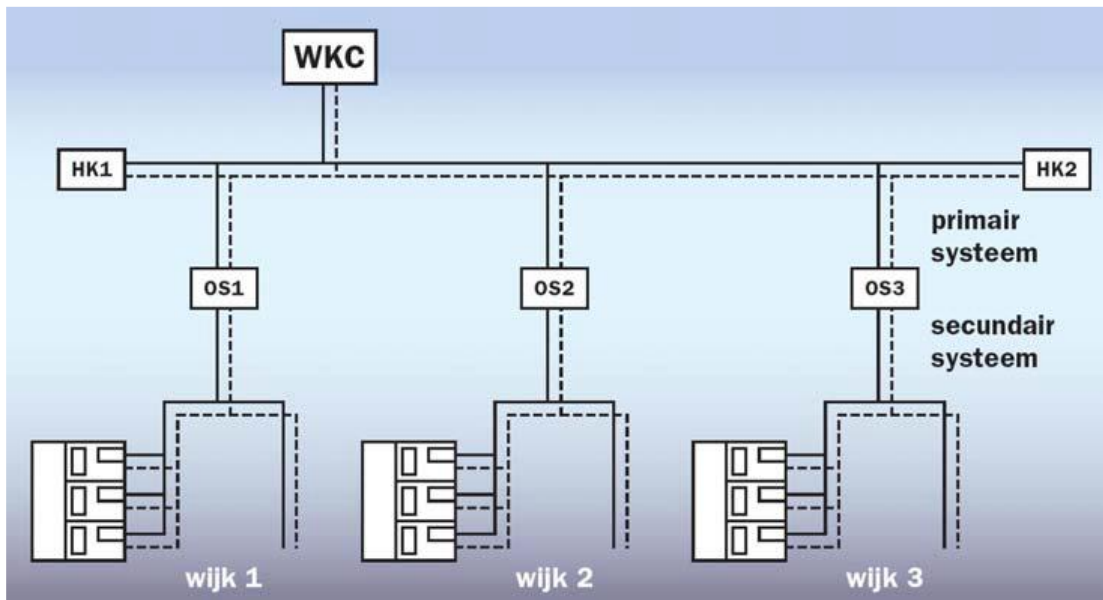
Een distributienet kan bestaan uit een primair hoofdtransportnet (hogere druk en temperatuur) en secundaire transportnetten (lagere druk en temperatuur: distributie in een gebouw of een wijk). Hierbij is het secundaire net gescheiden van een primair netwerk door een warmtewisselaar. Dit zie je vaak terug bij grootschalige netten zie 2.3.3.1. Bij kleinschalige netten kan er sprake zijn van maar één net: een wijknet, zie 2.3.3.2.

2.3.3.1 Grootchalig warmtenet

Het rapport van CE Delft (Schepers & Valkengoed, 2009) beschrijft een typische opbouw voor grootchalige warmtenetten. De warmte voor het warmtenet wordt geleverd vanuit één of meerdere centrale bronnen en komt terecht in het distributienet.

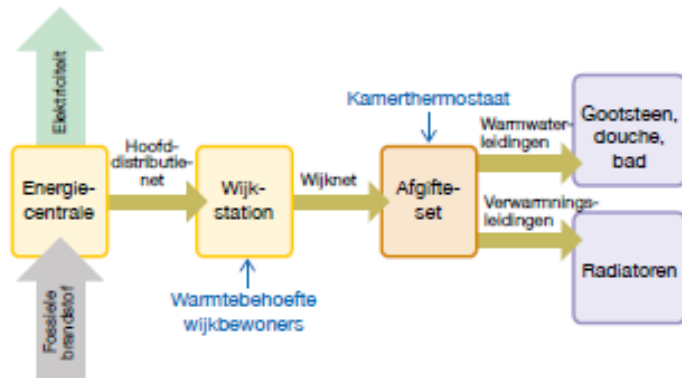
Dit distributienet bestaat uit een primair hoofdtransportnet en een secundair distributienet. De warmte wordt vanuit het primair net naar het secundaire net overgedragen. Dit vindt plaats met behulp van een warmtewisselaar die zich bevindt in het onderstation (OS) of het warmteoverdrachtsstation (WOS), zie *Figuur 2-3* voor een schematische weergave.

Het distributienet bevat ook hulpstookinstallaties (HK), deze vangen het piekverbruik op of dienen als backup. Dit zijn veelal gasketels.



Figuur 2-3: schematische weergave van grootchalig warmtenet, WKC= Warmtekracht centrale HK=hulpstation, OS= onderstation uit (Schepers & Valkengoed, 2009)

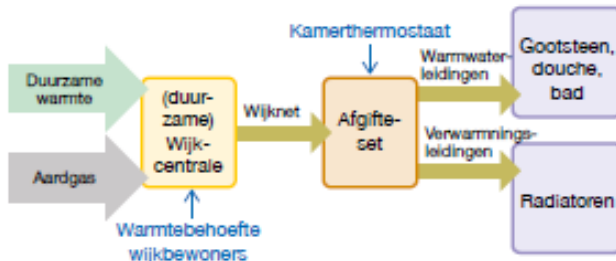
In *Figuur 2-4* is de schematische weergave zichtbaar van een grootchalig warmtenet, aangesloten op de restwarmtestroom van een elektriciteitscentrale (Schepers & Valkengoed, 2009)). De restwarmte die vrijkomt wordt gedistribueerd via het hoofddistributienet (primaire net) naar het secundaire net. Het verwarmingsnet van de woning is via een afleverset aangesloten op het (secundaire) warmtenet.



Figuur 2-4: schema van een grootschalig warmtenet (Friedel, Oostendorp, & Wagener, 2013)

2.3.3.2 Kleinschalig warmtenet

Kleinschalige warmtenetten worden in Nederland meestal toegepast om duurzaamheid op wijkniveau te creëren (Friedel, Oostendorp, & Wagener, 2013). In *Figuur 2-5* staat de schematische weergave van een kleinschalig warmtenet. Waar bij grootschalige warmtenetten een hoofddistributienet (primaire net) en een wijknet (secundair net) aanwezig is, is bij kleinschalige in principe alleen een wijknet aanwezig. In de woning is net als bij grootschalige netten een afleverset aanwezig.



Figuur 2-5: schema van een kleinschalig warmtenet (Friedel, Oostendorp, & Wagener, 2013)

2.3.3.3 Grootschalig versus kleinschalig warmtenet

In het boek van GasTerra (Friedel, Oostendorp, & Wagener, 2013) worden de eigenschappen van grote en kleinschalige netten in een tabel met elkaar vergeleken, zie

Tabel 2-2. Er wordt gesteld dat grootschalige netten worden aangelegd vanwege de behoefte om restwarmte te hergebruiken, terwijl kleine netten worden aangelegd vanuit de behoefte om de wijk zo duurzaam en efficiënt mogelijk van energie te voorzien. Voor de exploitant van de wijkcentrale is exploitatie van warmte zijn hoofdfocus. Dit veroorzaakt verschillen in de aard van de netten en exploitatiemodellen.

Uit deze tabel blijkt dat te verwachten is dat nieuwe ontwikkelingen op het gebied van duurzame warmtenetten daarom hoofdzakelijk kleinere warmtenetten zullen zijn. We zien inderdaad in de praktijk dat recente projecten voornamelijk kleinschalige warmtenetten betreffen. (zie beschrijvingen cases in hoofdstuk 3). Ook bepaalt dit verschil in belang de achterliggende business modellen voor de warmtenetten, zie (Hof & Lier, 2019).

Tabel 2-2 grootschalig versus kleinschalige warmtenetten (Friedel, Oostendorp, & Wagener, 2013)

Klassiek en grootschalig	Modern en kleinschalig
uitgangspunt	
Restwarmte beschikbaar tegen relatief geringe kosten. Grootschalig distributienet om zo veel mogelijk warmte te benutten.	Warmte is uitgangspunt van de business case. Kleinschalig distributienet om warmtevraag en productie lokaal op elkaar af te stemmen.
Warmteproductie	
Meestal op basis van aardgas of kolen, soms afvalverbranding.	Meestal duurzame systemen, of wijk-wkk.
Leidingnet	
• Hoge temperatuur (levering tot 130 °C, retour > 90 °C) • Grote diameter hoofdleidingen (meer dan 1 meter doorsnede) • Lange afstanden tussen centrale en klant (tot meer dan 10 km) • Tweepijpsysteem: aanvoer en retour voor zowel ruimteverwarming als warm water	• Meestal lagere leveringstemperatuur • Beperkte diameter distributienet • Korte afstanden • Systeem afgestemd op behoefte en opwek mogelijkheden, soms drie pijpen voor aanvoer ruimteverwarming, aanvoer warm water en retour.
Toepassing	
Afhankelijk van standplaats centrale, vaak in bestaande wijken.	Vooral in nieuwbouwwijken.
Transportverliezen	
Door lange transportafstand en hoge temperatuur veel verlies en lekkage. Doordat voor de warmte relatief weinig fossiele brandstof extra verstookt wordt, is dit acceptabel.	Efficient leidingsysteem met beperkte verliezen door een relatief lage transporttemperatuur en korte afstanden.

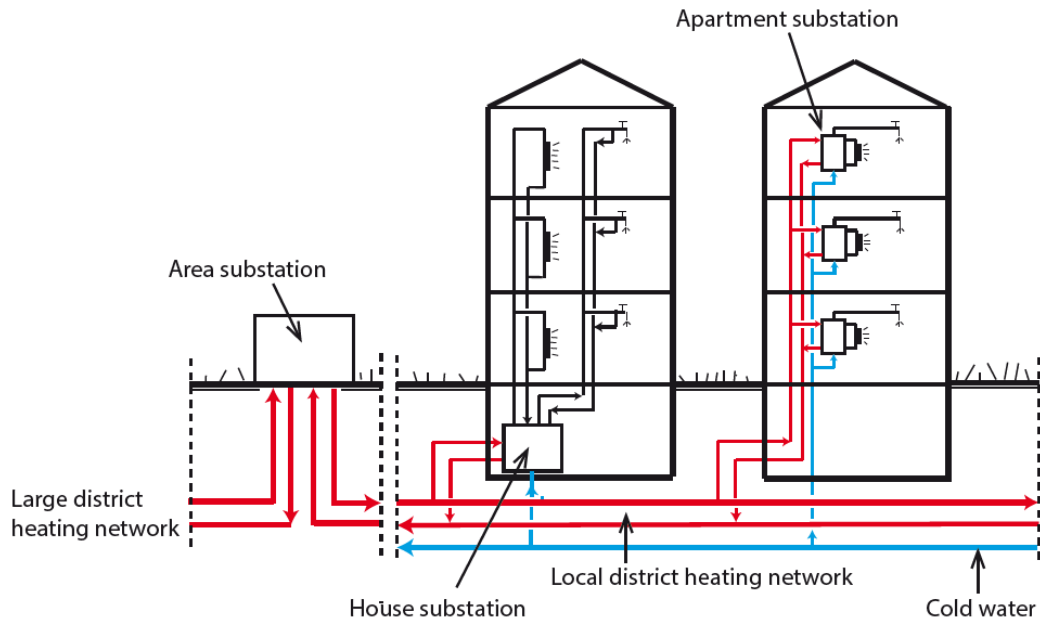
2.3.3.4 Onderstations

In warmte distributiesystemen wordt er gewerkt met onderstations. In een onderstation wordt de temperatuur en de druk verlaagd. Reden van deze verlaging is dat er goedkopere apparatuur kan worden toegepast als de druk en temperatuur verlaagd worden. Bovendien is het veiliger om binnenshuis een lagere druk en temperatuur toe te passen. De apparatuur die bij onderstations wordt toegepast, bestaat voornamelijk uit warmtewisselaars en regelkleppen.

In warmte systemen kan er sprake zijn van meerdere onderstations (substation) (Figuur 2-6). De onderstations worden zo dicht mogelijk bij de afnemer geplaatst, over het algemeen in het betreffende pand, het kan op verschillende plekken gesitueerd zijn en bestrijkt een bepaald onderdeel van een netwerk bijvoorbeeld:

- een wijk
- een huis
- een appartement

Het onderstation is ook de plek waar de afrekening plaats vindt. In Duitsland is het verplicht af te rekenen op basis van individuele metingen in een onderstation, vandaar dat ze in Duitsland per appartement zijn geplaatst.



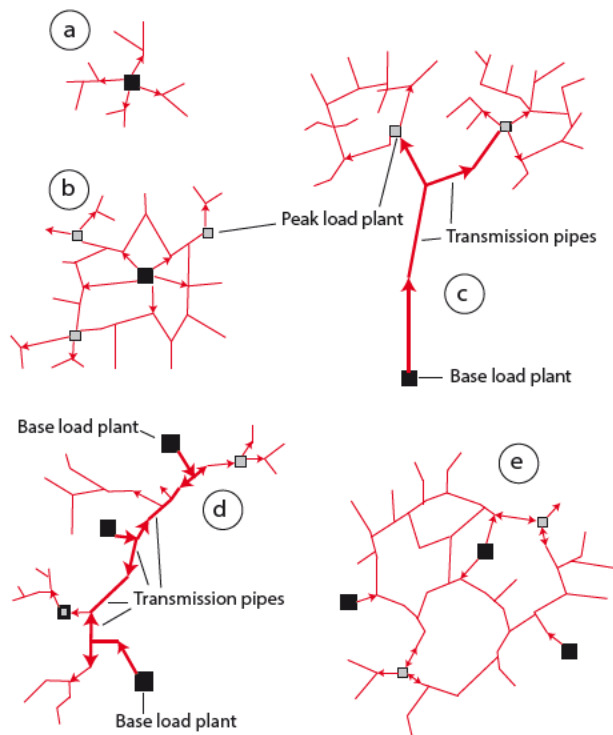
Figuur 2-6: diverse typen substations in een warmtenetwerk (Frederiksen & Werner, 2013)

2.3.3.5 Netstructuren

Er zijn diverse netstructuren te onderscheiden bij warmtenetten (Frederiksen & Werner, 2013). Een warmtenetwerk begint vaak als een boomstructuur en bouwt dan uit naar een netwerk structuur. Diverse warmteleveranciers kunnen zorgen voor de warmtetoevoer, er is dan één basisstation die zorgt voor de basis hoeveelheid warmte (bij voorkeur duurzaam). Daarnaast zijn er toevoyerpunten die zorgen voor de (kortdurende) pieklast voorziening. Verbinden van netwerken leidt tot hogere leveringszekerheid en minder kosten.

De volgende typische netwerkstructuren worden onderscheiden (zie *Figuur 2-7*) :

- een centrale locatie: er is in het midden een warmteleverancier, vanuit daar vertrekken de leidingen naar de substations. Dit is vaak typisch voor kleine systemen.
- de basislast wordt centraal opgewekt, en decentraal zijn er pieklast centrales. Bij lage warmtevraag wordt geleverd vanuit het basis station. Bij hogere warmtevraag springen de piekvoorzieningen bij, voordeel hiervan is dat de leidingdiameters van de hoofdleidingen vanaf de basis centrale beperkt kunnen blijven.
- een gemeenschappelijke transmissie leiding naar de verbruikers dit wordt o.a. toegepast als er een grote WKK is, buiten de stad. Vervolgens zijn er decentraal vertakkingen, de piekvoorziening is dan vaak geplaatst bij de stadscentra. Voorbeeld hiervan is de backbone in Hengelo, ook Hamburg en Praag beschikken over een dergelijke netstructuur.
- een gemeenschappelijke transmissie leiding met aftakkingen. Er zijn verschillende basis stations verdeeld over het netwerk.
- Groot geïntegreerd netwerk: de stadsdelen hebben hun eigen basis station, en op momenten van weinig warmtevraag zou één basis station meerdere stadsdelen kunnen voorzien. Deze structuur is typisch voor grote steden, met meer dan een half miljoen inwoners, voorbeelden zijn o.a. te vinden in Moskou en Kopenhagen.



Figuur 2-7: voorbeeld van netwerk structuren (Frederiksen & Werner, 2013)

De netwerk structuren zijn van invloed op de drukverliezen, de warmteverliezen en de meet- en regelstructuren.

2.4 Voor- en nadelen van warmtenetten

Bij het benutten van restwarmte of warmte uit duurzame bronnen of het verbranden van lastige brandstoffen is een warmtenet vaak de enige mogelijkheid om deze warmte te transporteren en zo dus de warmte te kunnen benutten. Dat is direct één van de belangrijkste voordelen van een warmtenet.

Een warmtenet heeft daarnaast onder andere de volgende voordelen (Frederiksen & Werner, 2013) voor de klant:

- Het is een comfortabele, simpele, betrouwbare en een continue warmtebron.
- Er is weinig oppervlakte nodig voor aansluiting en er is een lage investering voor de apparatuur bij de klant.
- Het brengt een laag veiligheidsrisico (brand, explosie) met zich mee vanwege ontbreken van brandstof bij de klant.

Als gekeken wordt naar de milieueffecten van warmtenetten, en uitstoot naar de omgeving kunnen ook nog de volgende voordelen genoemd worden (Frederiksen & Werner, 2013), blz 268 (in vergelijking met kleinere of individuele installaties):

- Door gebruik van duurzame bronnen neemt de CO₂ uitstoot af.
- Omdat de brandstof op een grote schaal verbrand wordt, kan er op grote schaal geïnvesteerd worden in schonere verbrandingstechnologie en vermindering van uitstoot dan het geval is bij kleinere installaties.
- Betere controle op kwaliteit brandstof door schaalgrootte.
- Striktere wetgeving op grote installaties.
- Monitoring van de emissies is beter op grote installaties.

Warmtenetten hebben echter ook nadelen zoals:

- Hoge investeringskosten.
- Grote distributie verliezen, met name bij hoge temperatuur netten, die op kunnen lopen tot ca 30 %.

De klanten van de warmtenetten zien daarnaast ook de volgende nadelen:

- Geen onderhandelingsruimte in de prijs voor vanwege monopolie positie.
- Hoge kosten om over te stappen naar een concurrerende verwarmingsoptie.
- Vanwege de grootschaligheid wordt bij storingen in het systeem een groot aantal klanten getroffen.

De nadelen hebben gevolgen voor de acceptatie van warmtenetten in de praktijk. Bij invoering van warmtenetten is daarom is een goede voorlichting nodig voor de gebruikers.

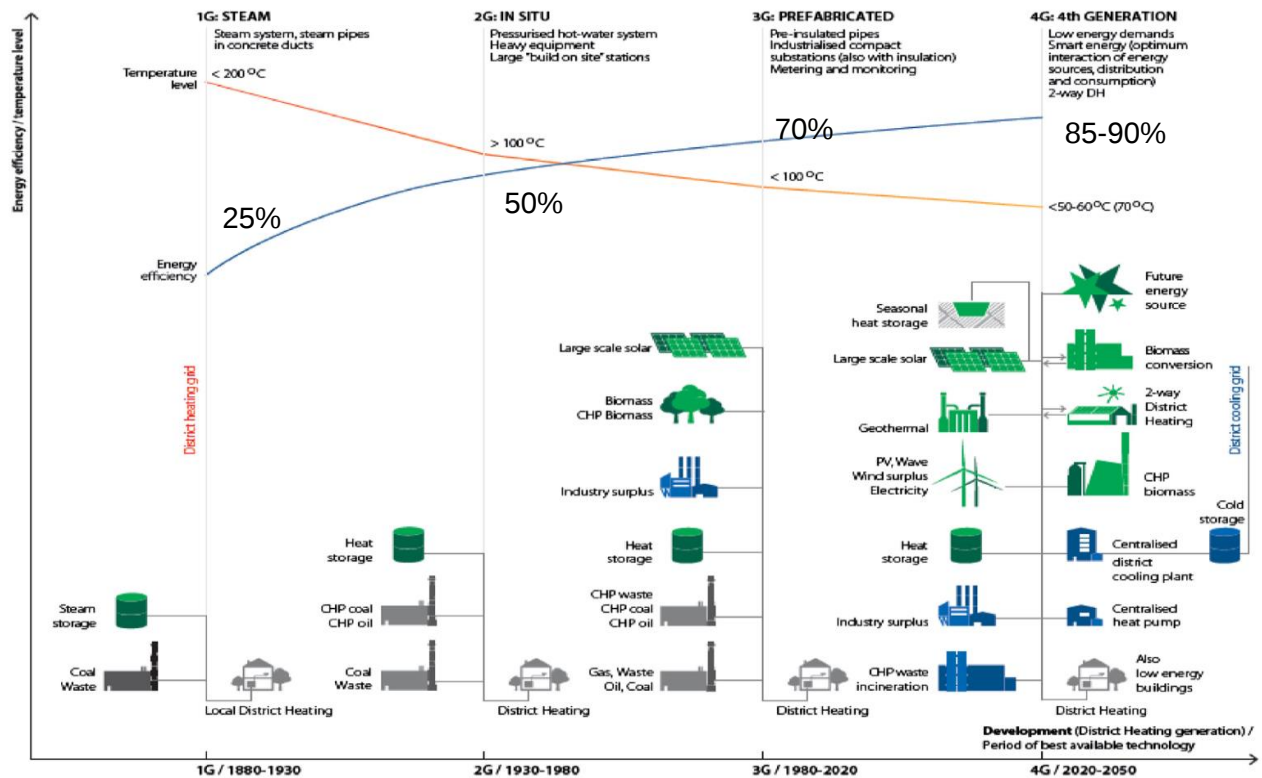
Ook kan een nadeel zijn dat een warmtenet innovatie tegenhoudt (Friedel, Oostendorp, & Wagener, 2013). Indien een warmtenet gebruik maakt van restwarmte van een industriële partij, kan het zijn dat de restwarmte afneemt doordat die partij energiezuiniger gaat werken of produceren. De warmte vragende kant heeft dan niet genoeg warmte en er moet bijgestookt worden met fossiele brandstoffen. Hierdoor kan innovatie geblokkeerd worden. Er moet van tevoren worden nagedacht hoe dit soort innovaties kunnen worden ingepast (mogelijk door inzet van andere bronnen). Ook zal de toenemende graad van isolatie van woningen de warmtevraag doen afnemen. Daarnaast moet er rekening worden gehouden met de continuïteit van de restwarmte. Als de industriële warmtebron wegvalt door bijvoorbeeld productiestop of faillissement dan moet er een backup systeem zijn.

2.5 Typering warmtenetten

Om warmtenetten te typeren wordt er vaak gekeken naar de temperaturen in het net, maar ook is er een indeling in generaties. In deze paragraaf worden beide besproken, en wordt de link tussen beide gelegd.

2.5.1 Generaties warmtenetten

Over de laatste jaren hebben zich ontwikkelingen voorgedaan in warmtenetten, de benaming die men daarbij vaak hanteert is eerste, tweede, derde en vierde generatie warmtenetten. De ontwikkelingen van deze warmtenetten staan beschreven in (Frederiksen & Werner, 2013), (Gudmundsson, 2019). In figuur 2-8 is de ontwikkeling van warmtenetten in de tijd zichtbaar.



Figuur 2-8 ontwikkeling warmtenetten van eerste naar vierde generatie (Gudmundsson, 2019)

De eerste generatie warmtenetten zijn hoge temperatuurnetten op basis van stoom. Naarmate de ontwikkeling van warmtedistributenetten toeneemt, dalen de temperaturen van de warmtenetten en stijgt de efficiency van de netten. Dit is ook te zien in figuur 2-8. De derde generatie is de huidige generatie warmtenetten, terwijl de vierde generatie warmtenetten op dit moment in opkomst is, en het is de fase van ontwikkeling waarin de warmtenetten nu verkeren. Dit heeft betrekking op lage temperatuur warmtenetten, en de toepassing van duurzame bronnen. De belangrijkste kenmerken van de 4 generaties warmtenetten worden achtereenvolgens besproken in de volgende paragrafen.

2.5.2 Eerste generatie warmtenetten

Bij eerste generatie warmtenetten wordt de warmte via stoom verspreid via leidingen, geplaatst in een ondergrondse betonnen koof, of soms in bovengrondse geïsoleerde leidingen (Frederiksen & Werner, 2013), (Gudmundsson, 2019). Tussen 1880 en 1930 waren dit veel gebruikte systemen voor warmtedistributie. Tegenwoordig zijn deze warmtedistributie systemen nog te vinden in Frankrijk, Duitsland en de Verenigde Staten. Typische stoomtemperaturen zijn temperaturen tot 300°C en drukken tot 20 Bar. De energie wordt voornamelijk geleverd aan industriële processen. De warmte opwekking vindt plaats met fossiele brandstoffen. Nadeel van dit soort hoge temperatuur systemen zijn de warmteverliezen, en dus hoge energieverbruiken (efficiency van circa 25%). De energieverliezen waren destijds echter relatief onbelangrijk. De warmtedistributie vindt plaats met behulp van stoomleidingen. In de retourleiding wordt condensaat afgevoerd. In sommige gevallen zijn er geen retourleidingen, en wordt het condensaat geloosd. Het probleem met condensaat retourleidingen is dat het condensaat zuurstof en CO₂ absorbeert, waardoor het condensaat hoog corrosief is. Om corrosie problemen te voorkomen moeten de leidingen gemaakt worden van RVS, hetgeen hoge

kosten met zich meebrengt. Stoomdistributiesystemen hebben relatief grote verliezen vergeleken met distributie van warm water (Frederiksen & Werner, 2013), want behalve de hogere warmteverliezen (door de hogere temperatuur) zijn de drukverliezen in de leidingen van stoomsystemen ook groter. Deze verliezen zijn circa een factor 10 hoger dan in watersystemen. Er is daardoor meer pompenergie nodig voor de stoomdistributiesystemen vergeleken met die van warm water. Andere verliezen die optreden zijn warmteverliezen in de leidingen, als gevolg waarvan condensaat vorming optreedt. Dit condensaat moet dan afgevoerd worden, om te voorkomen dat de stoom geblokkeerd wordt.

Daarbij hebben deze eerste generatie stoomsystemen een hoog veiligheidsrisico, ivm verwondingen van omstanders die optreden bij lekken of explosies.

Naast nadelen heeft stoom t.o.v. van warm water ook een aantal voordelen. Eén van de voordelen is dat stoom een hogere energieinhoud heeft dan water, waardoor er meer energie kan worden overgedragen. Deze stoomsystemen worden tegenwoordig niet meer toegepast voor aanleg van nieuwe warmtedistributiesystemen.

2.5.3 Tweede generatie warmtenetten

De tweede generatie warmtenetten zijn vergelijkbaar met de eerste generatie warmtenetten: de leidingen liggen ondergronds in betonnen koven, maar nu wordt er warm water gedistribueerd (Frederiksen & Werner, 2013) (Gudmundsson, 2019). Dit warm water is oververhit (>100 graden) en onder druk. Deze systemen werden hoofdzakelijk tussen 1930 en 1980 aangelegd. Vergeleken met de eerste generatie warmtenetten is de efficiëntie hoger en worden er meer verschillende bronnen toegepast. De warmte wordt onder andere verkregen in WKK's wat energiewinst oplevert t.o.v. niet gecombineerde energieopwekking. Het brandstof verbruik werd met 50% gereduceerd t.o.v. eerste generatie systemen, de efficiëntie van de tweede generatie warmtesystemen ligt rond de 50%.

Door de relatief hoge temperatuur zijn er relatief kleine warmteuitwisselende oppervlakken nodig, waardoor de hoeveelheid benodigd materiaal en de kosten in de te verwarmen ruimtes relatief laag zijn.

2.5.4 Derde generatie warmtenetten

Vanaf de jaren 1970 doet de derde generatie warmtenetten zijn intrede. Dit heeft te maken met de toenemende drang om energie te besparen. Nieuwe ontwikkeling is dat de leidingen omkleed zijn met isolatie en een plastic mantel (Frederiksen & Werner, 2013) en dat de buizen direct in de grond worden begraven, zie Figuur 2-. Door de betere isolatie nemen de energieverliezen af. Een andere verbetering van de derde generatie is het lagere temperatuurniveau, waardoor eveneens de warmteverliezen afnemen. In de warmtenetten wordt water onder druk rondgepompt. De systemen worden in de praktijk meestal bedreven met temperaturen onder de 100 graden. De lagere temperaturen (tov 2^e generatie) hebben onder andere gunstig effect op het gebruik van duurzame bronnen, want hierdoor worden bijvoorbeeld restwarmtestromen (duurzame bronnen) beschikbaar op lage temperatuur ook beter inzetbaar (Gudmundsson, 2019).

De derde generatiewarmtenetten worden volop toegepaste vanaf 1980 tot heden. De meeste huidige warmtenetten zijn derde generatie netten.



Figuur 2-9: 3e generatie geïsoleerde leidingen met plastic omhulsel direct in grond (Gudmundsson, Distribution of district heating 3rd generation, 2019)

2.5.5 Vierde generatie warmtenetten

Een volgende stap in verbetering van energieverbruik in warmtenetten is de vierde generatie warmtenetten (Gudmundsson, Distribution of district heating 4th generation, 2019). Deze periode loopt naar verwachting van 2020-2050. De vierde generatie warmtenetten maakt gebruik van Lage Temperatuur (LT) warmtenetten, waarbij zowel de toevoer als de retourtemperatuur lager is dan bij derde generatie warmtenetten. De temperaturen liggen op maximaal 70 graden aanvoertemperatuur. Door deze lage nettemperaturen zijn er minder warmtenetverliezen, en er zijn ook meer mogelijkheden om duurzame bronnen toe te passen.

In deze warmtenetten worden in toenemende mate smart energy systems toegepast in combinatie met korte en lange termijn energieopslag. De gelijktijdige vraag en aanbod van energie wordt daarbij gecombineerd en gecoördineerd. Deze systemen zorgen voor besparing van energie en kosten. Enkele van deze technologieën worden al toegepast in de huidige warmtedistributienetwerken, en verwacht wordt dat vanaf 2020 deze technieken breed ingezet worden. Enkele voorbeelden van Europese LT netten zijn te vinden in bijlage 1.

Enkele belangrijke voordelen van de lage temperaturen van de vierde generatie warmtenetten zijn (Frederiksen & Werner, 2013), blz 496:

- Meer warmteterugwinning uit rookgascondensatie bij verbranding van biomassa of afval door de lage retourtemperatuur van het LT- systeem.
- Hogere warmtewinning uit geothermische energie of industriële afvalwarmte, eveneens door de lage retourtemperatuur van het LT- systeem.
- Hogere rendementen van zonne-energie doordat de verliezen lager zijn, vanwege lagere temperatuur.
- Hoger elektrisch rendement van stoom gebaseerde WKK-installaties, omdat de condensor temperatuur en druk lager is, waardoor er meer elektriciteit gegenereerd kan worden.
- Cascadering van warmtenetten, door de vierde generatiewarmtenetten aan te sluiten op de retourleidingen van derde generatie warmtenetten.

2.5.6 De uitdagingen voor vierde generatie warmtenetten

Volgens Lund (Lund, et al., 2015) spelen warmtenetten een belangrijke rol in het verduurzamen van de warmtevoorziening, maar ze moeten verder ontwikkeld worden om warmte distributieverliezen verder te reduceren en zo de efficiëntie te verhogen.

Een belangrijke voorwaarde voor een efficiënt netwerk is dat warmtenetten enkel worden aangelegd in gebieden met een hoge warmte dichtheid. Daarnaast moeten warmtenetten in de toekomst efficiënt blijven dus ook als de

warmtevraag afneemt, moet er voldoende warmtevraag in het gebied overblijven om te zorgen dat de efficiency van het warmtenet voldoende hoog blijft.

Om een goede rol te kunnen spelen in een duurzame toekomst moeten warmtenetten voldoen aan de volgende vijf voorwaarden volgens Lund (Lund, et al., 2015):

1. Lage temperatuur warmte leveren voor ruimteverwarming en warm tapwater naar bestaande gebouwen, energie gerenoveerde gebouwen en energiebesparende nieuwbouw;
2. Warmte kunnen leveren met lage distributieverliezen;
3. Gebruik maken van lage temperatuur bronnen en duurzame bronnen gebruiken als zon en geothermie;
4. Inpasbaar zijn in een 'smart energy system', waarbij elektriciteitsnetwerken, gasnetwerken, vloeistof- en warmtenetwerken zijn geïntegreerd;
5. Verzekerd zijn van een passende planning en kosten met betrekking tot het beheren en het investeren in duurzame energie systemen.

Hierbij is het belangrijk dat ook de gebouwen energie efficiënt en goed geïsoleerd zijn vanwege het comfort bij lagere temperaturen.

2.5.7 Temperatuurniveaus warmtenetten

Er is in de literatuur gekeken wat de temperatuurniveaus zijn van de warmtenetten in de praktijk, en onder welke generatie deze te scharen zijn. Er wordt een breed scala aan temperatuurtrajecten teruggevonden. Toegepaste temperatuurtrajecten variëren sterk, evenals temperatuurverschil tussen aanvoer en retourleidingen. Het is lastig om de warmtenetten exact in te delen als een bepaald type net, aangezien er geen scherpe grenzen zijn waarbij een net onder een bepaalde generatie warmtenetten valt. Ook zijn er grotere warmtenetten die primaire en secundaire netten hebben, waardoor er verschillende temperatuurniveaus kunnen zijn in één warmtenet. Onderstaand een overzicht van enkele praktijkdata.

Overeenkomstig de temperatuurindeling van de warmtevragers, zie hoofdstuk 2.3.2, kan een vergelijkbare indeling voor temperatuurniveaus van warmtenetten worden gehanteerd gebruik makend van de diverse generaties warmtenetten.

- HT: Hoog temperatuurnet: 120 -90 °C (primair net: aanvoer-retour).

De hoge temperatuurnetten komen over het algemeen voor bij grootschalige netten waar restwarmte benut wordt van afvalverbranding of van fossiel gestookte elektriciteitscentrales. Deze netten beschikken over een primair en secundair net waarbij voor een primair net gemiddeld gezien de bovenstaande temperaturen gelden (zie ook bijlage 2 voor meer detail). Qua temperatuurniveau valt het primair net onder een tweede generatie warmtenet en het secundaire net, 100-70 °C (aanvoer-retour), kan dan onder een derde generatie warmtenet geschaard worden.

- MT: Midden temperatuurnet: 90-50 °C (gemiddeld, aanvoer- retour).

Bij nieuwere netten zijn de temperaturen lager. In (Frederiksen & Werner, 2013) is een onderzoek gedaan naar aanvoer- en retourtemperaturen van Zweedse warmtenetten. Voor Zweedse systemen kwam daar een gemiddelde uit van aanvoer 86 °C en retour 47 °C, dit gemiddelde is gebaseerd op een onderzoek van 142 warmtedistributiesystemen zie Figuur 2-0. Deze temperatuurtrajecten komen overeen met derde generatie warmtenetten.

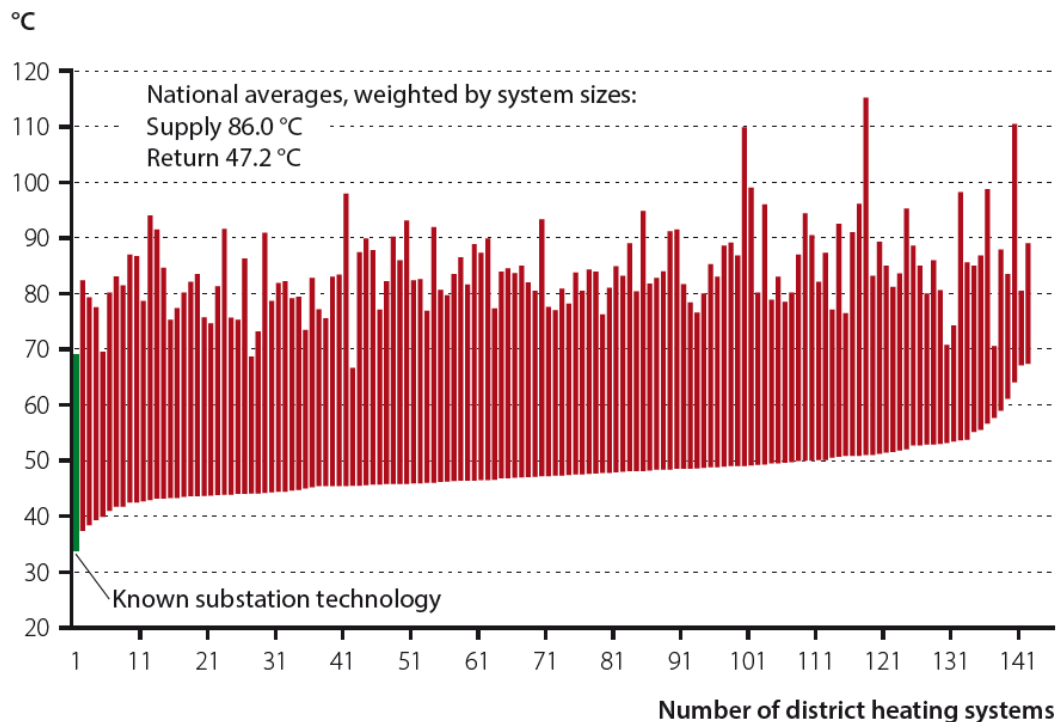
Uit een studie naar 44 Zwitserse netwerken (Nussbaumer & Thalmann, 2014) blijkt dat 90 % van de netwerken een aanvoertemperatuur heeft tussen de 70 en 100 °C, en dat het temperatuurverschil tussen aanvoer en retour 20-40 graden is. De meeste netwerken vallen dus onder het middentemperatuurtraject.

- LT: Laag temperatuurnet (aanvoer lager dan 70 °C) (Vliet, et al., 2016).

Voor een goed functionerend laag temperatuursysteem is een aanvoer temperatuur van 69 °C en retour temperatuur van 34 °C mogelijk (Frederiksen & Werner, 2013). Dat temperatuurtraject komt overeen met een vierde generatie warmtenet. In (Vliet, et al., 2016) zijn een aantal voorbeelden van lage temperatuur warmtenetten opgenomen, zowel binnen Nederland als daarbuiten, zie ook bijlage 1. Hierbij zijn de aanvoer

temperaturen maximaal 55 °C. Volgens (Lund, et al., 2015) vallen deze onder de vierde generatie warmtenetten.

- ZLT: Zeer lage temperatuur (aanvoer temperatuur lager dan 50 °C).
In Willems (Willems, Kunnen, Schurink, Nollet, & Haas, 2017) wordt over ZLT temperatuurnetten gesproken als een vijfde generatie warmtenet. Dit is een toekomstvisiedocument van het consortium OLEC Optimalisering Lokale Energie infrastructuur, dit zou gaan spelen van 2025-2070. Het betreft lage temperatuurbronnen afkomstig uit restwarmtestromen en lokale, duurzame en ZLT-warmtebronnen, zoals WKO. De definitie van 5^e generatie warmtenetten wordt (nog) niet eenduidig gehanteerd. Soms wordt het gebruikt om aan te duiden dat het gaat om temperaturen onder de 50 graden, met uitsluitend duurzame bronnen, maar dat valt formeel ook in de definitie van vierde generatie. Soms gaat men verder en spreekt men over een 'slim warmtenet', d.w.z. goede afstemming vraag en aanbod, en tevens interactie tussen opwekking en buffering van elektriciteit en warmte, dit zou ook een vijfde generatie net zijn maar valt in principe ook nog onder de eigenschappen van de vierde generatie.
- Bronnennet:
Als de temperatuur van het net zo rond de 10 à 15 graden ligt, wordt er gesproken over een 'bronnennet', omdat het net kan dienen als bron voor een warmtepomp. Het temperatuurniveau is te laag om direct wat mee te doen voor verwarmingsdoeleinden.



Figuur 2-10: Overzicht van jaarlijks gemiddelde aanvoer- en retourtemperaturen in Zweden van 142 warmtedistributie systemen (Frederiksen & Werner, 2013). Bovenkant van de staaf is de aanvoertemperatuur, de onderkant is de retourtemperatuur.

2.6 Overzicht temperatuurniveaus warmtenetten en warmtevragers

Onderstaande samenvattende tabel bevat een overzicht van de temperatuurniveaus van warmtenetten en de warmtevragers, tevens is zichtbaar welke combinatie van gebruikers en warmtenetten er normaal gesproken

voorkomen, zie **Tabel 2-3**. In Bijlage 3 is een uitgebreider overzicht opgenomen van karakteristieke aspecten van de diverse generaties warmtenetten uit Lund (Lund, et al., 2015).

Tabel 2-3: combinatie van warmtenetten en warmtevragers mbt temperatuurniveaus

	1st generatie	2de generatie	3de generatie	4de generation
medium	Stoom, 20 bar Max 200 à 300 °C	Water onder druk > 100 °C	Water < 100 °C (soms onder druk)	Water (aanvoer 30-70)
Temperatuur Niveau warmtenet (2.5.7)	ZHT	HT (aanvoer 120- retour 90)	MT (90 aanvoer-50 retour)	LT (70 aanvoer) ZLT (50 aanvoer)
Warmteafgifte systeem (2.3.2)	ZHT radiatoren(>90)	HT radiatoren (90-70)	MT radiatoren (70-40)	LT/ZLT systemen (vloer/wand/lt radiatoren)
Bronnen (2.3.1)	fossiel	Fossiel WKK	Fossiel WKK Industrie restwarmte Biomassa zon	Diverse duurzame bronnen, Restwarmte, LT warmte- bronnen

2.7 Gebiedsaspecten

Naast warmtevraag en de aanwezigheid van bronnen (warmteaanbod) zijn ook gebiedseigenschappen bepalend voor de haalbaarheid van de aanleg van een warmtenet. De temperatuur van het warmtenet bepaalt het warmteverlies, en daarmee de efficiëntie. Als er dus meer warmte wordt getransporteerd door een warmtenet, bij gelijkblijvende temperatuur, dan wordt het warmteverlies relatief lager. Daarom zijn warmtenetten rendabeler als er sprake is van een hoge warmtedichtheid en dus een hoge warmtevraag.

Hierbij leidt een hogere bebouwingsdichtheid tot een hogere warmtevraag, ook de mate van energiezuinigheid van de woningen (dus het type woningen) heeft invloed op de warmtevraag. Bepalende aspecten in een gebied zijn dus:

- Bebouwingsdichtheid
- Type woningen/ energiegebruik van de woningen

Een hoge bebouwingsdichtheid leidt weer tot compactere netten, en kortere leidinglengtes, wat gunstig is voor de leidingverliezen. In de parameter 'lineaire warmtedichtheid' van een net komt de uitgebreidheid (lengte van het net) en warmtetransport door het net in één parameter samen. Deze bepaalt voor een groot deel het warmteverliespercentage en ook de rentabiliteit van het net. De volgende paragraaf gaat hier verder op in.

2.7.1 Lineaire warmtedichtheid

De jaarlijkse hoeveelheid warmte die door het net wordt getransporteerd per strekkende meter, wordt beschreven als de lineaire warmtedichtheid van het warmtenet, in het engels 'linear heat density'. Deze lineaire warmtedichtheid is een maat voor de warmteintensiteit in een warmtenet en is als volgt gedefinieerd (Frederiksen & Werner, 2013), (Nussbaumer & Thalmann, 2014), (Wetter, Brüggling, Willenbrink, & Russell-Wells, 2018):

$$LWD = \frac{Q_{geleverd}}{L_{net}}$$

Hierin is:

- LWD: Lineaire warmtedichtheid [GJ/(a m)] of [MWh/(a m)]
 Q_{geleverd} : hoeveelheid energie afgeleverd bij de gebruiker [GJ/a] of [MWh/a]
 L_{net} : tracé lengte van traject [m] (lengte van het hoofdnet, de vertakkingen en leidingen tot aan huisaansluiting, gecombineerde aanvoer retour leiding, dus gelijk aan de totale lengte/2) [m]

Bij lagere lineaire warmtedichtheden zijn de leidingverliezen ten gevolge van warmteverlies van een systeem relatief hoog, en daarmee ook de energie kosten. Verder betekent een lage LWD waarde ook dat er relatief veel leidingen liggen voor de hoeveelheid getransporteerde energie. Daarmee zijn de investeringskosten voor leidingen per eenheid energie ook hoog. Vaak betekent een lage LWD waarde dat de businesscase moeizaam wordt. In (Frederiksen & Werner, 2013) wordt aangegeven wat de orde grootte is van de lineaire warmtedichtheid voor warmtenetten in Zweden.

Tabel 2-4 range lineaire warmtedichtheid uit (Frederiksen & Werner, 2013)

	Lineaire Warmtedichtheid	
	[GJ/(a m)]	[MWh/(a m)]
Gemiddeld warmtenet in Zweden	10-15	2.7-4.2
Dun bevolkte gebieden (lage dichtheden)	2-5	0,6-1,34

Uit de studie van Nussbaumer (Nussbaumer & Thalmann, 2014) blijkt dat voor Zwitserse warmtenetten voor lagere dichtheden dan 2 MWh/(a m) slechts een kwart van de netten lagere netverliezen heeft dan 10%, terwijl voor grotere dichtheden (> 2 MWh/(a m)) driekwart van de netten lagere warmteverliezen heeft dan 10 %. In de norm van QM Holzheiwerte in Zwitserland, Duitsland en Oostenrijk (Nussbaumer & Thalmann, 2014) is als target gesteld dat de warmtenetverliezen voor een warmtenet in de buurt van de 10% zouden moeten liggen.

2.8 Distributieverliezen

Verliezen bepalen de efficiency van het warmtenet, deze verliezen bestaan uit pompverliezen en uit warmteverliezen. Hierbij zijn de warmteverliezen overheersend.

Een aantal effecten die de grootte van de procentuele warmte verliezen bepalen zijn (Nussbaumer & Thalmann, 2014):

- De warmtedichtheid: het verlies van een warmtenet is bij gelijkblijvende temperatuur constant. Als er meer warmte wordt geleverd, is het verlies dus procentueel lager. Daarom zijn warmtenetten alleen interessant als de warmtedichtheid in een gebied voldoende hoog is.
- Het temperatuurniveau, leidinglengte, leiding layout en mate van isolatie van de leidingen.
- De diameter van de leidingen: hoe groter de diameter (bij gelijkblijvende warmtelevering) hoe hoger het warmteverlies (en de kapitaalkosten).

Uit oogpunt van lage warmteverliezen is het gunstig de aanvoertemperatuur van een netwerk niet hoger te maken dan noodzakelijk en de retour temperaturen zo laag mogelijk te houden. Echter lage aanvoertemperaturen vereisen ook een groter warmtewisselend oppervlak om de benodigde warmte te kunnen overdragen. Hierdoor nemen de investeringskosten in de woning toe. Bij zeer lage verwarmingstemperatuur moet de woning goed geïsoleerd worden om te zorgen dat het comfort voldoende is in de woning.

Het procentuele warmteverlies neemt ook toe als in de zomer enkel warmte wordt geleverd voor het tapwater, terwijl er relatief weinig warmte wordt geleverd.

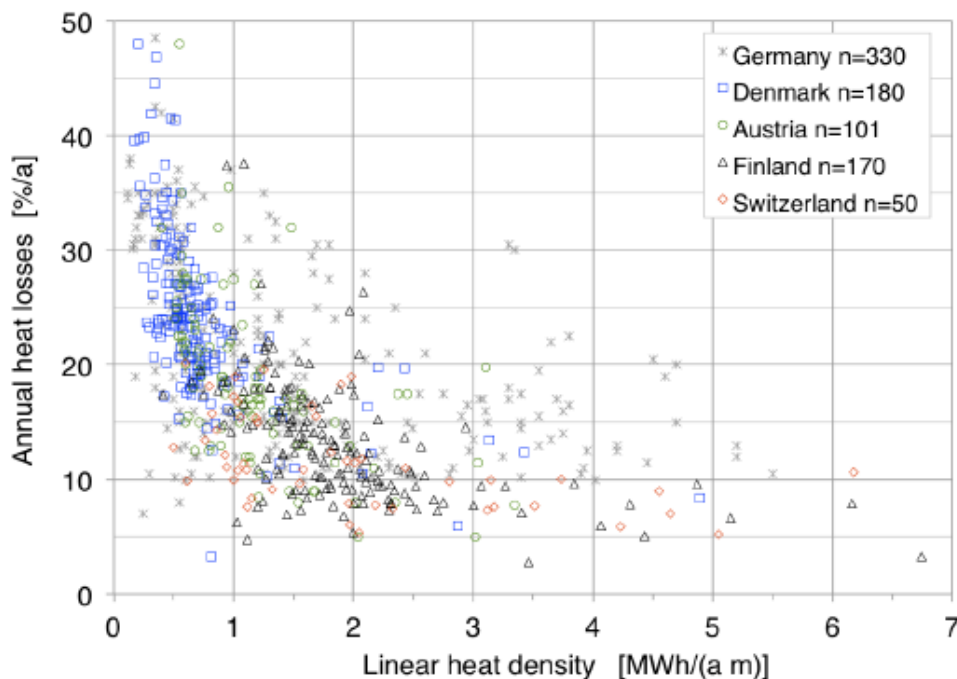
Als het verschil tussen aanvoer - en retourtemperatuur kan worden vergroot dan kan de massastroom door het systeem afnemen, hetgeen een reductie van energie voor circulatiepompen tot gevolg heeft. Als de massastroom afneemt, kan ook de leidingdiameter kleiner worden gedimensioneerd, en daarmee neemt het warmteverlies af. Het kan zo zijn dat door verlagen van aanvoertemperatuur het temperatuurverschil tussen aanvoer en retourtemperatuur afneemt, waardoor de volumestroom in het systeem toe moet nemen om de zelfde hoeveelheid warmte over te dragen. Hierdoor nemen de circulatie verliezen juist weer toe.

Wat de meest gunstige situatie is, warmteverliezen versus pompverliezen, is een kwestie van optimalisatie.

De warmteverliezen in warmtenetwerken kunnen aanzienlijk zijn. De International Energy Agency (Nussbaumer & Thalmann, 2014) heeft onderzoek gedaan naar 831 netwerken in diverse landen (Oostenrijk, Denemarken, Finland, Duitsland, and Zwitserland).

Hieruit bleek dat het warmteverlies een grote variatie laat zien: sommige warmtenetten hebben maar 5% warmteverlies, echter bij een aanzienlijke hoeveelheid netwerken, vaak met een lage warmtedichtheid, kunnen de verliezen oplopen tot 40 % en soms nog hoger.

Voor de onderzochte 831 warmtenetten is het warmteverlies uitgezet tegen de lineaire warmtedichtheid, zie *Figuur 2-11*. Deze lineaire warmtedichtheid is de belangrijkste parameter voor de warmteverliezen (Frederiksen & Werner, 2013).



Figuur 2-11: jaarlijks warmteverlies afhankelijk van de lineaire warmtedichtheid voor 831 warmtenetten (Nussbaumer & Thalmann, 2014)

Daarnaast is er een curvefit afgeleid die beschrijft hoe het warmteverliespercentage afhangt van de lineaire warmtedichtheid (gebaseerd op 831 warmtenetten uit bovenstaande landen). Dit leidt tot de volgende relatie:

$$\text{Annual heat distribution losses in [\%/a]} = 17 \cdot (\text{linear heat density})^{-0.5}$$

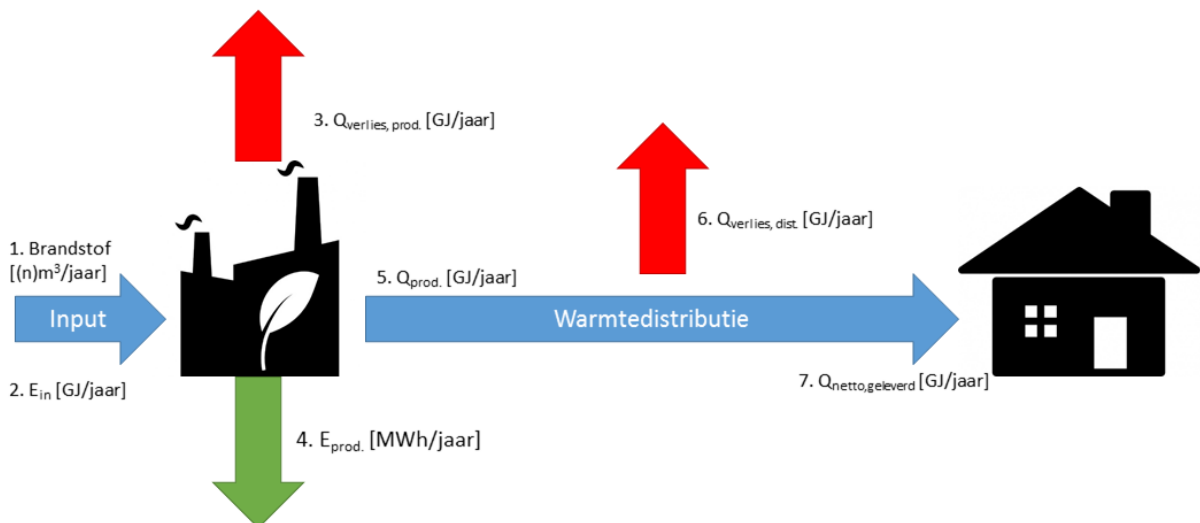
Hierbij wordt de 'lineair heat density', de lineaire warmtedichtheid ingevoerd in de eenheid MWh/(a m), het resultaat is het verlies percentage per jaar. De afzonderlijke trendlijnen voor de onderzochte landen zijn te zien in bijlage 4.

Deze curvefit wordt toegepast om een schatting te maken van verliespercentage van diverse onderzochte cases in hoofdstuk 3 (voor cases waarvan de warmteverliezen niet bekend zijn), en om het verlies te vergelijken met warmtenetten die een vergelijkbaar LWD hebben. Voorwaarde is wel dat de leiding lengtes dan bekend zijn. Dit geeft natuurlijk slechts een indicatie van het warmteverlies. Een belangrijke variabele: De toe- en afvoertemperatuur in het warmtenet is niet meegenomen in deze relatie. Het temperatuur gebied van de relatie is niet aangegeven in de studie, maar voor de Zwitserse netwerken is aangegeven dat 90% van de netwerken tussen de 70-100 °C aanvoer temperatuur heeft. Aangenomen wordt dat dit ook geldt voor de netwerken in de andere landen en dat daarmee de curvefit geldig is voor warmtenetten met een aanvoer temperatuur tussen de 70-100 °C.

In de studie van Nussbaumer is uitgegaan van een bodemtemperatuur van 10 °C, dit zou wat kunnen verschillen in de diverse landen, en dat heeft dan ook enige invloed op het warmteverlies. Ook zou verschil in buitentemperaturen in de diverse landen wat invloed kunnen hebben.

2.9 Duurzaamheid van het net

De duurzaamheid van netten kunnen worden vergeleken met behulp van een tweetal kentallen, zie (Hordijk, Janssen, & Kuipers, 2018).



Figuur 2-12 overzicht warmtedistributie in een warmtnet (Hordijk, Janssen, & Kuipers, 2017)

Het eerste kental is de Primary Energy Ratio (PER), die gedefinieerd is als de geleverde warmte, gedeeld door de totale energie input aan primaire fossiele energie, benodigd om die warmte te leveren. Als er naast warmteproductie ook sprake is van electriciteitsproductie (zoals bij een WKK), dan wordt deze elektriciteit omgerekend naar primaire fossiele energie en van de input aan primaire fossiele energie afgetrokken.

$$PER = \frac{Q_{netto,geleverd}}{B_{primair\ fossiel} - \frac{E_{prod}}{\eta_{el}}} [-]$$

In de optimale situatie wordt er geen fossiele energie gebruikt, de PER is in dat geval oneindig. In het geval dat er sprake is van een gasketel als verwarmingstoestel, dan zal de PER in de buurt van de waarde 1 liggen. Hoe verder de PER waarde boven de 1 ligt hoe duurzamer het systeem.

Het tweede kental is de hoeveelheid CO₂ die het systeem uitstoot gedeeld door de CO₂ uitstoot in de referentiesituatie, voor zowel warmte (Q) als elektriciteit (E). In Nederland is de referentiesituatie de situatie waarbij verwarmd wordt met behulp van individuele HR107-gasketels, en gescheiden electriciteitsopwekking plaats vindt in een elektriciteit centrale.

$$CO_2index = \frac{CO_{2\ for\ Q\ \&\ E}}{CO_{2\ for\ Q\ \&\ E}^{ref}} [-]$$

Hierbij ligt het optimum zo dicht mogelijk bij het getal 0.

Nb: bij benadering geldt dat $PER \approx 1/CO_2index$.

2.10 Karakteriseringstabel warmtenet

Op grond van de paragrafen in voorgaande hoofdstukken is een tabel opgesteld die ingevuld zal worden bij de karakterisering van de warmtenetten in de diverse cases, zie hoofdstuk 3. Het effect van de omgevingskenmerken van de netten (bebouwingsdichtheid, warmtedichtheid en energiegebruik van de huizen), zijn terug te vinden in de parameter lineaire warmtedichtheid. Er is gekozen om alleen deze parameter weer te geven, omdat dit volgens studies één van de belangrijkste parameters is die de warmteverliezen van een net bepalen. Ook is deze parameter relatief eenvoudig te achterhalen bij de dataverzameling.

De diameter van de netten, de type isolatie en de bijbehorende lengte van de leidingen zijn belangrijk en noodzakelijk om het warmteverlies en de pompverliezen in detail te kunnen bepalen en te analyseren. Het is in de praktijk echter lastig dit mee te nemen, aangezien in een warmtenet meerdere diameters voorkomen, daarom zijn diameter en isolatie niet opgenomen in het overzicht. Ditzelfde geldt voor de netwerkstructuren die besproken zijn in paragraaf 2.3.3.5. De prestatie van het net wordt afgeleid uit de energiebalans van de betreffende case.

Tabel 2-5: belangrijke parameters voor de karakterisering van warmtenetten

Temperatuur warmtenet	
temperatuur aanvoer	
Temperatuur retour	
Warmtenet omvang	
Vermogen [MW]	
Aantal aansluitingen	
Warmte	
energiebron	restwarmte/biogas/etc.
Installatie onderdelen	Warmtepomp, buffer, gaskachel, houtpelletkachel, biomassa WKK, etc.
Energiebalans	
Totale energie [GJ/jr]	
duurzaam [GJ/jr]/(%)	
warmtepomp (electriciteit uit net) [GJ/jr]/(%)	
fossiel [GJ/jr]/(%)	
geleverd [GJ/jr]	
Gebiedseigenschappen	
Type woningen en bouwjaar	
type gebied	blok, wijk , stad, regio
Net eigenschappen	
leiding lengte [m]	
Duurzaamheid	
PER [-]	
CO2 index	
net verlies	
Warmte intensiteit net	
Lineaire warmtedichtheid [MWh/(m a)] of [GJ/(m a)]	

3. Beschrijving Cases

3.1 Inleiding

De tabel 2-5, opgebouwd in voortgaand hoofdstuk, wordt uitgewerkt voor een aantal geselecteerde cases in Oost Nederland. Voor de selectie van de cases is aangesloten op de cases die uit zijn gevoerd tijdens een studie van Saxion studenten in 2017 (Hordijk, Janssen, & Kuipers, 2017). Daarnaast is rekening gehouden met de cases die worden bestudeerd in de parallel lopende governance en business case studie. Met betrekking de herkomst van gegevens: De beschrijvingen en gegevens voor de cases 1 t/m 4 zijn grotendeels overgenomen uit de tekst van brochure 3 van Wiefm (Hordijk, Janssen, & Kuipers, Vergelijking van prestatie warmtenetten Oost Nederland, 2018) en het rapport (Hordijk, Janssen, & Kuipers, 2017), aangevuld met extra gegevens. Voor de andere cases (5 en verder) staan de referenties benoemd in de desbetreffende paragraaf.

In **Tabel 3-1** is een overzicht opgenomen van de cases die in dit hoofdstuk behandeld worden.

Tabel 3-1: overzicht cases warmtenetten

#	Plaats	bron	Energie (TJ/a)	paragraaf
1	Apeldoorn	Biogas, houtsnippers, aardgas (bijstook)	88,9	3.2
2	Culemborg	Warmte uit drinkwater, aardgas, elektriciteit	9,9	3.3
3	Enschede, Roombeek	Aardgas	73,5	3.4
4	Zwolle, Muziekwijk	Houtsnipper, aardgas	9,9	3.5
5	Almelo windmolenhoek	Houtsnipper, biogas, aardgas	33,5	3.6
6	Meppel, Nieuwweenselanden	Houtpellets, aardgas, groene stroom	13,3	3.7
7	Warmtenet Ede	Houtige reststromen, aardgas	250	3.8

Nb: 1 GJ= 10^9 J, TJ= 10^{12} J; 1 MWh=3,6 GJ

Alle onderstaande projecten worden gegroepeerd in een verzamel excel file, en opgenomen in bijlage 6.

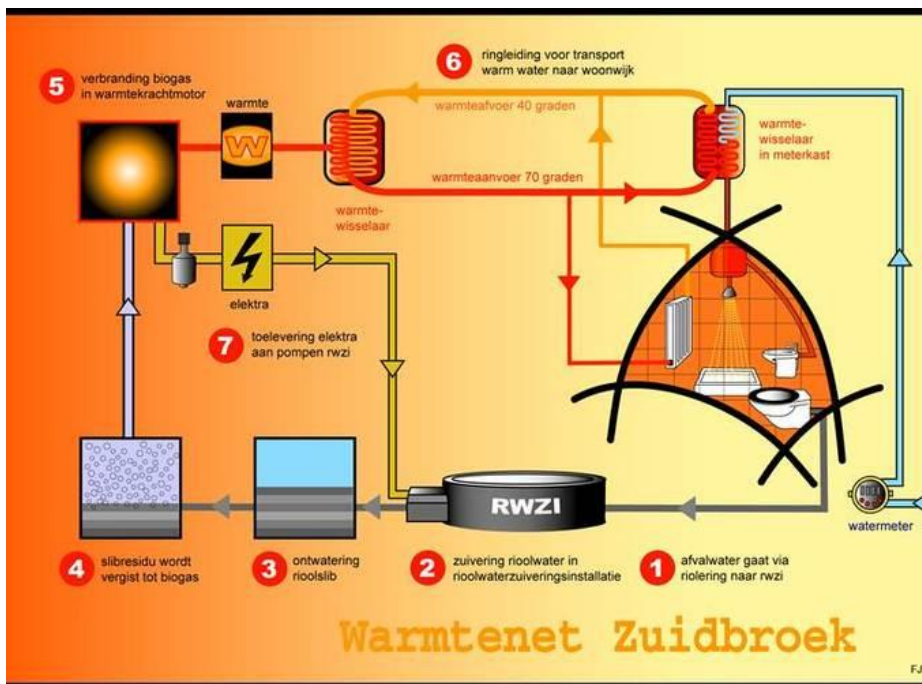
3.2 Warmtenet 1: Apeldoorn zuidbroek

3.2.1 Beschrijving warmtenet

Dit betreft een nieuwbouwwijk met woningen die zijn gebouwd tussen 2000 en 2014. Het warmtenet maakt gebruik van drie warmtebronnen. De primaire warmtebron die het net voedt is een biogas-WKK, hier wordt biogas, afkomstig van de rioolzuivering, verstoekt om elektriciteit op te wekken dat weer gebruikt wordt door de rioolwaterzuivering. Als er elektriciteit over is, wordt dit teruggeleverd aan het elektriciteitsnet. De geproduceerde elektriciteit (zowel intern gebruikt als teruggeleverd aan het net) is niet meegenomen.

Bij de rioolwaterzuivering is het restproduct slib, dit slib wordt vergist en daarbij komt het biogas vrij dat verstoekt wordt in de WKK. Dit is dus een gesloten kring. Naast elektriciteit wordt er ook warmte geproduceerd in de WKK, deze warmte wordt gevoed in het warmtenet. Naast de biogas-WKK zijn er ook twee houtsnipperketels. Voor piekmomenten en als back-upvoorziening zijn er ook nog twee aardgasketels, deze zorgen ervoor dat er een stabiele warmtelevering gegarandeerd kan worden. Om de verschillen tussen warmteproductie en warmtevraag

op te kunnen vangen zijn er ook twee warmtebuffers in het systeem opgenomen, die ook helpen om de piekvraag op te vangen.



Figuur 3-1: schematische weergave van het warmtenet Apeldoorn Zuidbroek

Naast ruimteverwarming wordt het warmtenet ook gebruikt om het tapwater van de aangesloten gebouwen te verwarmen, daarom is de aanvoertemperatuur relatief hoog, 70°C.

In **Tabel 3-2** staan de gegevens van de wijk op een rij. In bijlage 7.1 is te zien waar Zuidbroek ligt en welke delen aangesloten zijn op het warmtenet. Meer info over dit project is te vinden in (Hordijk, Janssen, & Kuipers, 2017). Het warmtenet is een kleinschalig warmtenet, bestaande uit één wijknet.

Tabel 3-2 Gegevens Apeldoorn Zuidbroek (Hordijk, Janssen, & Kuipers, 2017)

Naam wijk	Zuidbroek
Plaats	Apeldoorn
Primair toestel	Biogas-WKK
Secundair toestel	Houtsnipperketels
Tertiair toestel	Aardgasketels
Netbeheerder	Ennatuurlijk
Aantal huizen/ utiliteit	±1.700/±6 (groeïend naar 2300 tot 2500)
Bouwjaar huizen/ utiliteit	2000-2014, energielabel A
Type woningen	onbekend, merendeel rijwoningen
Overig	2 buffervaten, onbekende grootte
Temperatuur toevoer	70-80 C

Temperatuur retour	40-50 C
Lengte leidingen (aanvoer en retour samen, excl aansluitleidingen) [m] (Biemans, 2018)	65000 m

3.2.2 Duurzaamheid warmtenet

Op grond van de beschreven methodiek in paragraaf 2.9 is bepaald wat het duurzame aandeel is van de warmteopwekking en zijn de leiding verliezen en de PER en CO₂-index bepaald.

Tabel 3-3: Duurzaamheid Zuidbroek (Hordijk, Janssen, & Kuipers, 2018)

	Netwerk 1
Productie warmte duurzame bron (hout/biogas) [GJ/jaar]	67260 (76%)
Productie warmte warmtepomp (electriciteit uit net) [GJ/jaar]	
Productie warmte energie uit fossiele bron (gas met gasketel en/of WKK) [GJ/jaar]	21600 (24%)
CO ₂ -index [-]	0,39
PER [-]	2,5
Netverlies volgens praktijk gegevens [%]	35*
Lineaire warmtedichtheid [GJ/(a m)]; [MWh/(a m)]	0,83 ; 0,23
Theoretische netverlies (curvefit) [%]	35

* in 2016, zal dalen door toename warmtelevering

3.2.3 Analyse

Het huidige systeem bestaat uit een biogas-WKK, twee houtsnipperketels en twee aardgasketels voor de bijstook. Het grootste deel (75%) van de warmte wordt voorzien doormiddel van biobrandstoffen. Aan de waarde Primary Energy Ratio en de CO₂ index is te zien dat de installatie duurzamer is dan referentiesituatie (verwarmen met een gasketel). Uit de gegevens blijkt dat in deze wijk de CO₂-uitstoot circa 60 % verminderd is ten opzichte van de referentiesituatie. Apeldoorn Zuidbroek is van zichzelf al een goed voorbeeld van een duurzame wijk.

De aanvoertemperatuur van het net bedraagt 70-80 graden en de retour 40-50 graden. Deze relatief hoge aanvoer temperaturen zijn nodig vanwege tapwater. Hiermee valt het net onder een derde generatie netwerk Midden Temperatuur traject.

De netverliezen zijn echter relatief hoog (35 %), als reden wordt aangegeven dat de wijk nog gaat groeien, waardoor dit percentage komende jaren af zal nemen.

De lineaire warmtedichtheid voor deze wijk komt uit op 0,23 MWh/m. Opmerking hierbij is dat het leidingnet exclusief huisaansluitleidingen is, dus de lineaire dichtheid zal in werkelijkheid lager liggen. Als dit vergeleken wordt met de benchmark van warmtenetten dan is dit een zeer lage waarde. Als vervolgens de lineaire dichtheid wordt bepaald met de curvefit dan resulteert dat ook in 35 %, dit komt overeen met de huidige warmteverlies over het net.

Aangezien er hier sprake is van een groeiwijk is de verwachting dat de lineaire warmtedichtheid in de loop van de jaren zal toenemen, en daarmee de netverliezen lager, zoals hierboven reeds vermeld.

3.3 Warmtenet 2: Thermobello/EVA-Lanxmeer, Culemborg

3.3.1 Beschrijving warmtenet

Deze nieuwbouwwijk bestaat uit woningen gebouwd tussen 2002-2016. Om de huizen, kantoren en scholen te verwarmen wordt er warmte onttrokken aan drinkwater. Het water wordt op een diepte van 150 meter uit de grond gehaald, het heeft op dat moment een temperatuur van ongeveer 12°C. Met een opvoerpomp vanuit een drinkwaterbassin, wordt een deelstroom door een warmtewisselaar geleid, die is gekoppeld aan een warmtepomp die het drinkwater in het drinkwaterbassin maximaal afkoelt tot 10°C, en de onttrokken warmte gebruikt voor het opwarmen van het verwarmingswater. De warmtepomp levert hiermee ca 87% van de totale warmtebehoefte van de aangesloten huizen en zakelijke afnemers. De geproduceerde warmte wordt opgeslagen in een buffervat van 50 m³, voor een efficiënter gebruik van de warmtepomp. Er zijn twee gasketels voor de piekmomenten in de winter, deze leveren ongeveer 13% van de jaarlijkse warmtebehoefte. De aanvoertemperatuur varieert gedurende de dag en het jaar en volgt de stooklijn. De aanvoer temperatuur volgt een stooklijn en is maximaal 50°C, en daarmee uitsluitend geschikt voor lage temperatuur verwarming. Dit betekent dat het water niet geschikt is voor het verwarmen van tapwater. Hiervoor hebben de huishoudens allemaal een eigen systeem, variërend van een HR-ketel tot booster-warmtepompen. Het warmtenet is een kleinschalig warmtenet, bestaande uit één wijknet.

Tabel 3-4: Gegevens Thermobello, Eva Lanxmeer

Naam wijk	EVA-Lanxmeer
Plaats	Culemborg
Primair toestel	Warmtepomp 780 kW
Brandstof	Elektriciteit uit het net
Bron	Drinkwater Vitens (wordt in de wijk gewonnen)
Secundair toestel	2 gasketels, beiden 640 kW
Netbeheerder	Thermo Bello bv
Aantal huizen/utiliteit	208/8
Bouwjaar huizen/utiliteit	2002-2016
Type woningen	EPC 0,6-0,7 merendeel rij- en hoekwoningen en appartementen
Overig	Buffervat 50 m ³
Temperatuur toevoer (Verschuur, 2018)	Volgens stooklijn (max 50 C, bij buiten -15; 20 C bij buiten 20 C)
Temperatuur retour (Verschuur, 2018)	Circa 5 graden lager dan de aanvoer temperatuur.
Lengte leidingen [m] (Verschuur, 2018)	4000

De stooklijn van de installatie en aanvullende informatie mbt de retourtemperatuur is te vinden in bijlage 5.2.

3.3.2 Duurzaamheid warmtenet

Er is bepaald wat het duurzame aandeel van de warmteopwekking is, en de PER en CO₂ index zijn bepaald.

Tabel 3-5 Duurzaamheid Thermobello, EVA lanxmeer

	Netwerk 2
Productie warmte warmtepomp (electriciteit uit net) [GJ/jaar]	8589 (87%)
Productie warmte energie uit fossiele bron (gas met gasketel en/of WKK) [GJ/jaar]	1277 (13%)
CO ₂ -index [-]	1,0
PER [-]	1,1
Netverlies [%] praktijk	10
Lineaire warmtedichtheid [GJ/(a m)]; [MWh/(a m)]	2.21 ; 0,61
Theoretische netverlies (curvefit) %	22

3.3.3 Analyse

De warmte in netwerk 2 wordt voor 87 % geleverd door een warmtepomp. Toch scoort dit netwerk qua duurzaamheid slechts iets beter dan de situatie waarbij gestookt wordt met individuele gasketels. Dit wordt deels veroorzaakt door een relatief lage COP van de warmtepomp (gemiddelde COP=3.57). Deze lage COP wordt grotendeels veroorzaakt door het relatief hoge temperatuurverschil waarover de warmtepomp werkzaam is. Dit temperatuurverschil tussen de verdampers en de condensator van de warmtepomp bedraagt, afhankelijk van de stooklijn, maximaal 43°C. De benodigde elektriciteit voor de warmtepomp wordt geleverd door het elektriciteitsnet, wat niet duurzaam is. Als alle elektriciteit 100% duurzaam zou worden opgewekt dan is een PER van 6.5 en een CO₂ index van 0.15 theoretisch mogelijk. Netwerk 2 zou dan direct zeer duurzaam zijn.

Het netwerk heeft een netverlies van 10 %. Dit is deels te danken aan een relatief lage temperatuur, van maximaal 50 °C. Het warmtenet valt daarmee onder een zeer laag temperatuurnet, volgens de vierde generatie. Het netwerk werkt ook met een stooklijn (zie bijlage 5.2), en in de zomer is de temperatuur van het water 20 graden, waardoor er nauwelijks leidingverliezen optreden. Deze lage temperatuur is mogelijk omdat het net niet hoeft te voorzien in tapwater. De lineaire warmtedichtheid van dit systeem bedraagt 0,61 MWh/m en dat is zeer laag, vergeleken de waarden uit de benchmark. Het leidingverlies dat optreedt in de praktijk is echter ruim een factor 2 lager dan de curvefit (22%). Dit is verklaarbaar omdat de curvefit gebaseerd is op warmtenetten van hoge temperaturen en er hier sprake is van een laag temperatuur net.

3.4 Warmtenet 3: Roombeek, Enschede

3.4.1 Beschrijving warmtenet

Deze wijk is opgenomen in deze case studie omdat dit de enige wijk is die (ten tijde van de studie in 2017) nog volledig gasgestookt was.

Deze nieuwbouwwijk wordt verwarmd door een WKK, gestookt op aardgas. De installatie beschikt over buffervaten en voor het piekverbruik, in de winter, zijn er 2 gasketels beschikbaar. De aanvoertemperatuur van het water is tussen de 70 en 80°C. Het warmtenet verwarmt de woningen en het tapwater in de woningen. Als het water de huizen heeft verwarmd is de retourtemperatuur ongeveer 55°C. Het is een kleinschalig warmtenet, bestaande uit één wijknet.

Tabel 3-6: Gegevens Roombeek

Naam wijk	Roombeek
Plaats	Enschede
Primair toestel	WKK 1,6 MW _e
Brandstof	Aardgas
Secundair toestel	2 gasketels, 10 MW totaal

Netbeheerder	Ennatuurlijk
Aantal huizen/utiliteit	1281/16
Bouwjaar huizen/utiliteit	2003-2007
Type woningen	75 % rij hoekwoningen en appartementen 25 % 2-onder-1 kap en merendeel vrijstaand
Overig	2 Buffervaten, beide 200 m ³
Temperatuur toevoer	70-80
Temperatuur retour	55
Leidinglengte m (er wordt aangenomen dat dit de trace lengte is*)	26.500

* indicatief, het warmtenet wordt gemoderniseerd, in deze studie gaan we uit van de oude situatie. Onduidelijk is of deze lengte in-of exclusief de huisaansluitingen is

3.4.2 Duurzaamheid warmtenet

De prestatie van dit warmtenet op duurzaamheid en energie gebruik is weergegeven **Tabel 3-7**

Tabel 3-7 Duurzaamheid Roombeek

	Netwerk 3
Productie warmte duurzame bron (hout/biogas) [GJ/jaar]	
Productie warmte warmtepomp (electriciteit uit net) [GJ/jaar]	
Productie warmte energie uit fossiele bron (gas met gasketel en/of WKK) [GJ/jaar]	73512 (100%)
CO ₂ -index [-]	0,84
PER [-]	1,1
Netverlies [%]	27
Lineaire warmtedichtheid [GJ/(a m)]; [MWh/(a m)]	2 ; 0,56
Theoretische netverlies (curvefit) %	23

3.4.3 Analyse

Netwerk 3 wordt gevoed door een WKK installatie op gas (fossiele brandstof). Doordat er sprake is van gecombineerde opwekking van elektriciteit en warmte, is deze situatie toch iets gunstiger dan gescheiden opwekking. Het gunstige effect van gecombineerde opwekking, wordt deels teniet gedaan door het relatieve hoge netverlies van 27 %.

De aanvoertemperatuur van het net bedraagt 70-80 graden en de retour 55 graden en daarmee valt het netwerk onder een derde generatie netwerk, midden temperatuurtraject.

De lineaire dichtheid van dit netwerk ligt op 0,56 MWh/m (of lager), en dit is wederom een lage waarde.

Vergeleken met de curvefit uitgevoerd aan de hand van de Europese benchmark ligt het verlies iets hoger dan verwacht.

De netwerkbeheerder is bezig om het netwerk duurzamer te maken. Het warmtenet zal worden aangesloten op de warmtetoevoer (Fluxenergie, 2018) van Twence, dat deels duurzaam is.

3.5 Warmtenet 4: Zwolle Muziekwijk

3.5.1 Beschrijving warmtenet

Zwolle muziekwijk is een nieuwbouwwijk met 333 huizen. Er wordt verwarmd met een houtsnipperketel die 88% van de warmte levert. De piekmomenten worden opgevangen door twee gasketels. Ook is er een buffervat dat vooral tijdens de ochtendpiek de wijk van warmte voorziet. De houtsnippers hebben een vochtpercentage van ongeveer 40% en zijn afkomstig van het snoeihout uit de omgeving. De aanvoertemperatuur van het warmtenet is 75°C (deze is onlangs verhoogd vanaf 70°C ivm tapwaterproblemen), de retourtemperatuur varieert afhankelijk van de vraag tussen de 55°C tot de 65 °C (Masman, 2018). Het warmtenet is een kleinschalig warmtenet, bestaande uit één wijknet.

Tabel 3-8: Gegevens Muziekwijk

Naam wijk	Muziekwijk
Plaats	Zwolle
Primair toestel	Houtsnipperketel (500 kW _{th})
Brandstof	Houtsnippers
Secundair toestel	Gasketels (750 kW _{th})
Netbeheerder	Cogas
Aantal huizen	333
Bouwjaar huizen	2011-2015
Type woningen	Merendeel rij en hoekwoningen, appartementen en galerij woningen
Overig	Buffervat 30 m ³ , bunker 100m ³ snippers
Aanvoertemperatuur	75
Retourtemperatuur	55-65
Lengte leidingen [m] (Masman, 2018)	3000

3.5.2 Duurzaamheid warmtenet

In Tabel 3-9 is het energieverbruik en de duurzaamheid van de Muziekwijk weergegeven.

Tabel 3-9: Duurzaamheid Muziekwijk

	Netwerk 4
Productie warmte duurzame bron (hout/biogas) [GJ/jaar]	8753 (88%)
Productie warmte warmtepomp (electriciteit uit net) [GJ/jaar]	
Productie warmte energie uit fossiele bron (gas met gasketel en/of WKK) [GJ/jaar]	1177 (12%)
CO ₂ -index [-]	0,18
PER [-]	5,2
Netverlies [%]	33
Lineaire warmtedichtheid [GJ/(a m)]; [MWh/(a m)]	2.25 ; 0,63
Theoretische netverlies (curvefit) %	21

3.5.3 Analyse

De Muziekwijk heeft met 88% een zeer hoog percentage aan duurzame energie en presteert daarmee zeer goed vergeleken met andere netwerken. De aanvoertemperatuur van het net bedraagt 75 graden en de retour 55-65 graden, hiermee valt het netwerk qua temperatuur onder derde generatie netwerken. De relatief hoge aanvoer temperatuur is nodig vanwege warm tapwater. Een verbeter punt is het nog relatief hoge netverlies van 33 %. De lineaire warmtedichtheid voor deze wijk komt uit op 0,63 MWh/m. Als dit vergeleken wordt met de benchmark van warmtenetten dan is dit wederom een lage waarde. Als vervolgens het theoretisch netverlies wordt bepaald met de curvefit dan resulteert dat in 21 %. Het distributieverlies is daarmee een stuk hoger dan wat volgens de curvefit van de benchmark verwacht zou worden.

3.6 Warmtenet 5: Almelo Windmolenbroek

3.6.1 Beschrijving warmtenet

In Almelo Windmolenhoek ligt al enige tijd een warmtenet. Een warmtekracht installatie, die draait op een mengsel van aardgas en stortgas, voorziet de wijk van warmte. Het stortgas wordt met een leiding van 10 km aangevoerd vanaf een vuilstort in Delden. De biogaswinning uit de vuilstort loopt de laatste jaren terug, en omdat de installatie technisch is afgeschreven, heeft Cogas besloten de opwekking van energie verder te verduurzamen. In de zomer van 2017 zijn er vier houtkachels bijgeplaatst. Daarnaast zijn er nog twee gasketels aanwezig die extra warmte kunnen leveren als het vriest of in de piekuren (stadverwarming Almelo, 2019). Het warmtenet is een kleinschalig warmtenet, bestaande uit één wijknet. De wijk bestaat uit 830 woningen, waarvan 83% van de woningen voor 2000 is gebouwd, en 17 % na 2000 (alle cijfers, 2018).

Tabel 3-10: Gegevens Windmolenbroek

Naam wijk	Windmolenbroek
Plaats	Almelo
Primair Toestel	Biomassaketels 4*199 kW
Brandstof	Houtsnippers en/of houtpellets
Secundair Toestel	Biogasketel 560 kW
Toestel voor pieklast	Gasketels 2*2300 kW
Brandstof	Aardgas
Netbeheerder	Cogas
Aantal huizen/utiteit	830/4
Bouwjaar huizen	83 % voor 2000 en 17 % na 2000
Type woningen	Meerendeel rij- en hoekwoningen, appartement en galerij woningen
Overig	Buffervat 15 m ³ , bunker 100m ³ snippers
Aanvoertemperatuur	Stooklijn: 80°C bij 0°C buiten; 75°C bij 25 °C buiten
Retourtemperatuur	55-70°C
Lengte leidingen m (Masman, 2018)	14300

3.6.2 Duurzaamheid warmtenet

Omdat de installatie kortgeleden gerenoveerd is, en pas sinds juli 2018 in gebruik, zijn er nog maar weinig praktijk data beschikbaar, en is onderstaande tabel opgesteld op basis van de cijfers van juli 2018 t/m december 2018. In deze periode waren er nog wat problemen met de duurzame installaties, waardoor het aandeel duurzame energie

een stuk lager was dan geprognostiseerd. Verder zaten geen koude periodes in, waardoor de totale geleverde warmte ook lager is dan verwacht.

Tabel 3-11: Duurzaamheid Almelo Windmolenbroek

	Netwerk 5
Productie warmte duurzame bron (hout/biogas) [GJ/jaar]	18474 (66%)*
Productie warmte warmtepomp (electriciteit uit net) [GJ/jaar]	
Productie warmte energie uit fossiele bron (gas met gasketel en/of WKK) [GJ/jaar]	10376 (34 %)*
CO ₂ -index [-]	0,53*
PER [-]	1,87*
Netverlies [%]	35*
Lineaire warmtedichtheid [GJ/(a m)]; [MWh/(a m)]	2.64 ; 0,46
Theoretische netverlies (curvefit) %	25

Op basis van cijfers van juli-dec 2018, verkregen van Cogas. Verwacht wordt dat het percentage duurzame productie zal toenemen, geprognostiseerd was 81%. Als dat het geval is zal de PER toenemen en de CO₂ index afnemen.

3.6.3 Analyse

Almelo Windmolenbroek heeft een lager percentage duurzame energie dan Zwolle Muziekwijk, namelijk 66 %, met de kanttekening dat dit vrijwel zeker meer gaat worden als de duurzame installaties goed draaien, in het begin van de periode waren er wat problemen mee. De prognose was 81% en dat is in het eerste half jaar dus nog niet gerealiseerd. Dit heeft ook invloed op de PER en CO₂ index. Op basis van de prognose zou de PER 3.6 zijn, en daarmee presteert het netwerk goed. Echter om 2 redenen valt de PER fors lager uit. De belangrijkste reden is het aandeel duurzame energie, die bedroeg slechts 66% i.p.v. 81% en de andere reden is het hogere netverlies. Het netverlies heeft een vrij grote invloed op de PER in dit geval, doordat 34% van de totale vraag nu wordt gedekt door fossiele brandstoffen. De PER van 1.87 is gebaseerd op het netverlies van 35% terwijl bij een netverlies 25%, zoals berekend met de curvefit, de PER 2.61 zou zijn.

De aanvoertemperatuur van het net bedraagt 75-80 graden en de retour 55-70 graden. Hiermee valt het netwerk qua temperatuur ook weer in een derde generatie netwerk op midden temperatuur niveau. De relatief hoge aanvoer temperatuur is nodig vanwege warm tapwater.

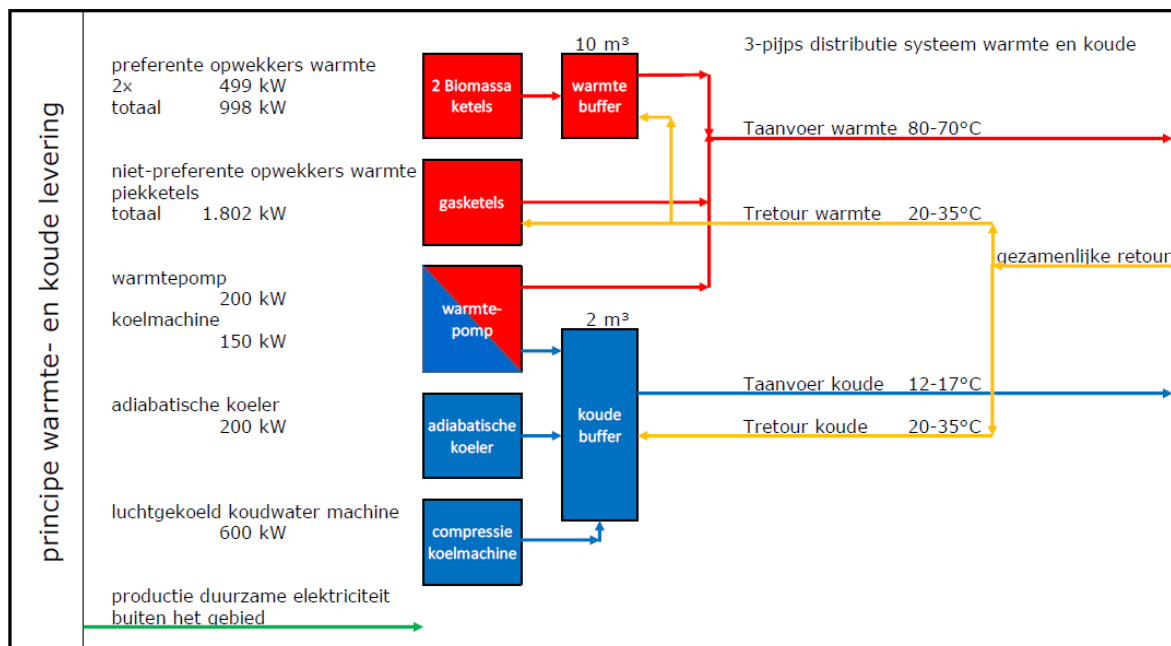
De lineaire warmtedichtheid voor deze wijk komt uit op 0,46 MWh/m. Als dit vergeleken wordt met de benchmark van warmtenetten dan is dit wederom een lage waarde. Als vervolgens het distributieverlies wordt bepaald met de curvefit dan resulteert dat ook in 25 %. Het gerealiseerde distributieverlies van 35% is een stuk hoger dan wat volgens de curvefit van de benchmark verwacht zou worden, een duidelijke verklaring is daar niet voor. Een reden kan zijn dat in de meetperiode geen koude periodes zaten, waardoor de warmtevraag naar verhouding laag was, wat ongunstig is voor het netverliespercentage, maar dit kan het grote verschil niet geheel verklaren.

3.7 Warmtenet 6: Meppel Nieuwveenselanden

3.7.1 Beschrijving warmtenet

Meppel Energie B.V. realiseert een warmte- en koudenet voor de nieuwbouwwijk Nieuwveense Landen, deelgebieden "Centrum Wonen" en "Broeklanden" in Meppel. Uiteindelijk worden in dit gebied 465 woningen gerealiseerd waarvan maximaal 10% van de woningen niet worden aangesloten op het warmte- en koude-net. Het warmtenet zal worden gevoed met 2 biomassa-ketels, gasketels en een warmtepomp/koelmachine. Het koude-net zal worden gevoed door de warmtepomp/koelmachine, vrije koeling via luchtkoelers en een

compressiekoelmachine. De warmte- en koude-distributie wordt uitgevoerd met een zogenaamd “3-pijpsysteem” waarbij de retourleiding van de warmte en koude gecombineerd is. Via het landelijke elektriciteitstransportnet wordt duurzame elektriciteit toegekend aan het warmte- en koude-net van het gebied via een contract en GVO verklaring. Het principe is in *Figuur 3-2* weergegeven.



Figuur 3-2: schema warmte-en koudelevering Meppel, (Mans & Verheul, 2017)

In het onderzoek zijn 2 scenario's uitgewerkt, nominaal en robuust, waar in het robuuste scenario is uitgegaan van 25% grotere warmte-en koudevraag. Voor de overzichtelijkheid wordt hier in de analyse slechts het scenario 'nominaal' besproken.

Het netwerk bestaat uit een 3 pijps systeem, waarin de retour van warm en koud water gecombineerd is, dit leidt tot relatief lage retour temperaturen. In feite is dit alleen het geval als er tegelijkertijd warmte-en koudevraag is, en dat is in de zomer: warm tapwater en koeling. Alleen in die situatie wordt de warmtepomp bedreven, aangezien deze tegelijk warmte en koude levert. Er wordt geschat dat er op jaarbasis een mengverlies van 250 GJ zal optreden ten gevolge van de menging van warm en koud retourwater. De praktijk moet gaan uitwijzen hoeveel het in werkelijkheid zal zijn.

In onze analyse, om te vergelijken met andere netwerken, zal de koudelevering buiten beschouwing worden gelaten.

Tabel 3-12: Gegevens Nieuwveenselanden

Naam wijk	Nieuwveense landen
Plaats	Meppel
Primair toestel	Biomassaketels 2*499 kW
Brandstof	Houtpellets
Pieklast toestel	Gasketel 1802 kW
Brandstof	aardgas

Toestel	Warmtepomp 200kW (alleen indien ook koudevraag)
Brandstof	Ingekochte groene stroom
Aantal huizen/utiliteit	465/-
Bouwjaar huizen	Na 2014
Type woningen	Mix van rijwoningen, 2-onder-1-kap, vrijstaand en appartementen
Overig	Ook koudelevering en warmtebuffer
Aanvoertemperatuur	Stooklijn: 80°C bij -10°C buiten; 70°C bij >0 °C buiten
Retourtemperatuur	Ongeregeld, gecombineerde retour met koudwater. 20 a 35°C
Lengte leidingen [m]	15096

3.7.2 Duurzaamheid warmtenet

Omdat het warmtenet nog maar kort in bedrijf is, en het aantal aansluitingen op moment van schrijven nog minder dan het geplande aantal is, zijn er nog te weinig relevante praktijk data beschikbaar, daarom is onderstaande tabel opgesteld op basis van verwachte en berekende prestaties. Deze zijn gebaseerd op de te bereiken eindsituatie, waarin de geplande 465 huizen zijn gebouwd, en hiervan maximaal 10% niet is aangesloten op het warmtenet.

Tabel 3-13 Duurzaamheid Nieuwweenselanden

	Netwerk 6
Productie warmte duurzame bron (hout/biogas) [GJ/jaar]	13666 (80%)
Productie warmte warmtepomp (electriciteit uit net) [GJ/jaar]	656 (4%)
Productie warmte energie uit fossiele bron (gas met gasketel en/of WKK) [GJ/jaar]	2760 (16 %)
CO ₂ -index [-]	0,24
PER [-]	4,1
Netverlies [%] berekend op basis van NEN7125, nog geen praktijk cijfer beschikbaar.	
Met mengverlies; zonder mengverlies	22 ; 20
Lineaire warmtedichtheid [GJ/(a m)]; [MWh/(a m)]	1,77; 0,49
Theoretische netverlies (curvefit) %	24

Op basis van berekeningen voor de eindsituatie.

3.7.3 Analyse

Nieuwweenselanden heeft een percentage duurzame energie van 84%, daarmee presteert het netwerk goed, met een PER van 4.1. Deze hoge PER is enerzijds te danken aan 80% houtpellets, maar is ook deels te danken aan de inkoop van duurzame elektriciteit, die wordt gebruikt voor de hulpenergie en de aandrijving van de warmtepomp. Zonder inkoop duurzame energie stijgt het aandeel primaire fossiele energie, en zou in dit geval de PER uitkomen op 3,4.

De aanvoertemperatuur van het net bedraagt 70-80 graden en de retour is met 20-35 graden erg laag. Hiermee valt het netwerk qua temperatuur ook weer in een derde generatie netwerk op midden temperatuur niveau. De lage retour temperaturen zijn een gevolg van het driepijps systeem, waarbij de retour van koud en warm water

wordt gemengd, in de situatie waarbij er warmte-en koudevraag tegelijk optreedt. Dat is maar tijdens een deel van het jaar. Het moet blijken wat het energieverlies ten gevolge van die menging (geschat op 250 GJ/jaar) in de praktijk zal zijn. De warmtepomp zal op jaarbasis 656 GJ warmte en gelijktijdig 500 GJ koude leveren. Het geschatte mengverlies is dus 22% daarvan. Zou men kiezen voor een 4 pijps systeem, dan blijft het warme retourwater warmer, en het koude retourwater kouder, wat aanzienlijk op het energieverbruik van de warmtepomp zou schelen.

De lineaire warmtedichtheid voor deze wijk komt uit op 0,49 MWh/m. Als dit vergeleken wordt met de benchmark van warmtenetten dan is dit wederom een lage waarde. Als vervolgens het distributieverlies wordt bepaald met de curvefit dan resulteert dat in 24 %, wat behoorlijk in de buurt komt van het berekende distributieverlies.

3.8 Warmtenet 7: Ede

3.8.1 Beschrijving warmtenet

In Ede ligt een warmtenetwerk, dat wordt gevoed door drie biomassa installaties, die op verschillende plekken in Ede staan. Deze installaties leveren naast warmte ook stoom (aan een Edes bedrijf) en elektriciteit, ze worden gestookt op lokale houtige reststromen. Het netwerk bestaat uit een primair net (voornamelijk toevoerleidingen) van 18 km, en een secundair net. Totale gezamenlijke lengte is ca. 30 km. De temperatuur in het primaire net is minimaal 80 °C, en wordt geregeld met een stooklijn. In een Warmte Overdracht Station (WOS) gaat primair over in secundair met aanvoertemperatuur van 65-70 °C en 40-35 °C retour.

Aan de uitbreiding van het warmtenet in Ede wordt nog steeds druk gewerkt, de bedoeling is dat het een warmterotonde wordt, zie bijlage 5.7, en die rotonde wordt in 2020 gesloten. Het aantal aansluitingen neemt toe, en ook is het de bedoeling dat er aan de aanbodzijde wordt uitgebreid. Zo is het de bedoeling dat het mogelijk wordt om industriële restwarmte in te voeden, en onderzoekt men de mogelijkheden om zonne energie en geothermie in te voeden. Op termijn moet het zo mogelijk zijn om 100% duurzaam te produceren, terwijl op dit moment nog zo'n 10% op jaarbasis door een gasketel wordt geleverd.

Momenteel wordt er warmte geleverd aan ca. 18.500 woningequivalenten, en de totale geleverde warmte is ca. 250.000 GJ per jaar.

Tabel 3-14: Gevens warmtenet Ede

Naam wijk	-
Plaats	Ede
Primair toestel	3 Biomassa WKK installaties
Brandstof	Houtige reststromen
Pieklast toestel	Gasketel
Brandstof	aardgas
Aantal huizen/utiteit	Ca. 18.500 woningequivalenten
Bouwjaar huizen	Zeer divers
Type woningen	Mix in zowel bouwjaar als woningtype
Overig	Ook stoomlevering, elektriciteitslevering en warmtebuffers
Aanvoertemperatuur	Primair net stooklijn, minimaal 80°C secundair net, 65-70°C
Retourtemperatuur	Secundair 35-40°C
Lengte leidingen [m] *	Ca. 30000

* Op basis van schatting, er ligt ruim 30 km netwerk, maar dit is vermoedelijk exclusief de aansluitingen naar de woningen.

3.8.2 Duurzaamheid warmtenet

Onderstaande is deels gebaseerd op aannames, en deels op data van eind 2017: Levering van 250000 GJ (status eind 2017), aanname 20% netverlies. Dat betekent productie 300000 GJ. Hiervan wordt 10% door de gasketel geleverd (status eind 2017), en dus 270000 GJ door de biomassa installaties. Lengte netwerk 30 km, is niet zo precies opgegeven. Vermoedelijk zijn daar de huisaansluitingen niet meegenomen. Bij 15000 aansluitingen met gemiddeld 4 meter per huis, komt er nog 60 km leidinglengte bij, dit heeft veel invloed op de LWD.

Tabel 3-15: Duurzaamheid warmtenet Ede

	Netwerk 7
Productie warmte duurzame bron (hout/biogas) [GJ/jaar]	270.000 GJ (90%)
Productie warmte warmtepomp (electriciteit uit net) [GJ/jaar]	
Productie warmte energie uit fossiele bron (gas met gasketel en/of WKK) [GJ/jaar]	30.000 GJ (10%)
CO ₂ -index [-]	0,125
PER [-]	8
Netverlies [%] geen data	
Lineaire warmtedichtheid [GJ/(a m)]; [MWh/(a m)] *	8,3; 2,3
Theoretische netverlies (curvefit) %	11

* bij 30 km leiding. Bij 90 km wordt het een factor 3 lager, en dan wordt het netverlies volgens de curvefit 19 %.

3.8.3 Analyse

Het warmtenet in Ede heeft al enige jaren het hoogste opwekkingsrendement (zgn. EMG-verklaring) van gecertificeerde warmtenetten in Nederland; in de ranking staat Warmtebedrijf Ede dan ook op de eerste plaats. In 2018 won Ede daarom de brancheprijs voor het beste gecertificeerde grote warmtenet.

Qua temperatuur is het een gewoon 2^e en 3^e generatie netwerk, want er wordt hoge temperatuur water aangevoerd, en ook zelfs stoom geleverd.

Er zijn zeker wat opvallende verschillen van dit warmtenet vergeleken met de andere 6 onderzochte netwerken. Zo valt de hoge PER op. Die is grotendeels te danken aan het hoge percentage biomassa (90%). Ook is dit netwerk groter dan de andere onderzochte netten, en is de lineaire warmtedichtheid opvallend hoger, wat gunstig is voor het netverlies. Deze warmtedichtheid valt waarschijnlijk deels te verklaren doordat er stoom wordt geleverd aan een bedrijf in Ede, en tevens dat er wat utiliteitsgebouwen en industrie zijn aangesloten op het warmtenet, die zorgen voor verhoudingsgewijs een grote warmtevraag. Als het over een aantal jaren lukt om ook de pieklast op een duurzame wijze te voorzien, dan heeft dit warmtenet een oneindig grote PER.

3.9 Overzicht cases

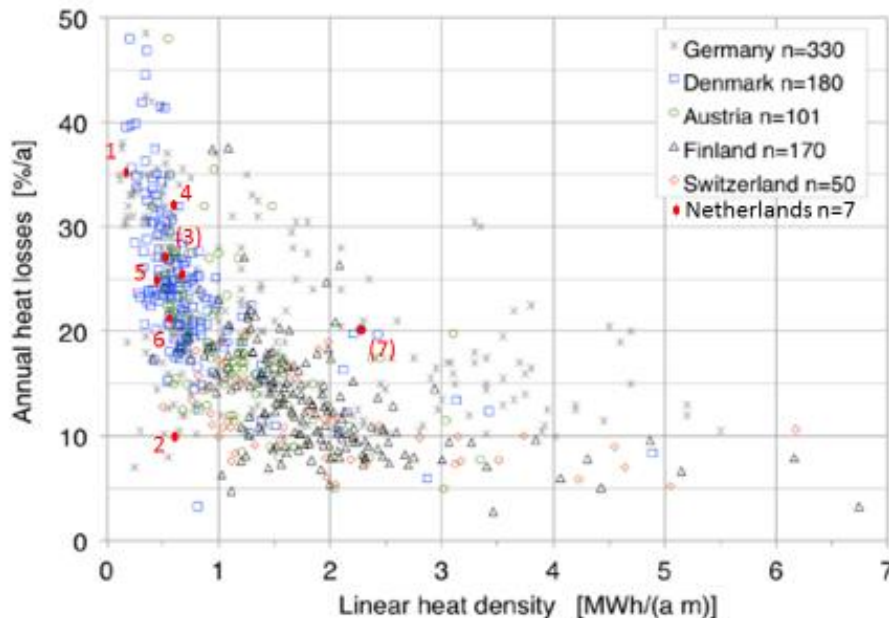
Een overzicht van alle cases is weergegeven in een aparte spreadsheet, en is te vinden in bijlage 6.

De analyse wordt uitgevoerd met 7 cases. Er is gekeken naar de volgende onderdelen:

- De lineaire warmtedichtheid
- Temperatuur niveaus
- Primary Energy Ratio

Lineaire warmtedichtheid/ warmteverliezen

De lineaire warmtedichtheid en de warmteverliezen van 7 bekeken cases is uitgezet in de grafiek van de benchmark (Nussbaumer & Thalmann, 2014), zie *Figuur 3-3*. De lineaire warmtedichtheid varieert van 0.23 tot 0.63 MWh/(a m). De bijbehorende warmteverliezen zijn ook bepaald en weergegeven.



Figuur 3-3: overzicht lineaire warmtedichtheid van de 7 bestudeerde netwerken, vergeleken met benchmark. Van een paar netwerken staan getallen tussen haakjes (x) vanwege onzekerheid mbt herkomst leidinglengte

Opvallend is dat lineaire warmtedichtheid van de bestudeerde cases allen laag zijn, bij 6 van de 7 warmtenetten lager dan 1 MWh/(a m). In de studie van Nussbaumer zitten er ook veel netwerken in dat gebied, maar ook een behoorlijk percentage zit tussen 1 en 2, en er zijn ook nog veel netwerken met een lineaire warmtedichtheid van meer dan 2 MWh/(a m). Vergeleken met de totale studie van Nussbaumer is het dus aan de lage kant. De meeste overeenkomst vertonen de 7 cases met de data uit Denemarken, zie bijlage 5. De studie van Nussbaumer wijst uit dat netwerken met een lage warmtedichtheid over het algemeen hoge verliezen met zich meebrengen. Die trend is ook zichtbaar in de figuur. Dat dit logisch is wordt ook uitgelegd in de paragraaf over Lineaire warmtedichtheid 2.7.1. Hoe het komt dat de netwerken zo een lage warmte dichtheid hebben vergeleken andere landen zal verder uitgezocht moeten worden. Het is in ieder geval zo dat hoe dichter de woningen op elkaar zijn gebouwd, hoe korter de leidingen kunnen te zijn, hoe lager de leiding verliezen.

Mogelijk zijn de wijken in Nederland ruimer van opzet of zijn de wijken in andere landen compacter of zijn de warmtecentrales bij de beschouwde cases verder van de wijk gelegen. Het zou daarom interessant zijn om de bebouwingsdichtheid ook mee te nemen in de vergelijking.

Het kan ook aan de warmtevraag liggen: mogelijk hebben de huizen in Nederland een lagere warmtevraag en zijn ze beter geïsoleerd. Ook kan het zijn dat er bij de netten met een hoge dichtheid grote industriële gebruikers of nutsgebruikers aan het netwerk zijn gekoppeld. Het zou daarom ook extra informatie verschaffen als de warmtedichtheid en warmtevraag van de betreffende gebieden worden vergeleken. Het kan een combinatie zijn van al deze factoren.

Het feit dat er veel leidingwerk ligt voor de warmtevraag heeft niet alleen gevolgen voor de energieverliezen maar ook voor het kostenaspect, want uit de bestudering van de business cases is gebleken dat de kosten van de warmtenetten grotendeels bepaald worden door de omvang van de leiding netten. Indien het mogelijk is om de lineaire warmtedichtheid te reduceren dan snijdt het mes aan twee kanten.

Temperatuurniveaus/ warmteverliezen

Voor het merendeel van de onderzochte cases geldt dat de aanvoer temperaturen tussen de 70 en de 80 graden liggen en dat retour temperaturen tussen de 40 en de 50 à 60 graden liggen, daarmee zijn de warmtenetten grotendeels 3^e generatie warmtenetten van midden temperatuur niveau. Eén warmtenet, dat van Thermobello (netwerk 2, Eva Lanxmeer in Culemborg), heeft als toevoertemperatuur 50 graden. Daarnaast heeft dat warmtenet ook nog een stooklijn, waarmee de warmteverliezen in de zomer praktisch tot nul reduceren. Dit lage temperatuurnet heeft als enige een laag warmteverlies, van rond de 10 %. De overige warmteverliezen variëren van 25 % tot 35 %. Deze trend komt overeen met de verwachting dat laag temperatuurnetten lage warmteverliezen met zich mee brengen (zie ook paragraaf 2.8). Er zijn nog niet veel cases onderzocht, maar een voorzichtige conclusie kan zijn dat lage warmteverliezen slechts mogelijk zijn bij lage temperatuur netten. In de benchmark zijn ook diverse netten met lage warmteverliezen, het is niet bekend of dit ook juist de netten zijn met lage nettemperaturen. Mogelijk kunnen ook netten met hoge lineaire warmtedichtheden of zeer goed geïsoleerde netten leiden tot zeer lage warmteverliezen.

Wel kan gesteld worden dat verlagen van de nettoevoer temperatuur beneden de 70 à 75 graden alleen mogelijk is als er andere of extra voorzieningen worden getroffen voor warm tap water. Meer over deze mogelijkheden is te lezen in Regeltechnische aspecten van warmtenetwerken (Leeuwen, Wijnant, & Papa, 2019).

Primair Energie Ratio (PER)

Als naar de cases wordt gekeken, valt op dat de wijk met de hoogste PER de wijk is waar het hoogste percentage duurzame bronnen wordt ingezet, dit is netwerk 7 van warmtenet Ede. Het gaat bij de PER vooral om het grootste aandeel van duurzame brandstoffen, ook netwerk 4, Zwolle Muziekwijk scoort daarop goed, terwijl het warmteverlies bij deze wijk relatief hoog is, maar dat is niet van doorslaggevend belang. De vraag is dus hoe ervoor gezorgd kan worden dat het aandeel duurzame brandstoffen zo hoog mogelijk is. Voor netwerk 2, Thermobello in Culemborg, zou de PER enorm verhoogd kunnen worden als de warmtepompen worden aangedreven door elektriciteit die 100% duurzaam is. Er is dan een PER haalbaar van 6.5 Een andere manier om dit te beïnvloeden kan door te zorgen dat de pieklast installatie zo min mogelijk wordt ingeschakeld en dat er zo veel mogelijk wordt geleverd met de duurzame installatie in basislast. Dit kan bijvoorbeeld bereikt worden door voldoende grote buffervaten. Als bij de verschillende cases wordt gekeken naar de grootte van de pieklastketels, dan valt op dat de grootte sterk varieert bij de installaties. Wijk 4 en wijk 5 zijn op het eerste oog redelijk vergelijkbare installaties met houtsnipperketels en/of biogasketels en beide met gasketels voor de piekvoorziening. Wijk 5 (Windmolenbroek) is qua omvang (warmtevraag en aantal woningen) ca. 3 keer zo groot als wijk 4 (Muziekwijk), het vermogen van de duurzame installatie is ook een factor 3 groter, maar bij wijk 4 is het buffervat twee keer zo groot als bij wijk 5, terwijl het vermogen van de piekinstallatie bij wijk 4 een factor 6 lager is dan bij wijk 5. Het lijkt erop dat de naar verhouding grote buffer heeft geresulteerd in het grotere percentage duurzame warmte (88% bij wijk 4 versus 81% bij wijk 5). Bij wijk 4 zijn de pieken meer opgevangen door de buffer en bij wijk 5 meer door de gasketels. Bij het ontwerp is het belangrijk om te kijken naar de jaarbelastingduurkromme om te zorgen dat er een optimale installatie wordt gedimensioneerd, afhankelijk van de warmtevraag over het jaar. Dit vraagstuk is een kwestie van goed ontwerp en optimalisatie van de installatie, waaronder dimensionering van buffervaten en pieklastvoorziening, waarbij ook gekeken moet worden naar de financiële optimalisatie.

3.10 Toekomstige ontwikkelingen

In paragraaf 2.5.6 is aangegeven wat de toekomstige ontwikkelingen zouden moeten zijn. Gekeken wordt hoe deze inzichten toegepast zouden kunnen worden in de bestudeerde cases.

Volgens Lund (Lund, et al., 2015) (zie ook 2.5.6) moeten warmtenetten worden aangelegd in wijken met hoge warmtedichtheid waardoor de leidingverliezen relatief klein zijn. Dit is ook in de casestudie naar voren gekomen. Uit de casestudie is ook gebleken dat de lineaire warmtedichtheid voor de bestudeerde cases relatief laag is, en

daarmee het energieverlies relatief hoog. Een lage warmtedichtheid heeft negatieve gevolgen voor de business case, en is daarmee een belemmering voor de toepassing van warmtenetten. De vraag is waar het aan ligt dat in deze bestudeerde cases de LWD zo laag ligt, en hoe in de toekomst andere keuzes gemaakt kunnen worden. Ook geeft Lund aan dat toekomstige ontwikkelingen gericht zouden moeten zijn op lage temperatuurtoepassingen. In de bestudeerde cases waren de meeste netwerken midden temperatuurnetten (toevoer temperatuur 70/80 graden), en vaak aangelegd in een nieuwbouwwijk. Toch is de keuze gemaakt om niet voor een LT netwerk te kiezen, terwijl dit, gezien het karakter (nieuwbouw en goede isolatie) van de huizen, waarschijnlijk wel mogelijk was geweest. Het is in dit project niet onderzocht wat de overwegingen waren om niet voor een LT net te kiezen, en of dit überhaupt is overwogen. De consequentie van keuze voor een LT net betekent echter wel dat er extra of andere voorzieningen moeten komen voor bereiding van het warm tap water, dit heeft mogelijk meegespeeld in de afweging.

Daarnaast geeft Lund aan dat de toekomstige ontwikkelingen gezocht moeten worden in toepassing van lage temperatuurbronnen en duurzame bronnen als zon en geothermie. Slechts één van de 7 bestudeerde cases (Thermobello) maakt gebruik van een lage temperatuurbron. Deze scoort zeer goed op basis van warmteverlies, maar kan nog sterk verduurzamen door gebruik te maken van duurzaam opgewekte elektriciteit.

4. Conclusies en aanbevelingen

Conclusies

Er is een literatuuronderzoek uitgevoerd op grond waarvan de belangrijkste technische parameters zijn vastgesteld waarmee een warmtenet gekarakteriseerd kan worden. Op grond hiervan is een karakteriseringstabel opgesteld.

De belangrijkste aspecten die een warmtenet karakteriseren zijn:

- Grootte van het net: groot versus kleinschalig.
- Temperatuur niveau en generatie waartoe het warmtenet behoort
- Opwekking van de warmte: restwarmte, biogas, fossiel, duurzame elektriciteit, etc.
- Energiebalans en aandeel duurzame energie. Op grond hiervan kan onder andere de Primary Energy Ratio worden bepaald en het netverlies
- Gebiedseigenschappen: type woningen en isolatie graad
- Duurzaamheid: Primary Energie Ratio en netverlies
- Lineaire warmtedichtheid van het warmtenet

De duurzaamheid van het warmtenet kan vastgesteld worden op basis van de Primary Energie Ratio (PER), welke wordt weergegeven door de hoeveelheid warmte die afgeleverd wordt, gedeeld door het fossiele brandstof gebruik. Het warmteverlies van het net geeft de efficiency weer van de warmtedistributie.

Uit het literatuuronderzoek is gebleken dat de lineaire warmtedichtheid de belangrijkste factor is voor het warmteverlies in het net. De lineaire warmtedichtheid is gedefinieerd als de getransporteerde warmte per jaar gedeeld door de tracé lengte van het net. Andere aspecten die het leidingverlies bepalen zijn: Het temperatuurniveau, leiding layout en mate van isolatie van de leidingen en de diameter van de leidingen: hoe groter de diameter (bij gelijkblijvende warmtelevering) hoe hoger het warmteverlies en de kapitaalkosten.

Er is een 7 tal cases bestudeerd en gekarakteriseerd en geanalyseerd. Hieruit is het volgende gebleken: De warmtedichtheid is uitgezet tegen het warmteverlies van het distributie net. De resultaten hiervan zijn vergeleken met een Europese benchmark studie naar 832 warmtenetten. De 7 bestudeerde Nederlandse netwerken hebben een lage lineaire warmtedichtheid vergeleken de Europese netwerken. Het feit dat er veel leidingwerk ligt voor de warmtevraag heeft niet alleen gevolgen voor de energieverliezen maar ook voor het kostenaspect, want uit de bestudering van de business cases is gebleken dat de kosten van de warmtenetten grotendeels bepaald worden door de omvang van de leiding netten. Als de lineaire warmtedichtheid gunstiger is dan heeft dit positieve gevolgen voor zowel het energiegebruik als de kosten kant.

Voor het merendeel van de onderzochte cases geldt dat de aanvoer temperaturen tussen de 70 en de 80 graden liggen en dat retour temperaturen tussen de 40 en de 50 à 60 graden liggen, daarmee zijn de warmtenetten grotendeels 3^e generatie warmtenetten van midden temperatuur niveau. Eén warmtenet, dat van Thermobello (Eva Lanxmeer, Culemborg), heeft als toevoertemperatuur 50 graden. Dit lage temperatuurnet heeft als enige van de 7 onderzochte netten een laag warmteverlies, van rond de 10 %. Bij de overige variëren de warmteverliezen van 25 % tot 35 %. Wel kan gesteld worden dat verlagen van de nettoevoer temperatuur beneden de 70 à 75 graden alleen mogelijk is als er andere of extra voorzieningen worden getroffen voor warm tap water. Bij één van de onderzochte netten was dit zelfs de aanleiding om de aanvoertemperatuur 5 graden hoger te kiezen dan aanvankelijk de bedoeling was.

De duurzaamheid van het warmtenet hangt voornamelijk af van het aandeel duurzame energie aan de opwekkant.

Aanbevelingen

De 7 bestudeerde Nederlandse netwerken hebben een zeer lage lineaire warmtedichtheid vergeleken de Europese netwerken. De studie van Nussbaumer (Nussbaumer & Thalmann, 2014) wijst uit dat netwerken met een lage warmtedichtheid over het algemeen hoge distributieverliezen met zich meebrengen. Hoe het komt dat de netwerken zo een lage warmte dichtheid hebben vergeleken andere landen en netwerken zal verder onderzocht moeten worden. Aanbevolen wordt om de aspecten op een rij te zetten die de lineaire warmtedichtheid beïnvloeden en voor een aantal karakteristieke cases uit te werken en te analyseren wat de verschillen zijn. Mogelijk leidt dit tot aanbevelingen om slimme ontwerpkeuzes te maken of leidt het tot informatie om deze lineaire warmtedichtheid te beïnvloeden en zo de warmteverliezen te reduceren.

Voor het merendeel van de onderzochte cases geldt dat de aanvoer temperaturen tussen de 70 en de 80 graden liggen met bijbehorende warmteverliezen van 25 % tot 35 %. Toekomstige ontwikkelingen in warmtenetten moeten gezocht worden in lage temperatuurtoepassingen. Echter, lagere net temperaturen zijn enkel mogelijk als er een extra of andere voorzieningen worden getroffen voor maken van warm tap water. Om energie efficiëntere warmtenetten te krijgen zal de warm tapwatervoorziening zo veel mogelijk losgekoppeld moeten worden van het temperatuurniveau van het warmtenet. De nettemperatuur kan dan lager worden dan 70 graden.

De PER wordt voornamelijk bepaald door het aandeel duurzame energie. Belangrijk is dat dit duurzame aandeel zo hoog mogelijk is. Dat houdt in dat eventuele aanwezige warmtepompen bij voorkeur worden aangedreven door duurzame elektriciteit en dat de duurzame installatieonderdelen een hoge bezettingsgraad hebben. De bestudeerde cases laten zien dat de aanwezige buffervaten sterk variëren qua grootte, en dit heeft invloed op het mogelijk aantal draaiuren van de duurzame installatie.

5. Bibliography

(n.d.).

alle cijfers. (2018, oktober 23). Retrieved from Windmolenbroek Almelo: <https://allecijfers.nl/wijk/windmolenbroek-almelo/>

Biemans. (2018, oktober 18). Email contact. (Wijnant, Interviewer)

Danfoss. (n.d.). Instructions for designing district heating systems. In *8 steps controll of heating systems* (pp. 89-112). Danfoss.

DHC Holland. (2014). *Overzicht afleversets voor warmtewinning (DE14000030)*. RVO.

Energiekaart.net. (2018, oktober 23). Retrieved from Warmtenet windmolenbroek: <https://energiekaart.net/initiatieven/warmtenet-windmolenbroek/>

Fluxenergie. (2018, oktober 23). Retrieved from Enschede warm voor en door biomassa: <https://www.fluxenergie.nl/enschede-warm-voor-en-door-biomassa/>

Frederiksen, S., & Werner, S. (2013). *District heating and cooling*. Studentlitteratur.

Friedel, P., Oostendorp, P., & Wagener, P. (2013). *Warmte in de woonomgeving*. Gasterra/Castel International publishers.

Gilani, B., Bachmann, M., & Kriegel, M. (2017). Evaluation of the temperature regimes of multi-level thermal networks in urban areas through exergy analysis. *Energy Procedia*, 122(Elsevier), 385-390.

Groot, M., Leguijt, M., Benner, J., & Croezen, H. (2008). *Configuraties en optimalisaties van het warmtenet in Amsterdam*. Delft: CE Delft.

Gudmundsson, O. (2019). *Distribution of district heating 1st generation*. Retrieved juni 2018, from https://www.linkedin.com/pulse/distribution-district-heating-1st-generation-oddgeir-gudmundsson?trk=pulse_spock-articles

Gudmundsson, O. (2019). *Distribution of district heating 2nd generation*. Retrieved Juni 2018, from <https://www.linkedin.com/pulse/distribution-district-heating-2nd-generation-oddgeir-gudmundsson>

Gudmundsson, O. (2019). *Distribution of district heating 3rd generation*. Retrieved june 2018, from <https://www.linkedin.com/pulse/distribution-district-heating-3rd-generation-oddgeir-gudmundsson>

Gudmundsson, O. (2019). *Distribution of district heating 4th generation*. Retrieved june 2018, from <https://www.linkedin.com/pulse/distribution-district-heating-4th-generation-oddgeir-gudmundsson>

Hof, J. V., & Lier, G. (2019). *Governance warmtetransitie*.

Hordijk, T., Janssen, M., & Kuipers, N. (2017). *Eindverslag LT-project WieFM Saxion*. Enschede.

Hordijk, T., Janssen, M., & Kuipers, N. (2018, 5). Vergelijking van prestatie warmtenetten Oost Nederland. *project brochure 3 Warmte in de Euregio focuseren en moderniseren*, pp. 18-21.

Lake, A., Rezaie, B., & Beyerlein, S. (2017). Review of district heating and cooling system for a sustainable future. *renewable and sustainable energy reviews*, 67(Elsevier), 417-425.

Leeuwen, R. v., Wijnant, S., & Papa, T. (2019). *Regeltechnische aspecten van warmtenetwerken*. Enschede.

Lund, H., Werner, S., Wilthire, R., Svendsen, S., Thorsen, J., Hvelplund, F., & Mathiesen, B. (2015). 4th Generation District Heating (4GDH) Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. *Energy*, 68(Elsevier), 1-11.

Mans, W., & Verheul, H. (2017). *EMG berekening warmte-en koudenet Meppel*.

Masman. (2018, oktober 12). Gegevens Zwolle Muziekwijk en Almelo Windmolenbroek, mail contact.

Meppel Energie. (n.d.). Retrieved 2019, from Meppel Energie: <https://www.meppelenergie.nl/>

Nussbaumer, T., & Thalmann, S. (2014). *Status Report on District Heating Systems in IEA Countries*. Zurich: IEA bioenergytask 32.

Pico. (n.d.). (Geodan, TNO, Alliander, Ecofys, ESRI Nederland, NRG031) Retrieved maart 2017, from pico.geodan.nl

Postcode.nl. (n.d.). Retrieved maart 2017, from <https://www.postcode.nl/>

Schepers, B., & Valkengoed, M. v. (2009). *Warmtenetten in Nederland, Overzicht van grootschalige en keinschalige warmtenetten*. Delft: CE Delft.

stadsverwarming.nl in Utrecht. (n.d.). Retrieved juli 19, 2018, from <http://www.stadsverarming.nl/alternatieven-voor-verduurzaming-stadsverwarming-in-utrecht/>

stadverwarming Almelo. (2019). Retrieved from cogas.nl: <https://www.cogas.nl/Wat-we-doen/Stadsverwarming-Almelo>

Verschuur. (2018, oktober 30). e-mail contact. (Wijnant, Interviewer)

Vliet, E. v., Keijzer, J. d., Slingerland, E., Tilburg, J. v., Hofsteenge, W., & Haaksma, V. (2016). *Collectieve warmte naar lage temperatuur: een verkenning van mogelijkheden en routes*. Utrecht: Ecofys.

Wetter, C., Brüggling, E., Willenbrink, H., & Russell-Wells, K. (2018). *Wärmenetzbenchmark, Qualitativer vergleich bestehender Wärmenetze*. Steinfurt: FH Munster.

WiEfm. (2016). Warmte in de Euregio; focuseren & moderniseren (1e WiEfm brochure).

wikipedia. (n.d.). *warmtedistributie*. Retrieved juli 19, 2018, from <https://nl.wikipedia.org/wiki/Warmtedistributie>

Willems, E., Kunnen, N., Schurink, E., Nollet, J., & Haas, G. d. (2017). *Slagvaardig ontwikkelen van lokale laag temperatuur warmtenetten*. TKI Olec.

Woningstichting SWZ. (sd). *Wijk Muziekwijk*. Opgeroepen op april 2017, van <https://www.swz.nl/in-de-wijken/muziekwijk>

Bijlage 1. Voorbeelden van Europese LT netten

In (Vliet, et al., 2016) wordt worden enkele voorbeelden van LT warmtenetten beschreven.

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.

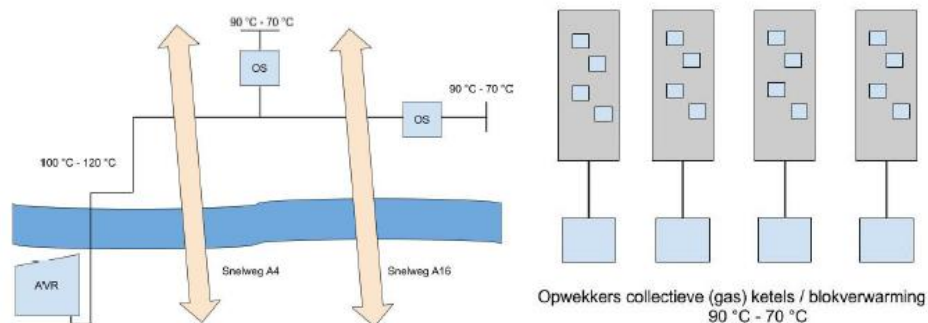
Bijlage 2. Temperatuur niveaus van oudere grootschalige warmtenetten

Voor de oudere grootschalige warmtenetten (HT netten) worden in de literatuur diverse bedrijfstemperaturen genoemd voor het primaire en secundaire circuit.

a. Friedel (Friedel, Oostendorp, & Wagener, 2013) beschouwt een grootschalig warmtenet, waarbij restwarmte vrijkomt bij de productie van elektriciteit. Hierbij wordt veelal fossiele brandstof verstoekt: het primaire net heeft typische temperaturen van 120 °C aanvoer en 100 °C retour. Het secundaire net 90 °C aanvoer heeft en 70 °C retour.

Literatuur bron	Primair net	Secundair net
a. Friedel (Friedel, Oostendorp, & Wagener, 2013)	120-100 (toevoer- retour)	(90-70) (toevoer- retour)
b. Vliet (Vliet, et al., 2016)	100-120 (range toevoer)	70-90 (range toevoer)
c. Danfoss (Danfoss)	130-70 (toevoer- retour)	120-70 (toevoer- retour)
gemiddeld	120-90	100-70

b. In Vliet (Vliet, et al., 2016) is de case van warmtenet Rotterdam beschouwd (zie figuur). De warmte is afkomstig van AVR Rozenburg. Hierbij zijn de aanvoer temperaturen van het primaire en secundaire net benoemd. Een schematische weergave van de situatie is gegeven in onderstaande figuur uit (Vliet, et al., 2016).



Figuur 5-1: warmtenet Rotterdam uit (Vliet, et al., 2016)

c. Danfoss (Danfoss) gaat bij het ontwerpen uit van temperaturen in het primaire circuit van 130-70 en in het secundaire circuit van 120-70 (zie figuur).

Bijlage 3. Karakteristieke aspecten van de diverse generaties warmtenetten

Karakteristieke aspecten van de diverse generaties warmtenetten, uit (Lund, et al., 2015).

	1st Generation	2nd Generation	3rd Generation	4th Generation
Label	Steam	In situ	Prefabricated	4GDH
Period of best available technology	1880–1930	1930–1980	1980–2020	2020–2050
 Distribution and demand				
Heat carrier	Steam	Pressurised hot water mostly over 100 °C	Pressurised hot water often below 100 °C	Low-temperature water 30–70 °C
Pipes	In situ insulated steel pipes	In situ insulated steel pipes	Pre-insulated steel pipes	Pre-insulated flexible (possible twin) pipes
Circulation systems	Steam pressure	Central pumps	Central pumps	Central and decentralised pumps
Substations heat exchanger	No	Tube-and-shell heat exchangers	Without or with plate heat exchangers	Probably mostly with plate heat exchangers Introduction of flat-stations (decentralised supply of hot water in new buildings)
Buildings	Apartment and service sector buildings in the city	Apartment and service sector buildings 200–300 kWh/m ²	Apartment and service sector buildings (and some single-family houses) 100–200 kWh/m ²	New buildings: <25 kWh/m ² Existing buildings: 50–150 kWh/m ²
Metering	Condensate meters in order to measure the amount of steam used.	Initially only flow meters in substations, later replaced by heat meters. Annual or monthly readings. Sometimes use of allocation meters on radiators for internal distribution of heat costs.	Heat meters and sometimes additional metering of flow in order to compensate for high return temperatures. Wireless readings introduced for more frequent readings.	As earlier but continuous reading used for continuous commissioning of customer heating system.
Radiators	High-temperature radiators (+90 °C) using steam or water.	High-temperature radiator (90 °C) using district heating water directly or indirectly.	Medium-temperature radiators (70 °C) using district heating water directly or indirectly. Floor heating.	Floor heating. Low-temperature radiators (50 °C). Indirect system.
Hot water	Hot water tanks heated directly with steam or from a secondary water circuit.	DHW tank heated to 60 °C. Circulation at 55 °C when needed.	Heat exchanger heating DHW to 50 °C. Domestic hot tank heated to 60 °C. Circulation at 55 °C when needed.	Very efficient local heat exchanger heating DHW to 50–40 °C. In district heating systems with supply temperature of 30 °C, a heat exchanger preheats DHW and a heat pump with buffer tank and heat exchanger increases DHW temperature to 40 °C by cooling down the return temperature.

Bijlage 4. Warmteverliezen in Europese netten

In bijgevoegde grafieken zijn de trendlijnen te zien van vijf afzonderlijke onderzochte landen.

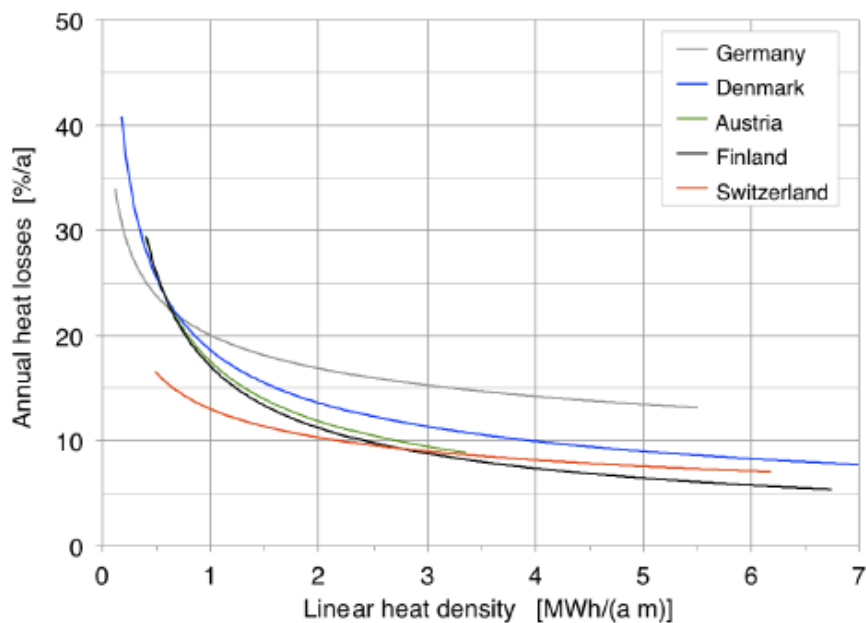


Figure 7 Heat distribution losses as function of the linear heat density for systems in Germany, Denmark, Austria, Finland and Switzerland. Only the potential trendlines are displayed.

Figuur 5-2; trendlijnen voor warmeverlies afhankelijk van de lineaire warmtedichtheid voor de onderzochte landen.
(Nussbaumer & Thalmann, 2014)

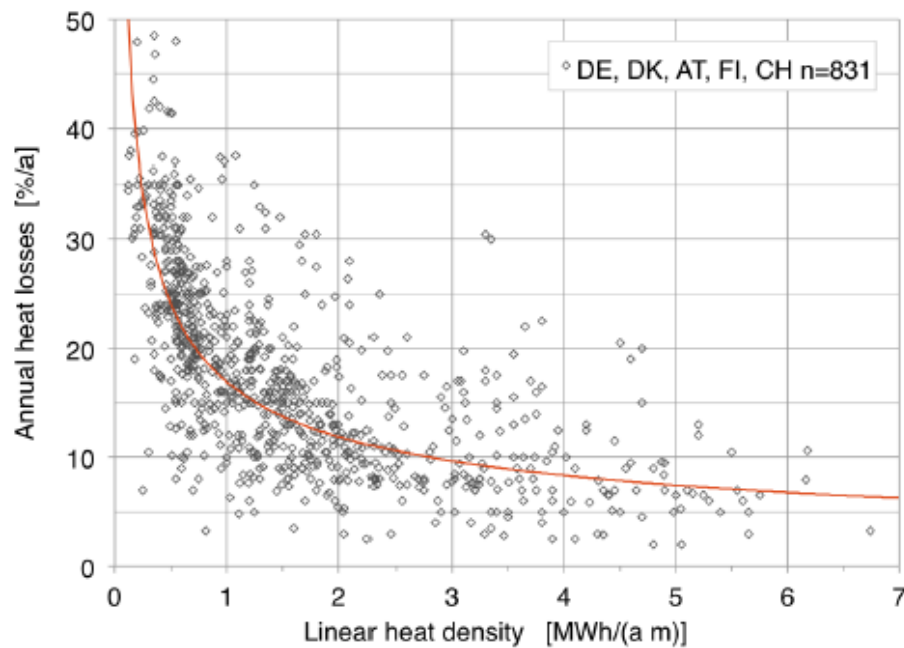


Figure 8 Heat distribution losses as function of the linear heat density. The district heating networks in Germany, Denmark, Austria, Finland and Switzerland were summarised in a potential trendline. Data basis: 831 plants.

Figuur 5-3: trendlijn voor alle installaties waarop curvefit is gebaseerd, (Nussbaumer & Thalmann, 2014)

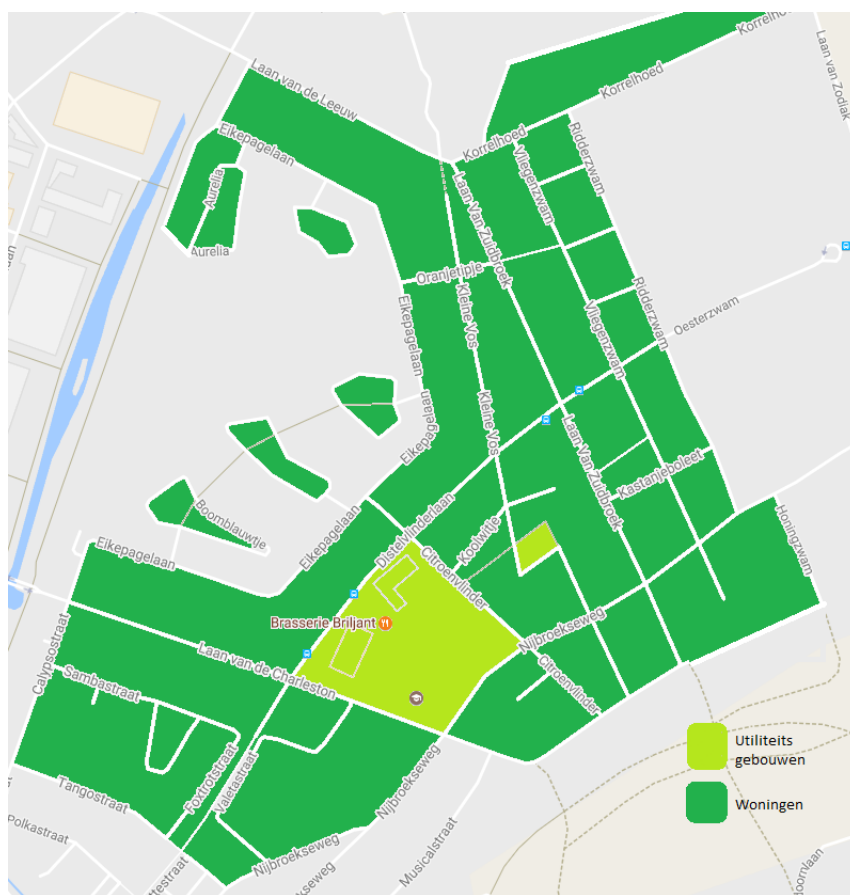
In oranje is de curvefit getekend, de formule die dit beschrijft is:

$$\text{Annual heat distribution losses in [\%/a]} = 17 \cdot (\text{linear heat density})^{-0.5}$$

Met deze curve fit zijn de warmteverliezen in de onderzochte cases vergeleken.

Bijlage 5. Gegevens behorend bij de cases

BIJLAGE 5.1 WARMTENET 1: APeldoorn, ZUIDBROEK



Figuur 5-4: Kaart van de wijk Apeldoorn zuidbroek, groene velden zijn aangesloten huizen (Hordijk, Janssen, & Kuipers, 2017)

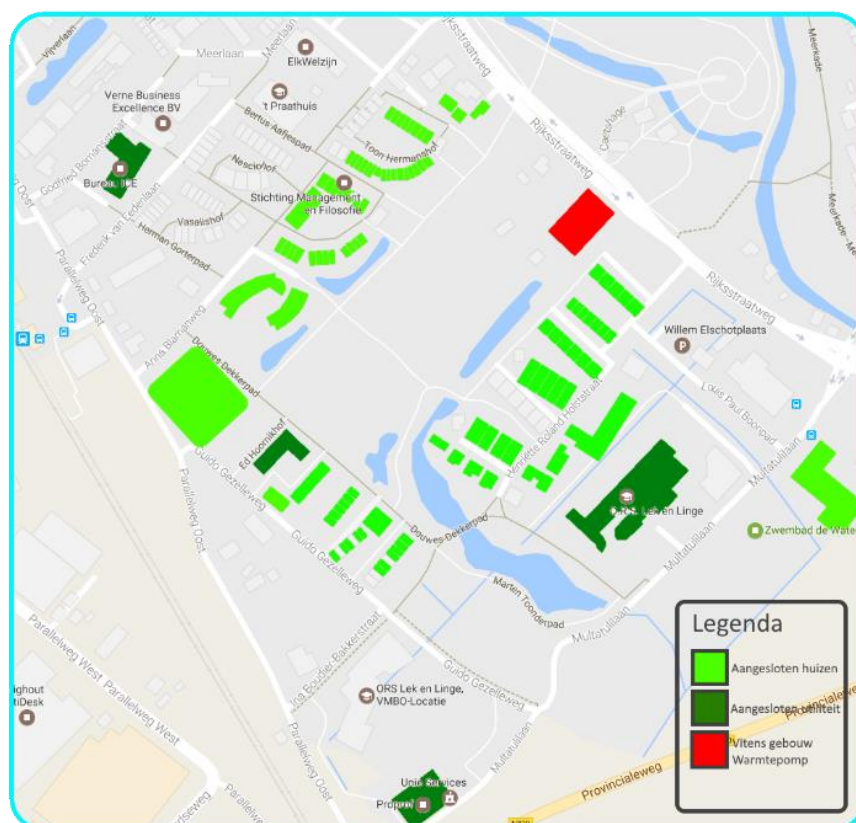
BIJLAGE 5.2 WARMTENET 2: CULEMBORG EVA LANXMEER

De dichtheid van de huizen en bedrijven in Eva-Lanxmeer is hoog, en de EPC van de woningen bedraagt circa 0,5 en 0,6 waarmee de woningen voldoende aan de eis van 2011 (EPC=0.6), zie bijlage 1 van (Hof & Lier, 2019).

Tabel 5-1 woningen Culemborg (Hordijk, Janssen, & Kuipers, 2017)

Soort woning	Aantal	Woonoppervlak [m ²]	Gemiddeld bouwjaar
Vrijstaand	4	164,0	2006
2/1 kap	10	196,4	2007
Rij hoek	33	123,6	2007
Rij tussen	98	118,2	2005
Appartement	63	83,7	2006
Totaal	208		

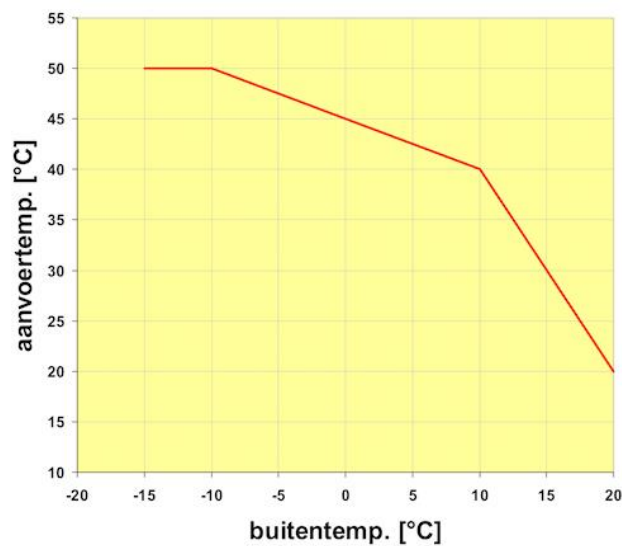
Hieronder is een overzicht van de plattegrond van de wijk zichtbaar.



Figuur 5-5: kaart wijk Eva Lanxmeer in Culemborg

De aanvoertemperatuur is weergegeven in *Figuur 5-6*. Voor de retour temperatuur geldt het volgende:

- T_{retour} ligt in de winter circa 5 graden lager dan T_{aanvoer} (dus ΔT is 5 graden), in de warmere periodes is de ΔT wat kleiner (rond 4 graden),
- een typisch wintergeval is bijv aanvoer 45 graden, retour 40, en
- een typisch voorjaar/najaar geval is aanvoer 40 graden, retour 36.



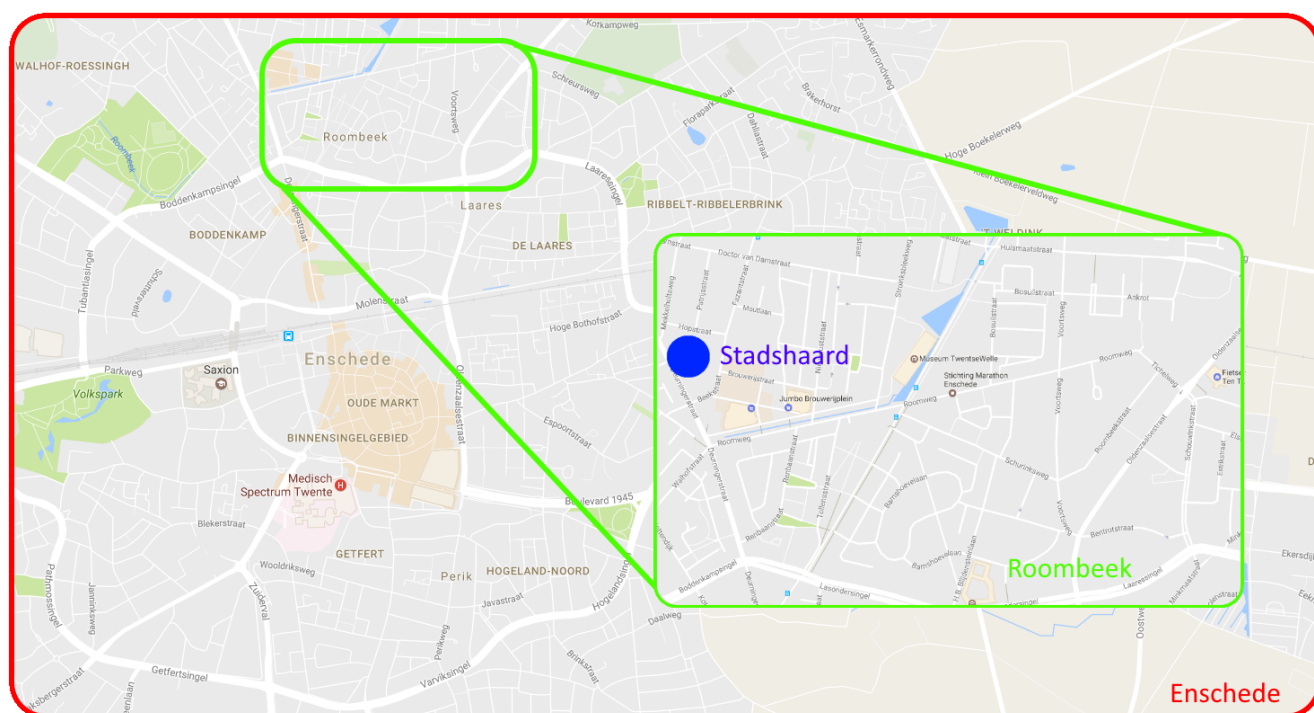
Figuur 5-6: Aanvoertemperatuur afhankelijk van buitentemperatuur warmtenet Themobello

BIJLAGE 5.3 NETWORK 3 ROOMBEEK

Roombeek is een nieuwbouwwijk in Enschede, die opgebouwd is na de vuurwerkramp (mei 2000). Verdeling over de huizentypes zie **Tabel 5-2**

Tabel 5-2: onderverdeling type huizen Roombeek

Huizen	Aantal	Bouwjaar
Appartement	384	2007
Rij-hoek	128	2005
Rij-tussen	449	2005
Vrijstaand	256	2006
2-onder-1-kap	64	2006
Totaal	1281	



Figuur 5-7 : Plattegrond wijk Roombeek in Enschede

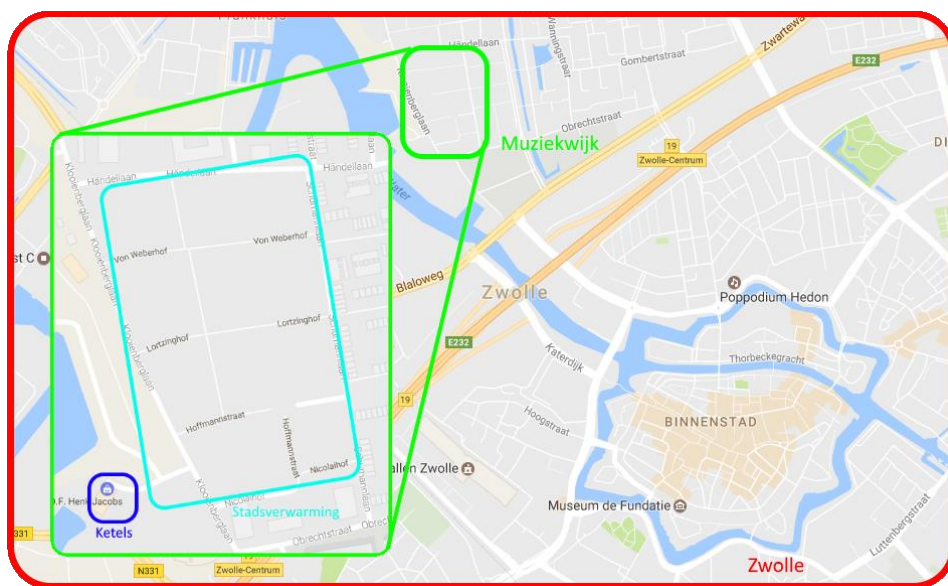
BIJLAGE 5.4 ZWOLLE MUZIEKWIJK

In Tabel 5-3 zijn de gegevens te vinden voor huistypes van Zwolle Muziekwijk.

De huizen in de Muziekwijk zijn gebouwd tussen 2011 en 2015 en zijn goed geïsoleerd, de EPC is 0,7 (de eis was 0,8).

Tabel 5-3: Verdeling van woningtypes Zwolle Muziekwijk

Soort woning	Aantal	Woonoppervlak [m ²]
Rij tussen	171	108
Rij hoek	39	114
Appartement	81	90
Galerijwoning	42	76
Totaal	333	



Figuur 5-8 Plattegrond Zwolle met situering Muziekwijk

BIJLAGE 5.5 ALMELO WINDMOLENBROEK

Uit de warmteatlas van het RVO blijkt dat het warmtenet Windmolenbroek in Almelo in totaal ongeveer 830 aansluitingen heeft. Hieronder vallen ongeveer:

- 130 hoekwoningen
- 250 tussenwoningen
- 16 2/1 kap
- Een appartementen gebouw met 255 appartementen, en nog 18 kleinere met 10 appartementen
- 3 school gebouwen

83 % van deze woningen is gebouwd voor 2000 en 19 % na 2000. (alle cijfers, 2018)

BIJLAGE 5.6 MEPEL NIEUWVEENSELANDEN



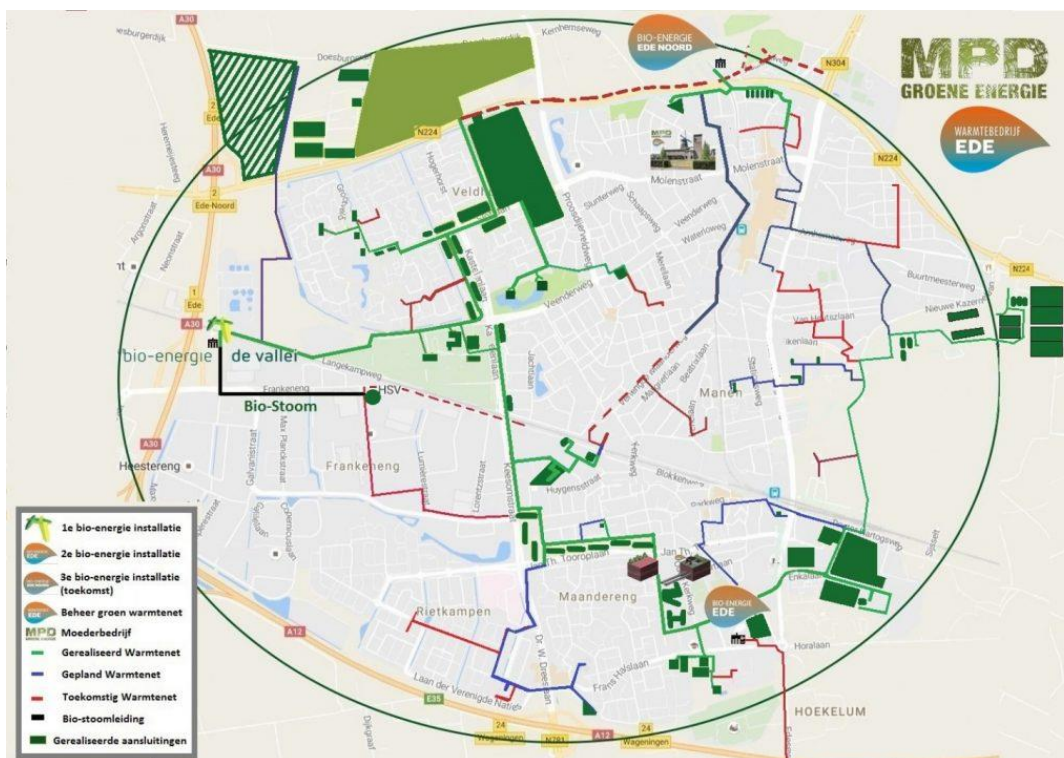
Figuur 5-9: het gebied Nieuwveenselanden in Meppel (Mans & Verheul, 2017)

In totaal zijn er 465 woningen gepland:

- ✓ 144 rij-tussenwoningen
- ✓ 66 rij hoekwoningen
- ✓ 74 twee-onder-één-kap woningen
- ✓ 86 vrijstaande woningen
- ✓ 95 appartementen

Maximaal 10% van de woningen zal niet worden aangesloten op het warmte/koudenet.

BIJLAGE 5.7 WARMTENET EDE



Figuur 5-10 : het warmtenet Ede, inclusief toekomstige uitbreiding

Bijlage 6. Karakteriseringtabel voor de 7 onderzochte cases

	1	2	3	4	5	6	7
NET	Apeldoorn	Culemborg	Roombeek	Zwolle	Almelo	Meppel	Ede
generatie	3	4	3	3	3	3	3
temperatuur aanvoer	70-80	max 50 (stooklijn)	70-80	75	80gr bij Ogr buiten; 75 bij 25 graden buiten	70-80	80 primair net
Temperatuur retour	40-50	T aanvoer- 5	55	55-65	55-70	20-35	35-40
warmtenet							
vermogen [MW]		2 MW	11,6 MW	1,25 MW	5,4 MW	1 MW	onbekend
aantal aansluitingen	1700 woningen en utiliteitsgebouwen (groei naar 2300-2500 woningen)	200 woningen en utiliteitsgebouwen	1300 woningen en utiliteitsgebouwen	300 woningen	830 woningen 4 utiliteitsgebouwen 3 scholen	465	18.500 woning equivalent
warmte							
energiebron	Biogas, houtsnippers, fossiel gas	drinkwaterbasin, fossiel gas	fossiel gas	Houtsnippers, gas	houtpellet, stortgas, gas	houtpellets, gas, duurzame elektriciteit	houtige reststromen
installatieonderdelen	Biogas WKK, houtsnipperketels, gasketels, 2 buffervaten	warmtepomp 790 kW, 2 gasketels, beiden 640 kW, buffer 50 m3	WKK 1.6 MW, 2 gasketels samen 10 MW, 2 buffers elk 200 m3	buffervat 30 m3, houtsnipperketel 500 kW, 2 gasketels samen 750 kW	Houtsnipperketels 4*199 kW, gasketel 2*2300 kW, buffer 15 M3	2 biomassa-ketels, gasketel, warmtepomp, buffer, ook koude levering	3 biomassa WKK's gasketel, buffers

Warmtenetten: Technische karakterisering

Pagina 65 / 65

duurzaam [GJ/jr]/(%)	67260 (76 %)			8753 (88%)	19474 (64%)	13666 (80%)	270000 (90%)
warmtepomp (electriciteit uit net) [GJ/jr]/(%)		8589 GJ/a (87%)				656 (4%)	
fossiel [GJ/jr]/(%)	21600 (24 %)	1277 (13 %)	73512 (100%)	1177 ((12%)	10376 (34%)	2760 (16%)	30000 (10%)
geleverd [GJ/jr]	54043	8848	53495	6768	23475	13335	250000
gebiedseigenschappen							
type woningen	jaar 2000-2014 energielabel A	jaar 2002-2016 EPC= 0.5-0.6	jaar 2003-2007	2011-2015 EPC=0.7	83% voor 2000; 17 % na 2000	na 2014	mix, ook utiliteit en industrie
type gebied (blok, wijk, stad)	wijk	wijk	wijk	wijk	wijk	wijk	stad
net eigenschappen							
leiding lengte m	65000	4000	26,500	3005.5	14306	15096	30000
duurzaamheid							
PER [-]	2.5	1.1	1.1	5.2	1.87	4.1	8
CO2 index	0.39	1	0.84	0.18	0.53	0.24	0.125
net verlies	35%	10%	27%	33%	35%	22%	onbekend
warmteintensiteit							
lineaire warmtedichtheid [MWh/(a m)]	0.23	0.61	0.56	0.63	0.46	0.49	2.30
lineaire warmtedichtheid [GJ/(a m)]	0.83	2.21	2.02	2.25	1.64	1.77	8.30
curve fit net verlies %	35	22	23	21	25	24	11