

Grootschalige aquathermie: realistische warmteoptie?

Casus Nijmegen

11205153-001-BGS-0001

door

Ronald Roosjen, Rutger van der Brugge, Anton de Fockert
Bonne van der Veen (review)

16 juli 2021

Inhoudsopgave

Samenvatting	4
1 Introductie	6
1.1 Een verkenning naar grootschalig gebruik van aquathermie	6
1.2 Onderzoeksvragen	6
1.3 Nijmegen als casus	7
1.4 Aanpak en leeswijzer	8
2 Introductie TEO systemen	9
2.1 Thermische energie uit oppervlaktewater	9
2.2 Ontwerpkeuzes	10
3 Gebiedsafbakening, warmtevraag & aanbod	12
3.1 Gebiedsafbakening	12
3.2 Warmtevraag	13
3.3 Warmteaanbod	14
3.4 Koppeling warmtevraag en warmteaanbod	16
4 Varianten TEO voor Nijmegen	17
4.1 Varianten Nijmegen	17
5 Uitwerking systeemcomponenten	20
5.1 Het TEO systeem (warmtewisselaars)	20
5.2 De warmteopslag	21
5.3 De warmtepompen	25
5.4 Het warmtenet	30
6 Vergelijking van de drie varianten	34
6.1 Energieprestatie	34
6.2 CO ₂ -reductie	36
6.3 Kostenschatting	37
6.4 Ruimte, ondergrond en water	38
7 Discussie	40
8 Conclusies en aanbevelingen	42
8.1 Conclusies	42
8.2 Aanbevelingen voor toekomstige werkzaamheden	43

Bijlagen

Bijlage 1 Warmtevraag	46
Bijlage 2 WKO opslagcapaciteit	53
Bijlage 3 Tracélengte voor de wijken	55
Bijlage 4 Beschikbare warmteleidingdiameters	56
Bijlage 5 Leidingdiameters tot wijkclusters	57
Bijlage 6 Warmteverliezen in wijkclusters	58

Samenvatting

Collectieve warmtesystemen zullen een groter deel van de warmtevoorziening moeten gaan verzorgen als Nederland van het aardgas af gaat. Gemeenten zijn inmiddels plannen aan het maken voor deze warmtetransitie waarbij er wordt onderzocht welke wijken als eerste van het gas af kunnen en kunnen worden aangesloten op een warmtenet. Aquathermie is een van de duurzame bronnen die kan worden gebruikt om een warmtenet mee te voeden.

Door de grote potentie van aquathermie in Nederland is het zelfs mogelijk om met behulp van aquathermie hele wijken of zelfs hele steden van warmte te voorzien. Dit geldt zeker voor steden die dicht bij grote stromende wateren liggen zoals de stad Nijmegen. In deze verkenning is onderzocht of aquathermie toegepast zou kunnen worden om een groot deel van Nijmegen van warmte te voorzien. Daarbij is onderzocht wat er nodig zou zijn om dit te kunnen doen en hoe zo'n grootschalig aquathermiesysteem met een warmtenet er uit zou kunnen zien.

In deze verkenning zijn 3 varianten uitgewerkt om te verkennen wat de praktische uitdagingen zijn voor een grootschalige uitrol van aquathermie.

De hoofdconclusie van dit onderzoek is dat er in principe geen technische bezwaren zijn voor een grote uitrol van aquathermie in Nijmegen, en dat de kosten van de bron aquathermie, met de huidige subsidieinstrumenten, concurrerend zijn met die van andere duurzame warmtebronnen.

Deze conclusie is onderbouwd door te onderzoeken of er voldoende warmteaanbod beschikbaar is ten opzichte van de warmtevraag, of de technische systeemcomponenten op deze schaal mogelijk zijn, of er genoeg ruimte is en of er aanvullende risico's zijn om rekening mee te houden. Daarnaast is een inschatting gemaakt van de kosten van de verschillende aquathermiesystemen, tot aan invoeding in het warmtenet.

De wijken ten zuiden van de Waal in Nijmegen zouden volledig kunnen worden verwarmd door aquathermie uit de Waal. Op basis van de huidige energiebehoefte zou er zo'n 0.4% van het afvoerdebiet van de Waal benodigd zijn om Nijmegen te verwarmen. De capaciteit van het Maas-Waal kanaal was niet voldoende om de (vooraf bepaalde) deelgebieden te verwarmen en is daarom ook niet verder uitgewerkt. Uiteraard zou de capaciteit van dit kanaal voor kleinere deelgebieden wel voldoende zijn.

De capaciteit van de huidige technologie voldoet voor een grootschalige toepassing van aquathermie:

- De in- en uitlaatwerken zijn vergelijkbaar met inlaten ten behoeve van drinkwatervoorziening, of inlaten bij poldergemalen.
- Bij een grootschalige warmtewinning kunnen meerdere warmtewisselaars parallel worden geplaatst om de benodigde capaciteit te halen
- De totale opslagcapaciteit in de ondergrond is voldoende voor het gebruik van grootschalige warmte koude opslag
- De warmtepompen zijn relatief groot, maar in vergelijking met beschikbare industriële warmtepompen is de capaciteit haalbaar. In het geval dat alle warmte op 1 locatie wordt gewonnen, dan kunnen meerdere warmtepomp installaties worden geclusterd.

- De diameters van de leidingen in het warmtenetten zijn realistisch. In het geval van een bronnet (10-20°C), worden de leidingdiameters wat groot (tot 1 m), maar voor een middentemperatuur warmtenet (40-70°) zijn de diameters gangbaar (100-400 mm).

Voor een grootschalige toepassing van aquathermie moet goed gekeken worden naar de inpassing van de TEO installatie, de WKO-velden, de energiecentrales en naar de leidingen in het straatwerk. Uit de verkenning blijkt dat de WKO velden bij een centrale opwek relatief groot zijn. In het geval van Nijmegen kan dit zelfs oplopen tot een WKO veld van 2.5x2.5km. De warmtepompen, de warmtewisselaars en de inlaatconstructies zijn ingrijpend, maar kunnen worden ingepast in het huidige stadsbeeld, kijkend naar vergelijkbare situaties in andere steden.

Door de grootschalige toepassing van aquathermie zou de CO2 uitstoot worden gehalveerd. Indien de elektriciteitsmix verduurzaamt en de elektriciteitsproductie in 2050 volledig door duurzame bronnen wordt gegenereerd, dan zal de CO2 uitstoot naar 0 terug worden gebracht.

Bij een grootschalige uitrol van aquathermie voor een stad als Nijmegen kan het interessant zijn aquathermie toe te passen zonder warmte koude opslag. Dit verlaagt de efficiëntie van het aquathermiesysteem, maar dit verlies aan efficiëntie weegt wel op tegen de kosten van aanleg en het onderhoud van de grote WKO velden.

De bandbreedte van de kosten van verschillende configuraties van de aquathermiesystemen ligt tussen de 8 en 16 Euro per geleverde GJ aan het warmtenet. Dit is zonder subsidie. De huidige SDE++ regeling kent een maximale subsidie van 11 Euro per geleverde GJ. Opgemerkt dient te worden dat een aquathermie variant zonder WKO niet onder de huidige subsidieregeling valt.

1 Introductie

1.1 Een verkenning naar grootschalig gebruik van aquathermie

Nederland gaat van het aardgas af. In het klimaatakkoord staat het doel om vóór 2030 anderhalf miljoen huizen in Nederland aardgasvrij te maken. Collectieve warmtesystemen moeten voor de warmtevoorziening gaan zorgen: Het doel is om meer dan de helft van deze 1,5 miljoen woningen aan te sluiten op een warmtenet. Gemeenten zijn reeds plannen aan het maken waarbij ze zelf bepalen met wijk als eerste moeten worden aangesloten op deze warmtenetten.

Aquathermie is een van de duurzame bronnen die kan worden gebruikt om een warmtenet mee te voeden. Bij aquathermie wordt thermische energie (warmte) uit water gewonnen. Er worden drie vormen van aquathermie onderscheiden: thermische energie uit oppervlaktewater (TEO), thermische energie uit afvalwater (TEA), en thermische energie uit drinkwater (TED). Door de grote potentie, kan aquathermie een substantiële bijdrage leveren aan het verduurzamen van de warmte- en koudevraag in de gebouwde omgeving. Ook in de warmtevisie van Nijmegen wordt aquathermie als duurzame bron aangemerkt om het warmtenet mee te verwarmen.

Aquathermie is als toepassing niet nieuw. Het is inmiddels meer dan 100 keer toegepast in de praktijk in Nederland. Tot op heden zijn dit allemaal relatief kleine projecten, variërend van tientallen woningen tot projecten van ca. 2000 woningen. Binnen WarmingUP werkpakket 3C is een overzicht gemaakt van bestaande aquathermiesystemen (WarmingUP, 2021), wat een representatief beeld geeft van de stand van de aquathermieteknik.

Wat wel nieuw is, is het besef dat er genoeg warmte in het oppervlaktewatersysteem aanwezig is om grote delen van de gebouwde omgeving in Nederland van warmte te voorzien. Dit geldt zeker voor plaatsen die aan grote stromende rivieren liggen, zoals Nijmegen. De Waal bevat zelfs meer dan genoeg warmte om de hele stad mee te verwarmen. Maar als Nijmegen dit zou doen, hoe ziet dat er dan uit? Over hoeveel warmte gaat het dan? Wat zouden logische plekken zijn om de warmte te onttrekken, hoe groot moeten die warmtewisselaars zijn, hoe dik moeten de leidingen van het warmtenet dan zijn, waar slaan we de warmte op en waar moeten we bijvoorbeeld de warmtepompen plaatsen? Kortom, hoe zou grootschalige toepassing van aquathermie eruit kunnen zien? Lopen we dan tegen onoverkomelijke barrières aan of is het een realistisch optie? De uitwerking hiervan voor Nijmegen kan ook als voorbeeld dienen voor andere steden aan grote wateren.

1.2 Onderzoeksvragen

Om te onderzoeken hoe aquathermie er op grote schaal uit zou zien, zijn in deze verkennende studie de volgende vijf onderzoeksvragen gedefinieerd:

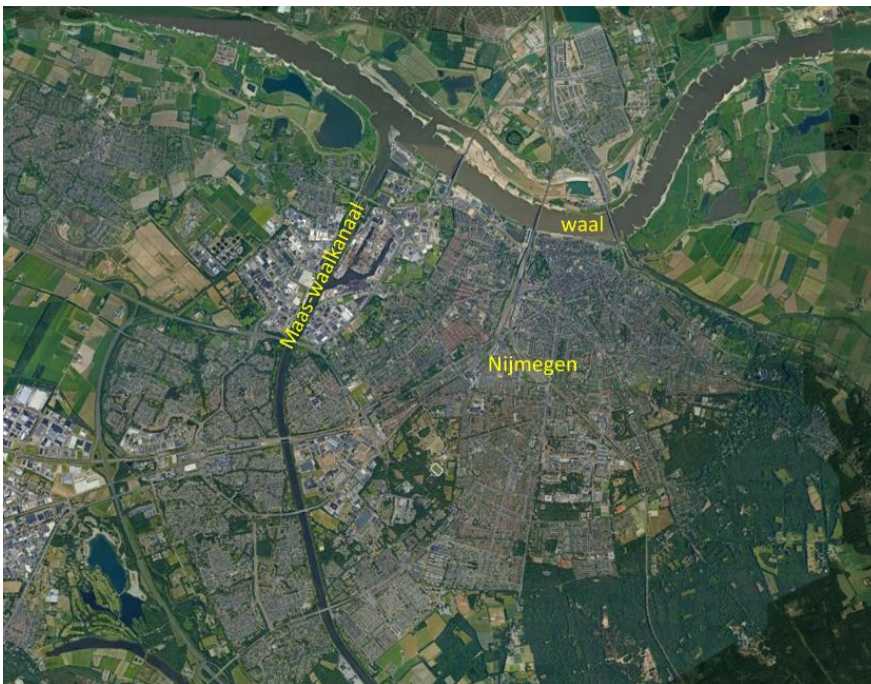
1. *Kan er genoeg warmte uit het oppervlakte water worden gewonnen om in de gehele warmtevraag van Nijmegen te voorzien?*
2. *Kan aquathermie op deze schaal met bestaande technologie worden uitgevoerd?*
3. *Hoe groot is het ruimtebeslag van toepassing van aquathermie met WKO op deze schaal?*

4. Welke CO₂-reductie kan worden gerealiseerd door toepassing van aquathermie op grote schaal?
5. Wat zijn mogelijke risico's om rekening mee te houden?

Deze onderzoeksvragen zijn in het vervolg van het rapport verder uitgewerkt.

1.3 Nijmegen als casus

Binnen het onderzoeksprogramma WarmingUP, waar de gemeente Nijmegen als deelnemer in participeert, worden de kansen en risico's van grootschalige toepassing van aquathermie als duurzame warmtebron onderzocht. De gemeente Nijmegen en Deltares werken in dit programma samen om een beeld krijgen van hoe grootschalige toepassing van aquathermie er voor Nijmegen uit zou kunnen zien. Nijmegen is een van de pilots die binnen het onderzoeksprogramma hiervoor zijn opgestart. De pilots worden gebruikt om dit type vraagstukken te onderzoeken. Landelijk gezien geniet dit onderzoek naar grootschalige toepassing interesse, omdat dit bij meer gemeenten speelt. De focus in de pilot Nijmegen ligt op het winnen van thermische energie uit oppervlaktewater (TEO), aangezien de stad warmte kan winnen uit de Waal en het Maas-Waal kanaal (Figuur 1). TEA en TED worden daarom verder buiten beschouwing gelaten in deze verkenning. Daarnaast wordt koeling door middel van aquathermie ook niet verder beschouwd binnen deze pilot.



Figuur 1: Stad Nijmegen (Google Earth). De Waal en het Maas-Waalkanaal zijn de 2 bronnen waar TEO uit zou kunnen worden gewonnen.

Het doel van deze pilot is om te onderzoeken hoe aquathermie er uit zou komen te zien als het grootschalig (voor de hele stad) zou worden toegepast.

De Waal als warmtebron is dermate groot, dat de bron zelf niet de beperkende factor is. Daarmee is deze casus anders dan casussen waarbij de bron wel de limiterende factor is. Bij dit soort casussen spelen andere vraagstukken zoals uitputting en een eerlijke verdeling. Het beeld dat deze studie oplevert is input voor de bredere afweging over bronnen en warmtesystemen in de stad Nijmegen.

In het voorliggende onderzoek is geen rekening gehouden met mogelijke andere bronnen of combinaties van warmtebronnen. De afweging tussen aquathermie als bron of het gebruik van een andere warmtebron valt buiten de scope van dit onderzoek. Deze vervolgvraag is onderdeel is van de bronnenstrategie en Transitievisie Warmte.

1.4 Aanpak en leeswijzer

In deze studie zijn vier stappen doorlopen:

1. Bepalen TEO-potentie van oppervlaktewateren rondom Nijmegen;
2. Ontwerpkeuzes opstellen van drie grootschalige TEO-varianten;
3. Uitwerking van de systeemcomponenten;
4. Evaluatie van de varianten.

Allereerst is er in hoofdstuk 2 een introductie gegeven van TEO systemen. Hoe deze systemen zijn opgebouwd en hoe de warmte uit het water gebruikt kan worden om een warmtenet mee te voeden.

Daarna wordt er in hoofdstuk 3 bepaald hoeveel thermische energie er theoretisch uit de Waal en het Maas-Waal kanaal gehaald kunnen worden. Op basis van debietgegevens over een periode van 30 jaar (1980-2010) zijn temperatuur-onttrekkingsberekeningen uitgevoerd met behulp van het Deltares rekeninstrumentarium (Deltares, 2021). Dit levert een gemiddelde jaarlijkse hoeveelheid energie, of warmteaanbod op, die vervolgens vergeleken is met de jaarlijkse warmtevraag. Daarnaast is de benodigde opslagcapaciteit in de bodem bepaald in verband met seizoensopslag en is een inschatting gemaakt van welke buurten geschikt zijn voor een warmtenet.

In de tweede stap zijn vervolgens drie varianten opgesteld (hoofdstuk 4). Deze varianten verschillen van elkaar op een aantal kernkeuzes. Variant 1 is een centraliseerde variant, waarbij de opslag en de warmtepomp bij de bron staan, gekoppeld aan een midden temperatuur warmtenet (70-40°C). Variant 2 is de decentrale variant, waar opslag en warmtepompen per wijk afzonderlijk is geregeld. Er ligt een grootschalig bronnet van lage 10-15°C en de warmte wordt pas in de wijk naar een temperatuur van 70°C gebracht. Variant 3 is een centrale, midden temperatuurvariant zonder opslag. De piekvoorziening in de winter wordt geleverd door een andere bron.

In stap 3 zijn per variant uitwerkingen gemaakt per systeemcomponent (Hoofdstuk 5). Er zijn inschattingen gemaakt van de benodigde capaciteiten van de warmtewisselaars, het warmtenet (debieten, diameters en pompcapaciteit en verliezen), de WKO-doubletten en de warmtepompen. De technische uitwerkingen zijn ook vertaald naar ruimtelijke beelden. Er zijn ruimtelijke schetsen gemaakt met betrekking tot het tracé en de (hoofd)structuur van het warmtenet, locaties en ruimtebeslag van de warmtewisselaars bepaald, er is naar potentiële locaties en ruimtebeslag van de warmtepompen gekeken en naar de locaties van de WKO-doubletten.

In de laatste stap heeft een evaluatie plaatsgevonden van de drie varianten (Hoofdstuk 6). De varianten zijn met elkaar vergeleken met betrekking tot de energieprestaties, CO₂-reductie en een eerste, globale kostenschatting. Een uitgebreid kostenplaatje kan in een verdiepende slag verder uitgewerkt worden, met eventueel aangepaste varianten.

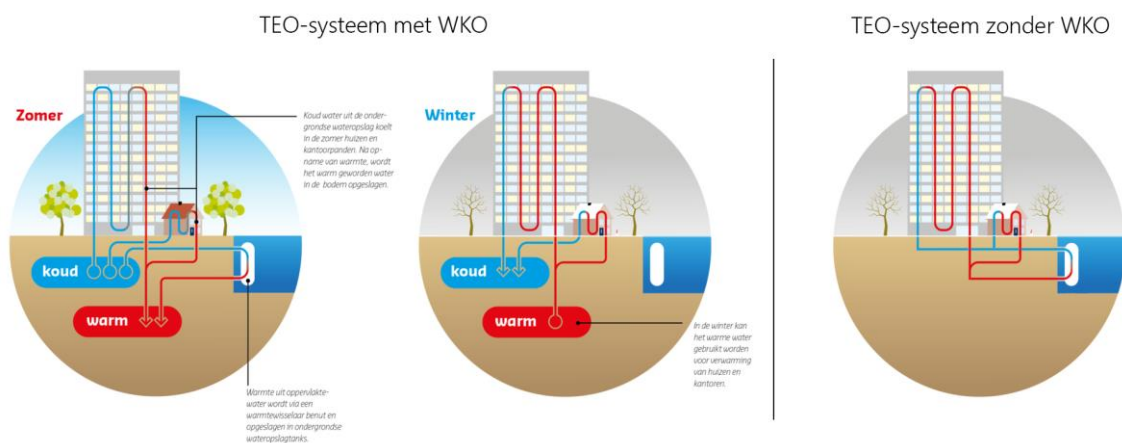
Uit de hiervoor doorlopen stappen volgen conclusies over de haalbaarheid, randvoorwaarden en wenselijkheid. De belangrijkste componenten en consequenties daarvan worden besproken.

2 Introductie TEO systemen

2.1 Thermische energie uit oppervlaktewater

De thermische energie die in het oppervlaktewater (TEO) aanwezig is, kan gewonnen worden en als warmtebron dienen voor gebouwen. De warmte uit het oppervlaktewater wordt via warmtewisselaars uit het water gehaald en al dan niet opgeslagen. Met behulp van warmtepompen wordt de temperatuur vervolgens verhoogt naar de vereiste temperatuur voor ofwel de woning of een warmtenet. Indien de geleverde warmte niet voldoende is, dan kan er een piekvoorziening (denk aan gasketels) worden toegepast, die extra capaciteit zou kunnen leveren indien dit nodig is.

De meeste geïsoleerde woningen kunnen goed verwarmd worden met een temperatuur van 70 °C. Er zijn studies die erop wijzen dat 55 °C genoeg zou zijn (Ostergard and Svendsen 2017, Ostergard and Svendsen 2018a en Ostergard and Svendsen 2018b), maar dit wordt nog niet vaak toegepast. Vanwege het risico op legionella in het tapwater zal de uiteindelijke temperatuur boven de 60°C moeten zijn, tenzij zuiveringstechnieken in het warmtenet worden ingebouwd. In deze studie is 70°C gehanteerd als temperatuur van het warmtenet.



Figuur 2: Schematische weergave van de werking van een TEO-systeem met én zonder WKO

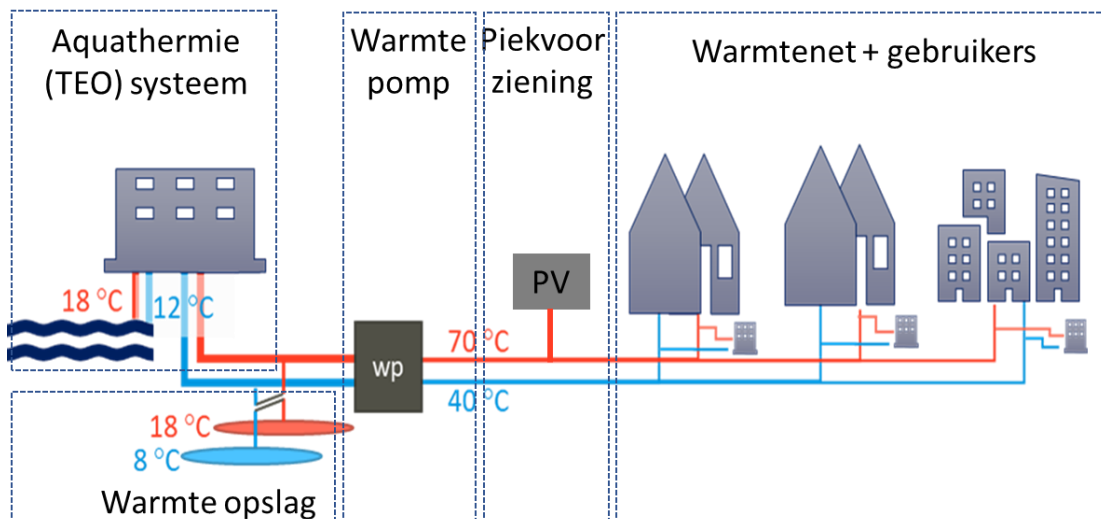
TEO kan zonder of in combinatie met een warmte-koude opslag (WKO) systeem worden toegepast (zie Figuur 2). Energetisch gezien is het voordelig om de warmte in de zomer te winnen en op te slaan in het grondwater (de WKO bron) voor gebruik in de winter. Dit proces wordt in het linker gedeelte van Figuur 2 weergegeven. Bij grote goed doorstromende waterlichamen (denk aan de grote rivieren) is het echter ook mogelijk om het hele jaar warmte uit het water te winnen. Indien het oppervlaktewater niet te ver wordt afgekoeld door de warmtewinning, kan een aquathermiesysteem zonder WKO worden toegepast. Het nadeel hiervan is dat het rendement (COP) van de warmtepomp daalt naarmate watertemperatuur lager wordt. Tegenover het lagere energetische rendement, staat het voordeel van lagere investeringskosten, de WKO hoeft immers niet aangelegd te worden.

2.2 Ontwerpkeuzes

Om de warmte van aquathermie bruikbaar toe te passen, moeten een aantal componenten samen worden toegepast. Hieronder de 5 belangrijkste componenten (Figuur 3). Deze staan in volgorde van voorkomen in het geval van een systeem met een centrale warmteopwekking:

1. Het aquathermiesysteem. In het TEO systeem wordt warmte uit het oppervlaktewater gewonnen met behulp van een warmtewisselaar.
2. de warmteopslag (bijvoorbeeld WKO) wordt gebruikt om warmte die in de zomer wordt gewonnen op te slaan voor gebruik in het winterseizoen.
3. een warmtepomp waarmee de warmte uit de bron of opslag op de gewenste temperatuur van het warmtenet of het gebouw wordt gebracht
4. een piekvoorziening voor de sporadische echt koude dagen. Dit element wordt verder buiten beschouwing gelaten in deze studie.
5. de warmtetransportleidingen (warmtenet), waarmee de warmte naar de gebruikers wordt gebracht.

Bij een decentrale warmteopwekking worden de componenten 2, 3 en 4 na het warmtenet (component 5) geplaatst. Dan wordt er uitgegaan van een bronnet en een lokale warmteopwekking bij de warmtevragers.



Figuur 3: Locatie componenten aquathermiesysteem ten behoeve van warmte levering

Ontwerpkeuzes ten aanzien van deze vijf componenten bepalen uiteindelijk wat het best passende TEO-systeem in een bepaalde situatie is. Met betrekking tot de warmtewisselaars zijn ontwerpkeuzes bijvoorbeeld de locatie en de capaciteit van de warmtewisselaars. De benodigde capaciteit wordt bepaald door ontwerpkeuzes over het aantal aansluitingen en het gevoerde temperatuur regime (zie tekst box). Daarnaast kan gekozen worden voor een centraal of decentraal ontwerp. In het centraliseerde ontwerp wordt de warmte op één locatie via industriële warmtepompen opgehoogd en via een hoge temperatuur warmtenet getransporteerd. In een gedecentraliseerde variant is sprake van een bronnet waarbij decentraal op woningblok-niveau warmtepompen worden geplaatst. Dit heeft ook invloed op de plaatsing van eventuele warmte-koude opslag. In de gecentraliseerde variant past ook een centraal WKO-veld, waar in de gedecentraliseerde variant een aantal kleinere WKO-velden over de stad worden verspreid.

Temperatuurregime

Bij warmtenetten wordt er onderscheid gemaakt in vier warmteniveaus, warmteregimes geheten.

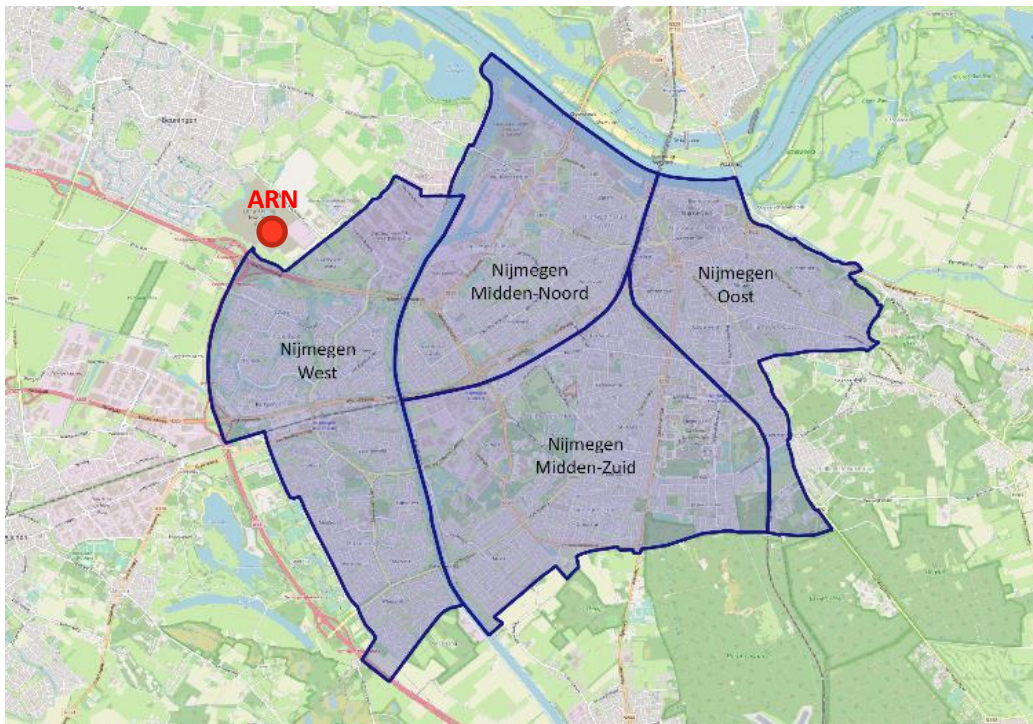
- Een bronnet heeft een aanvoertemperatuur van maximaal 15°C.
- Een lage temperatuur warmtenet heeft een aanvoertemperatuur van 15-40°C.
- Bij een aanvoertemperatuur van 40-70°C wordt gesproken van een midden-temperatuur warmtenet.
- Tenslotte heeft een hoge temperatuur een aanvoertemperatuur van 70-90°C.

3 Gebiedsafbakening, warmtevraag & aanbod

In dit hoofdstuk wordt nader ingegaan op de gebiedsafbakening voor de stad Nijmegen. Op basis daarvan is de totale warmtevraag bepaald, wat als basis geldt voor de uitwerking van het varianten en componenten (Hoofdstuk 5). Vervolgens is een analyse uitgevoerd van het beschikbare warmteaanbod in de Waal en het Maas-Waalkanaal en is er bepaald in welke mate dit warmteaanbod zou kunnen voorzien in de warmtevraag van Nijmegen.

3.1 Gebiedsafbakening

In deze verkenning is een hypothetisch scenario doorgerekend waarin een groot deel van Nijmegen aangesloten wordt op met aquathermie gevoede warmtenetten. Hierbij is geen rekening gehouden met eventuele andere beschikbare warmtebronnen, zoals warmte van de afval-energiecentrale ARN. Het warmtenet van Nijmegen-Noord (ten noorden van de Waal) wordt reeds gevoed door warmte van de afval-energiecentrale ARN. Dit deel van Nijmegen wordt daarom niet meegenomen en voor deze studie zijn alleen de wijken ten zuiden van Waal meegenomen. Dit gedeelte van de stad is onderverdeeld in vier (willekeurige) stadsdelen. De stadsdelen vormen hypothetische aquathermie-warmtekavels hebben een waterinnamepunt nabij de Waal of het Maas-Waalkanaal. Elke kavel heeft eigen warmtesysteem en een eigen hoeveelheid warmte nodig die wordt onttrokken uit het water. De indeling is van de stadsdelen is te zien in Figuur 4: Nijmegen Midden-Noord, Nijmegen Oost, Nijmegen Midden-Zuid, en Nijmegen West. In deze vier stadsdelen bevinden zich in totaal 35 wijken.

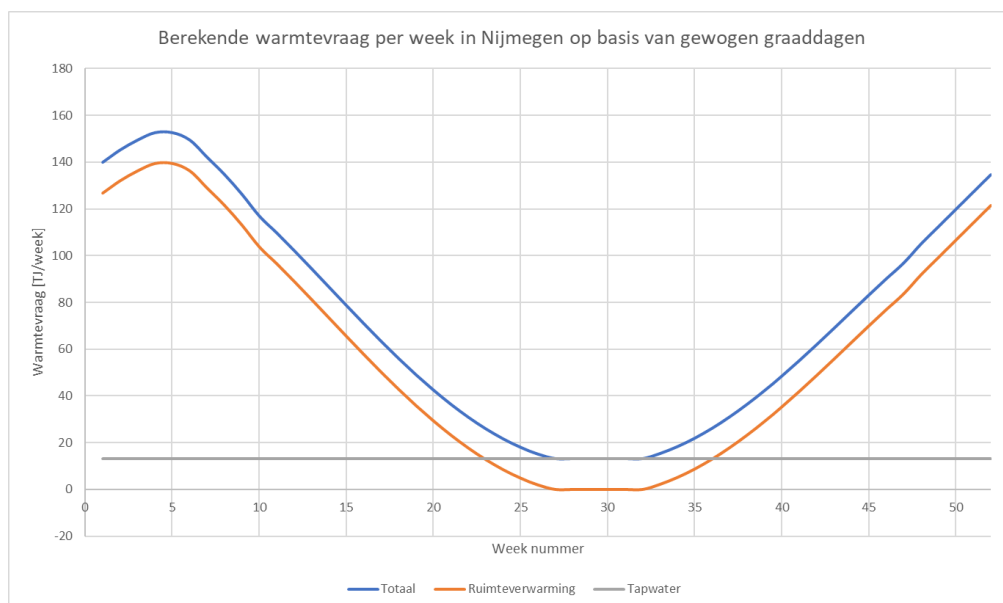


Figuur 4: Onderverdeling Nijmegen in vier stadsdelen

3.2 Warmtevraag

Per stadsdeel is een inschatting gemaakt van de jaarlijkse warmtevraag. Hiervoor is data gebruikt van de jaarlijkse aardgasvraag van woningen die op postcode 5¹ niveau beschikbaar wordt gesteld door Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS). De warmtevraag van utiliteit en industrie is hierin niet meegenomen. In Bijlage 1 is de jaarlijkse warmtevraag per wijk weergegeven. De totale jaarlijkse warmtevraag van de vier kavels bedraagt 1,01 TWh (3,8 miljoen GJ). In totaal betreft het de warmtevoorziening voor ongeveer 70 duizend woningen.

De jaarlijkse warmtevraag is vervolgens uitgesplitst naar de warmtevraag per week, waarbij een uitsplitsing is gemaakt naar warmte voor ruimteverwarming en de warmtevraag voor tapwater. In Figuur 5 is te zien wat het aandeel ruimteverwarming en tapwater is gedurende het jaar. Bij de ruimteverwarming is rekening gehouden met het aantal graaddagen² gebaseerd op de temperatuur in de jaren 2017-2019 gemeten bij weerstation Volkel (zie ook Bijlage 1.3). Hierbij is te zien dat er in de zomer geen ruimteverwarming nodig is voor de wijken in Nijmegen en dat de totale warmtevraag dan bestaat uit warmte voor tapwater.



Figuur 5: Wekelijkse warmtevraag gedurende het jaar op basis van gemiddelde gewogen graaddagen in de periode 2017-2019

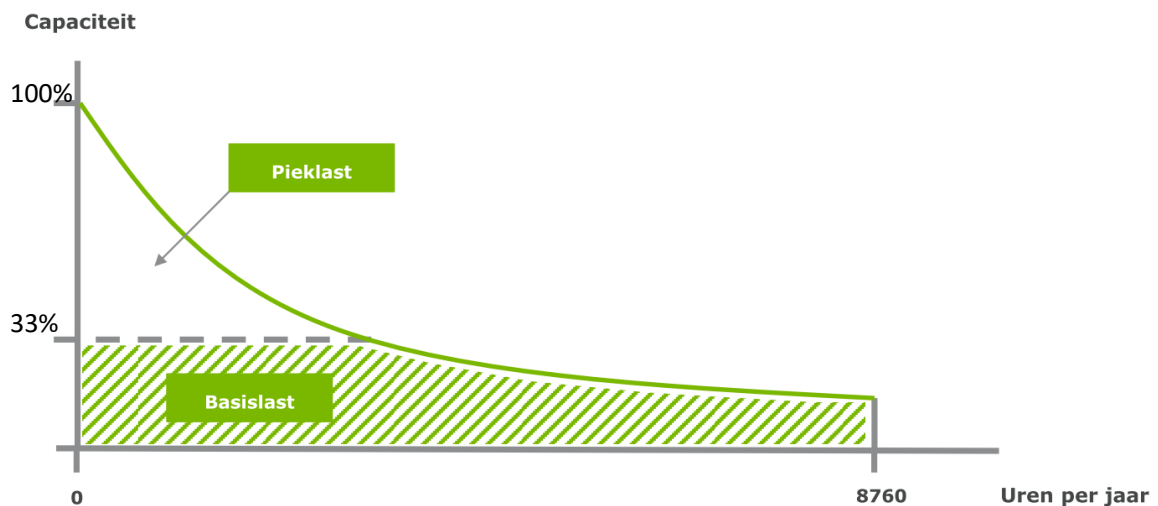
Om het warmtenet te kunnen dimensioneren moet de pieklast voor het net worden bepaald. De basislast kan door het aquathermiesysteem worden gegenereerd en de pieklast (in geval van zeer koude dagen) kan door een alternatieve warmtebron worden gegenereerd. In de berekening voor Nijmegen is de pieklast bepaald op basis van een ontwerptemperatuur van -7°C (zie bijlage 1.4). Op basis van deze ontwerptemperatuur is een vermogen van het net van 5 kW per woning afgeleid. Hierbij is rekening gehouden met de warmtevraag en de kans dat er gelijktijdig warmte wordt onttrokken.

De basislast en de pieklast worden vaak weergegeven in een jaarbelastingduurkromme, waarin het aandeel van de basislast en de pieklast te zien is ten opzichte van het aantal uren waarin het nodig

¹ Dit zijn gebieden waarvan de eerste 5 posities van de postcode gelijk zijn.

² Graaddagen is een rekeneenheid die relatief is ten opzichte van een referentie temperatuur (18°C). Bij een daggemiddelde temperatuur van 10 °C spreekt men van 8-graaddagen. Als de buitentemperatuur hoger is dan 18 °C telt dat als nul graaddagen.

is. In het geval van Nijmegen blijkt dat de piekvraag het warmtenet in de praktijk niet meer dan een aantal uren per jaar voor zal komen. De basislast wat door aquathermie gevoed zal gaan worden is ontworpen op 33 % van de pieklast (zie Figuur 6). Hierdoor zal ongeveer 80-90% van de warmtevraag voorzien worden door aquathermie, hetgeen in lijn is met de scenario's zoals onderzocht door Papa et al. (2019). De kortstondige piekvraag wordt geleverd door alternatieve piekvoorzieningen (gasketels, E-ketels, afvalverbrander, etc.). Het vaststellen of uitwerken van de piekvoorziening is niet meegenomen in deze studie.



Figuur 6: Schematische weergave van de Jaarbelastingduurkromme waarbij de basislast door aquathermie wordt geleverd (van Vliet, 2016)

3.3 Warmteaanbod

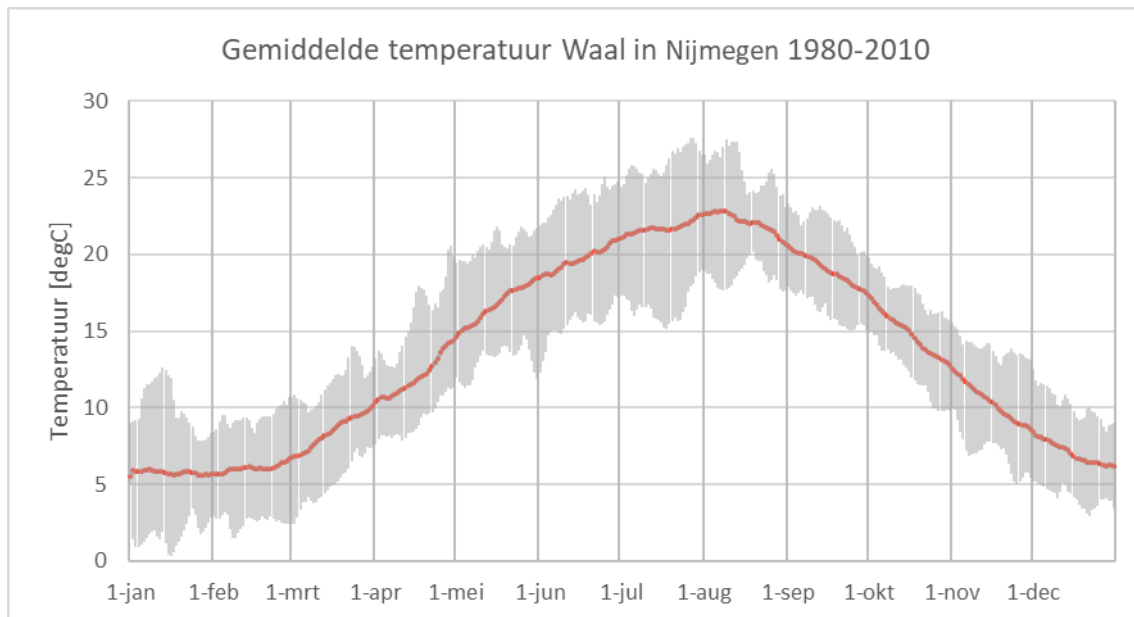
Voor deze studie is uitgegaan van de grote wateren rondom Nijmegen: de Waal en het Maas-Waal kanaal. De overige wateren in Nijmegen kunnen lokaal een bijdrage leveren aan de warmtevraag, maar dat is relatief klein ten opzichte van de grote wateren.

Het warmteaanbod is bepaald op basis van een eerdere studie van Deltares, waarin de potentie van de meeste wateren in Nederland is bepaald bij een bepaald warmtewinnings regime. Dit winningsregime houdt in dat er warmte onttrokken mag worden als de watertemperatuur boven de 15°C is. Daarbij mag de watertemperatuur afkoelen tot minimaal 12°C worden afgekoeld en mag de warmteonttrekking (bij hogere watertemperaturen) maximaal leiden tot een daling van 6°C van de watertemperatuur. Deze resultaten van deze potentieberekeningen daarvan zijn beschikbaar via landelijke potentiekaart aquathermie (Deltares, 2021).

Voor het Maas-Waal kanaal ter hoogte van Nijmegen bedraagt de minimale potentie zo'n 95.000 Gigajoule per jaar (Deltares, 2021). Uit de Waal zou ter hoogte van Nijmegen ca. 76 miljoen Gigajoule per jaar gewonnen kunnen worden. Het grote verschil hiertussen komt door het verschil in debiet. De Waal heeft ter hoogte van Nijmegen een gemiddeld debiet van 1650 m³/s, terwijl het Maas-Waal kanaal een gemiddeld debiet heeft van slechts 2 m³/s (bron: nationaal watermodel).

De hoeveelheid warmte die uit het oppervlaktewater gewonnen kan worden is enerzijds afhankelijk van de temperatuur van het water zelf en anderzijds van beleidsregels omtrent de maximale

warmteonttrekkingen. Figuur 7 laat zien wat het gemiddelde jaarlijkse temperatuurverloop van de afgelopen 30 jaar was, gemeten tussen de spoorbrug Nijmegen en de Waalbrug Nijmegen in de jaren 1980 t/m 2010.



Figuur 7: Gemiddeld jaarlijkse temperatuurverloop in de Waal zoals gemeten tussen de spoorbrug Nijmegen en de Waalbrug Nijmegen in de jaren 1980 t/m 2010 (Deltares, 2020)

Voor de berekeningen is het temperatuurverloop vereenvoudigd tot drie periodes zoals gepresenteerd (zie Tabel 3.1).

Tabel 3.1: Aangenomen watertemperatuur voor het aquathermie-systeem

Periode	Seizoen	Inlaat temperatuur
1 mei – 15 okt	Zomer	18 °C
15 okt – 15 dec; 1 maart -15 mei	Herfst en Lente	10 °C
15 dec – 1 maart	Winter	6 °C

Met betrekking tot het warmtewinningsregime in geval van een configuratie met WKO, is uitgegaan dat de warmte onttrokken wordt als de watertemperatuur boven de 18°C komt. De temperatuur van het water mag maximaal 6°C afgekoeld worden en niet onder de 12 °C dalen. In deze situatie kan de aquathermiebron slechts een deel van het jaar warmte leveren, aangezien de temperatuur voor een groot deel van het jaar onder deze 18°C is. In dit geval kan de aquathermiebron worden gebruikt om de WKO te voeden. Hierbij wordt de warmte uit de aquathermiebron in de zomer gebruikt om de WKO bron te vullen, zodat de warmte in de koudere periodes uit de WKO bron gewonnen kan worden.

In de winter is het zelfs mogelijk dat de temperatuur van de Waal op sommige momenten onder de 4°C komt. Bij deze temperatuur is het niet meer mogelijk om warmte te onttrekken en moet de warmte door alternatieve bronnen (WKO of piekvoorziening) geleverd worden. Dit zal gemiddeld enkele dagen tot enkele weken per jaar het geval zijn.

3.4 Koppeling warmtevraag en warmteaanbod

Wanneer de basislast van de warmtevraag wordt vergeleken met het warmteaanbod is te zien dat er voldoende warmte gewonnen kan worden om in de gehele warmtevraag van de vier kavels te voorzien.

De Waal met een warmteaanbod van minimaal 76 miljoen GJ/jaar kan met gemak in de warmtevraag van de aangrenzende stadsdelen (3.8 miljoen GJ/jaar) voorzien. Dit geldt echter niet voor het Maas-Waal kanaal. Met een minimum capaciteit van 95.000 GJ/jaar is het aanbod bij dit winningsregime niet genoeg om de twee aangrenzende stadsdelen in de gehele warmtevraag te voorzien. De warmtevraag is groter dan het warmteaanbod in het kanaal, daarom wordt in de verkenning gekozen om alle stadsdelen ten zuiden van de Waal te voeden vanuit de Waal.

4 Varianten TEO voor Nijmegen

Dit hoofdstuk beschrijft een aantal varianten voor TEO systemen die kunnen worden toegepast om de 4 wijken ten zuiden van de Waal van warmte te voorzien. De varianten die zijn doorgerekend zijn gekozen zodat ze een breed spectrum afdekken van mogelijke opties voor aquathermie.

4.1 Varianten Nijmegen

Aan de hand van de ontwerpkeuzen die beschikbaar zijn voor aquathermie, zoals beschreven in paragraaf 2.2 zijn voor deze studie de volgende drie varianten verkend:

- Variant 1 (**centraal**) bestaat uit een TEO-systeem, gekoppeld aan een middentemperatuur warmtenet (40-70°C) via een centrale warmtepomp en een centrale WKO.
- Variant 2 (**decentraal**) bestaat uit een TEO-systeem, gekoppeld aan een lage temperatuur bronnet (15-10°C), via decentrale warmtepompen en WKO's in de buurt.
- Variant 3 (**centraal zonder opslag**) bestaat uit een TEO systeem, gekoppeld aan een midden temperatuur warmtenet (40-70°C) via een centrale warmtepomp, maar dan zonder WKO. In de winter wordt rechtstreeks warmte gewonnen uit het oppervlaktewater en opgewaardeerd naar 70°C.

Het uitwerken van de drie varianten laat de consequenties zien van de ontwerpkeuzen. De verkenning biedt daarmee inzicht in de overwegingen ten aanzien van de technische, ruimtelijke en kostenoverwegingen.

In deze verkenning is een hogere aanvoertemperatuur dan 70°C niet meegenomen. In de praktijk is de trend eerder om naar lagere temperatuurregimes toe te gaan. De decentrale variant is uitgewerkt tot het schaalniveau van woningcluster. Elk cluster heeft een eigen collectieve warmtepomp. In de praktijk is het mogelijk om nog verder te decentraliseren naar individuele woningen. De inschatting is echter dat duurder is en daarom is deze optie niet meegenomen in de analyse.

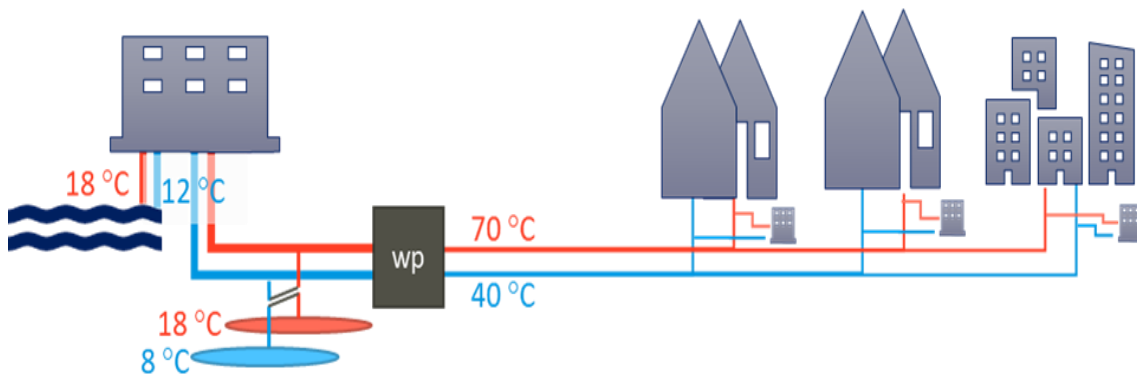
4.1.1 Variant 1 (centraal)

Variant 1 bestaat uit een warmtenet met een warmtepomp en seizoensopslag centraal bij de bron. In de zomer wordt een deel van het 18 °C oppervlaktewater met een warmtepomp (WP) omhoog gebracht naar 70 °C. De retourtemperatuur naar het oppervlaktewater is dan 12 °C.

Daarnaast wordt het oppervlaktewater ook gebruikt om opgeslagen te worden in een seizoensopslag in de vorm van een warmte-koude opslag (WKO). Het oppervlaktewater wordt dus gebruikt om het water uit de koude bron op te warmen naar 18 °C. Tijdens de wintermaanden, als de temperatuur van het oppervlaktewater lager is, wordt de warmtevoorziening geleverd door water uit de WKO; dan is de retourstroom van de warmtepomp naar de WKO 8 °C.

Effectief betekent dit dus dat het TEO systeem slechts 4 maanden warmte kan leveren aan het net en om de warmte in de WKO op peil te brengen. Deze relatief korte periode zorgt er voor dat de capaciteit van het TEO systeem groter moet zijn dan in Variant 3 waar geen opslag beschikbaar is.

Naast het oppervlaktewater en de WKO bij de bron wordt de piekvoorziening bij de inlaat geplaatst. Deze wordt ingezet bij extreem koude dagen of weken.

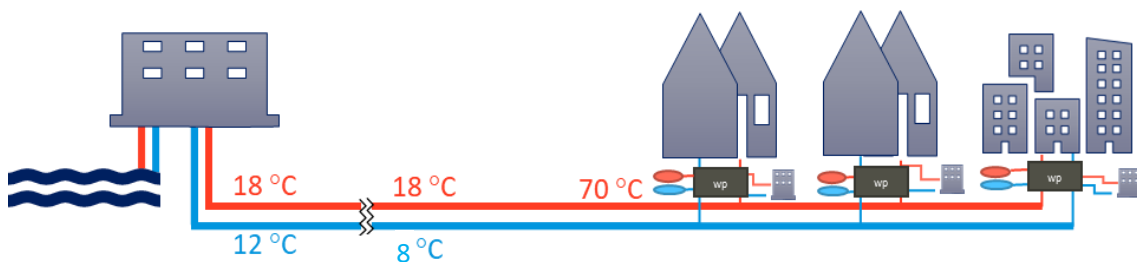


Figuur 8: Schematische weergave van Variant 1 met een centrale WKO en warmtepomp

4.1.2 Variant 2 (decentraal)

Variant 2 bestaat uit een bronnet met warmtepompen en seizoensopslag in de wijken. Het oppervlaktewater wordt gebruikt om het water in het bronnet op te warmen tot een relatief lage temperatuur van 18 °C. Het voordeel van een bronnet is dat het temperatuurverschil met de ondergrondtemperatuur klein is, en er dus weinig warmteverlies optreedt. Het nadeel is dat er grote diameterleidingen nodig zijn om de gevraagde warmtecapaciteit te leveren. De aanvoertemperatuur wordt met warmtepompen op buurtniveau verhoogd tot 70 °C, en komt retour met 8 °C.

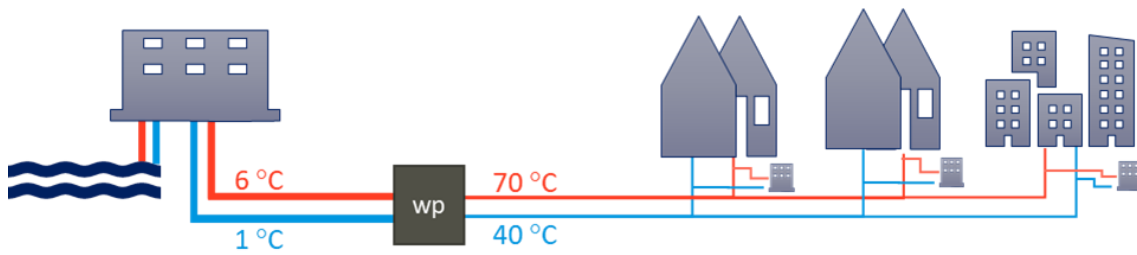
In Variant 2 wordt er gebruik gemaakt van WKO's in de wijken zelf. In de zomer wordt het water uit de koude bron opgewarmd met het water in het warmtenet. Het opgewarmde water wordt dan opgeslagen in de warme bron. In de winter wordt het water uit de warme bron gebruikt om via een warmtepomp warmte te leveren aan de afnemers. De temperaturen van de warme en koude bron zijn respectievelijk 18 °C en 8 °C. De WKO's worden gedimensioneerd op basislast (zie Figuur 6); de pieklast wordt op wijkniveau door een piekvoorziening geleverd.



Figuur 9: Schematische weergave van Variant 2, waarbij de warmtepomp en de WKO decentraal zijn geplaatst.

4.1.3 Variant 3 (centraal zonder opslag)

Variant 3 is vergelijkbaar met Variant 1, alleen heeft deze variant geen seizoensopslag. Het oppervlaktewater wordt rechtstreeks met een centraal geplaatste warmtepomp verhoogd tot de temperatuur van het warmtenet: 70 °C. Het transportnetwerk is gedimensioneerd op basislast en er bevindt zich een centrale piekvoorziening (bijvoorbeeld gasketels) voor de extreem koude dagen of weken. In deze variant wordt dus ook 's winters rechtstreeks warmte gewonnen vanuit de Waal.



Figuur 10: Schematische weergave van Variant 3 gedurende winter

Een risico bij deze variant is de minimale temperatuur die gewonnen kan worden. Bij een gemiddelde watertemperatuur van 6°C in de Waal in de winter, kan er slechts 5°C gewonnen worden in verband met het bevroren van het retourwater. Voor deze variant is dan ook 5°C gebruikt als winningstemperatuur gedurende het hele jaar. Dit is iets lager dan in Variant 1 en 2, wat resulteert in iets grotere leidingdiameters tussen het TEO systeem en de warmtepomp. In het geval van koude winters als de temperatuur van de Waal daalt tot onder de 4°C, is het niet meer rendabel om het TEO systeem te opereren. In dat geval wordt het TEO systeem buiten werking gesteld en wordt de warmte geleverd door een centrale piekvoorziening.

5 Uitwerking systeemcomponenten

In dit hoofdstuk worden de drie varianten uit Hoofdstuk 4 verder uitwerkt. Voor elk van de varianten is een schetsontwerp gemaakt met innamepunten, een mogelijk warmtenet-tracé, de locaties van de warmtepompcentrales en de WKO-velden. Vervolgens is een berekening gemaakt om een inschatting te kunnen maken van de benodigde capaciteiten en vermogens van de warmtewisselaarstations, de warmtepompcentrales, de warmtenetleidingen en de WKO-velden. Per variant is de ruimtelijke impact geschat en is een grove kostenschatting gemaakt. Dit hoofdstuk is onderverdeeld op basis van de systeemcomponenten zoals beschreven in hoofdstuk 2.

5.1 Het TEO systeem (warmtewisselaars)

5.1.1 Totale hoeveelheid thermische energie

De warmtewisselaars in het TEO systeem zorgen voor de onttrekking van de warmte uit het water. De totale hoeveelheid warmte die uit het oppervlaktewater moet worden gewonnen verschilt per variant. Dit heeft te maken met het wel of niet toepassen van warmteopslag. In Variant 1 en 2 is het TEO systeem groter, doordat de opslag in de zomermaanden moet worden geregenereerd. Dit is niet het geval voor Variant 3. In Variant 3 zal een groter aandeel van de warmte geleverd worden door de warmtepomp dan in Variant 1 en 2.

5.1.2 Benodigde capaciteit van de warmtewisselaars

Het vermogen van de warmtewisselaars is berekend op basis van de warmtevraag per kavel en het aantal draaiuren van het TEO systeem. Vervolgens zijn op basis van de maximale warmteonttrekking de benodigde debieten berekend. Tabel 5.1 geeft de benodigde debieten per stadsdeel aan voor de warmtewisselaars voor alle varianten. Doordat het TEO systeem de WKO niet hoeft te regenereren in Variant 3 zijn het vermogen en debiet voor deze variant lager.

Tabel 5.1: Benodigde capaciteit warmtewisselaars per stadsdeel voor alle varianten

Stadsdeel	Variant 1 & 2		Variant 3	
	Vermogen [MW]	Debiet [m ³ /u] bij $\Delta t=6^{\circ}\text{C}$	Vermogen [MW]	Debiet [m ³ /u] voor $\Delta t=5^{\circ}\text{C}$
Oost	53.9	7695	33	5606
Midden-Noord	40.5	5790	25	4218
Midden-Zuid	68.2	9750	41	7102
West	58.6	8373	36	6099

5.1.3 Locaties van de warmteonttrekkingen

De locaties van de warmtewisselaars zijn gepositioneerd aan de Waal. Hierbij is aangenomen dat de stadsdelen West, Midden-Noord en Midden-Zuid allemaal water kunnen onttrekken bij de bestaande inlaatconstructie van de ENGIE elektriciteitscentrale die wordt afgebroken. De inname locatie voor stadsdeel Oost kan ten oosten van de N325 worden geplaatst. Voor de lozing van het

effluent kan de bestaande uitlaat van de ENGIE centrale worden gebruikt en de Lindenberhaven zou gebruik kunnen worden voor de lozing van het effluent voor stadsdeel Oost.

De debieten van de verschillende deelgebieden liggen zo rond de 2 m³/s. Ter referentie is in Figuur 11 een inlaatconstructie van een typisch poldergemaal te zien met deze capaciteit. Door gebruik te maken van de bestaande inname en uitlaat constructie van de ENGIE centrale aan de Waal kan een deel van de constructie opnieuw gebruikt worden.



Figuur 11: Gemaal Palenstein bij Zoetermeer met een capaciteit van 2 m³/s (bron: Hoogheemraadschap van Rijnland)

5.2 De warmteopslag

In Variant 1 en 2 wordt gebruik gemaakt van warmte-koude opslag (WKO) om het warme water in zomer op te slaan zodat het in de winter gebruikt kan worden. Om een inschatting te kunnen maken van de ruimtebeslag van deze WKO's zijn de benodigde volumes en het aantal doubletten van de WKO velden berekend.

5.2.1 Benodigd volume WKO

Volgens de twee openbare datasets Warmte Atlas (RVO, 2020a) en de WKOTool (RVO, 2020b) is een flink deel van het studiegebied Nijmegen geschikt voor de toepassing van WKO systemen. In de DINO-database³ is te zien dat de ondergrond in Nijmegen voor de eerste 100m grotendeels uit grof tot fijn zand bestaat. Ook is te zien dat er een aantal water scheidende lagen aanwezig is, waardoor in de praktijk niet de volledige 100 meter watervoerende laag (aquifer) benut kan worden. Voor de berekeningen is een veilige marge van 20 meter aquifer aangehouden.

Om het benodigde WKO-volume te bepalen zijn 3 perioden gedefinieerd op basis van de watertemperatuur van de Waal (zie Figuur 7).

- Watertemperatuur boven de 18°C waar het TEO systeem warmte levert aan het warmtenet en de WKO bron voedt.
- Watertemperatuur tussen de 18°C en 15°C waarin het TEO systeem alleen het warmtenet voedt, maar de temperatuur te laag is om de WKO te voeden
- Watertemperatuur onder de 15°C, wanneer de warmte voor het warmtenet uit de WKO bron wordt gehaald.

³ Data en Informatie Nederlandse Ondergrond, Geologische Dienst Nederland, onderdeel van TNO, www.dinoloket.nl

Het benodigde WKO-volume wordt bepaald door de basislast warmtevraag in de winter. Tijdens koude dagen wordt de piekvoorziening gebruikt om extra warmte te leveren. In de varianten voor Nijmegen wordt er van uit gegaan dat de basislast (85%) door de WKO bron en de warmtepomp geleverd wordt, en dat de pieklast (15%) wordt geleverd door ketels (zie paragraaf 3.2).

Tabel 5.2 geeft een overzicht van het benodigde opslagvolumes per stadsdeel voor Variant 1. In Variant 1 bevinden de WKO's zich bij de inlaatpunten en moeten dus voldoende warmte opslaan voor het hele stadsdeel.

Tabel 5.2: Overzicht opslag capaciteit WKO Variant 1

Stadsdeel	Opslag [TJ/jaar]	Opslag [in 1000 m ³ /jaar]
Oost	449	10,693
Midden-Noord	338	8,046
Midden-Zuid	569	13,548
West	489	11,634

In Variant 2 bevinden de WKO's zich bij de wijkclusters. De opslagcapaciteit wordt dus opgesplitst over verschillende locaties in de stadsdelen. Tabel 5.3 geeft ter indicatie de minimum en maximum benodigde opslagcapaciteit bij de wijkclusters. Voor een compleet overzicht van de benodigde WKO opslagcapaciteit, zie Bijlage 2. Ter toelichting: in de bepaling van de warmtevraag zijn alleen woningen meegenomen. Warmte en koudevraag van utiliteit is niet meegenomen. Dit verklaart mede waarom Heijendaal de laagste benodigde opslagcapaciteit kent, vanwege de universiteitsgebouwen.

Tabel 5.3: Maximum en minimum opslagcapaciteit WKO Variant 2

	wijk	Opslag [TJ/jaar]	Opslag [in 1000 m ³ /jaar]
Maximum	Hatert	145	3.444
Minimum	Heijendaal	13	305
Gemiddeld		53	1255

5.2.2 Capaciteit WKO bron

De capaciteit per bron is gelimiteerd. Voor het vaststellen van het aantal bronnen wordt gekeken naar het maximum debiet van injectie of onttrekking. Dit debiet wordt bepaald door de warmtevraag in de winter te delen door de vollasturen van de installatie. Het aantal vollasturen van de installatie is gebaseerd op de zomerperiode wanneer het oppervlaktewater warmer is dan 18°C (zie Figuur 7). Dit resulteert in zo'n 2800 vollasturen.

Een literatuuranalyse van 36 WKO systemen (van totaal 105 bronnen) in Amsterdam laat zien dat de gemiddelde filters tussen de 70 en 180 m diepte worden geplaatst, met een gemiddelde lengte van 64.8 meter (Sommer, 2015). WKO systemen met lange filters zijn dus mogelijk, maar de ondergrond van Nijmegen leent zich hier niet goed voor. Voor deze studie is daarom een filterlengte van 20 m aangenomen en een diameter van 0.8 m op basis van vergelijkbare bronnen in Nijmegen, met een filtersnelheid van 30m/dag resulteert dit in een capaciteit per bron van 1508 m³/dag.

5.2.3 Energieverlies

Geïnjecteerd grondwater in de WKO kan door middel van conductie thermische energie uitwisselen met omringende grond en grondwater. Dit resulteert in de verspreiding van het thermische front. Water dat in de bron wordt geïnjecteerd heeft een andere temperatuur dan de natuurlijke grondwatertemperatuur, hierdoor zal het thermische front zich continue verplaatsen. Het contact van het thermische front met het omringende grondwater is het oppervlak waarover warmteverlies plaats zal vinden.

In deze studie is uitgegaan van een evenwichtssituatie, waarin het warmteverlies aan de omgeving beperkt zal zijn. In het geval van grote clusters van doubletten zal het verlies van warmte in de bron beperkt blijven.

5.2.4 Aantal WKO bronnen

Op basis van de capaciteit per bron kan het totaal aan benodigde bronnen per variant bepaald worden voor het benodigde injectie en onttrekkingsdebiet. In Tabel 5.4 is een overzicht gegeven van het debiet van de injectie, het aantal benodigde doubletten en het volume per doublet. Doordat de injectie in het doublet in een veel kortere periode gebeurt (± 4 maanden) dan de onttrekking is het injectie debiet maatgevend voor de WKO. In Variant 1 bevinden de WKO-bronnen zich bij de inname locaties.

Tabel 5.4: Capaciteit en aantal bronnen per stadsdeel Variant 1

Stadsdeel	Debiet injectie [in 1000 m ³ /dag]	Aantal doubletten [#]	Volume per doublet [in 1000 m ³]
Oost	91.7	61	175
Midden-Noord	69.0	46	175
Midden-Zuid	116.1	78	174
West	99.7	67	174
Totaal	376	252	

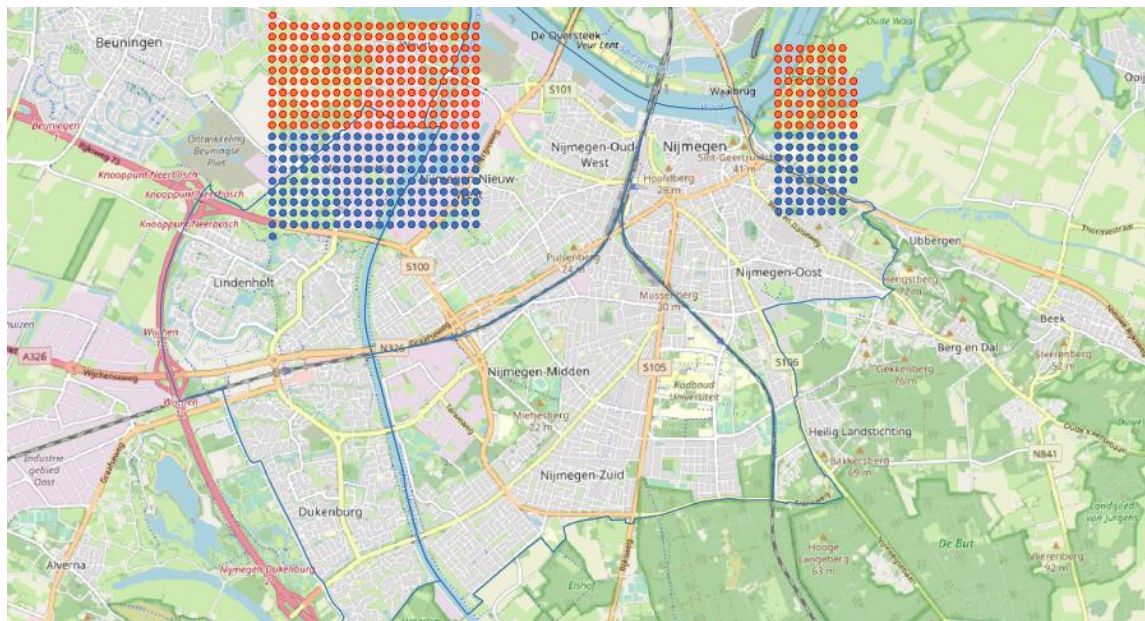
In Variant 2 bevinden de WKO bronnen zich bij in de wijkclusters en daarom zijn de bronnen meer verspreid over de stad (zie Tabel 5.5). Een voordeel hiervan is dat je minder volume nodig hebt per locatie. Echter, het totaal benodigde aantal bronnen is iets hoger omdat deze per wijk naar boven wordt afgerond (266 voor Variant 2 ten opzichte van 252 doubletten bij Variant 1).

Tabel 5.5: Capaciteit en aantal bronnen per wijkcluster Variant 2

	Wijk	Debiet injectie [1000 m ³ /dag]	Aantal doubletten [#]	Volume per doublet [1000 m ³]
Maximum	Hatert	29.5	20	172
Minimum	Heijendaal	2.6	2	152
Gemiddeld	-	11	8	163
TOTAAL	-	376	266	

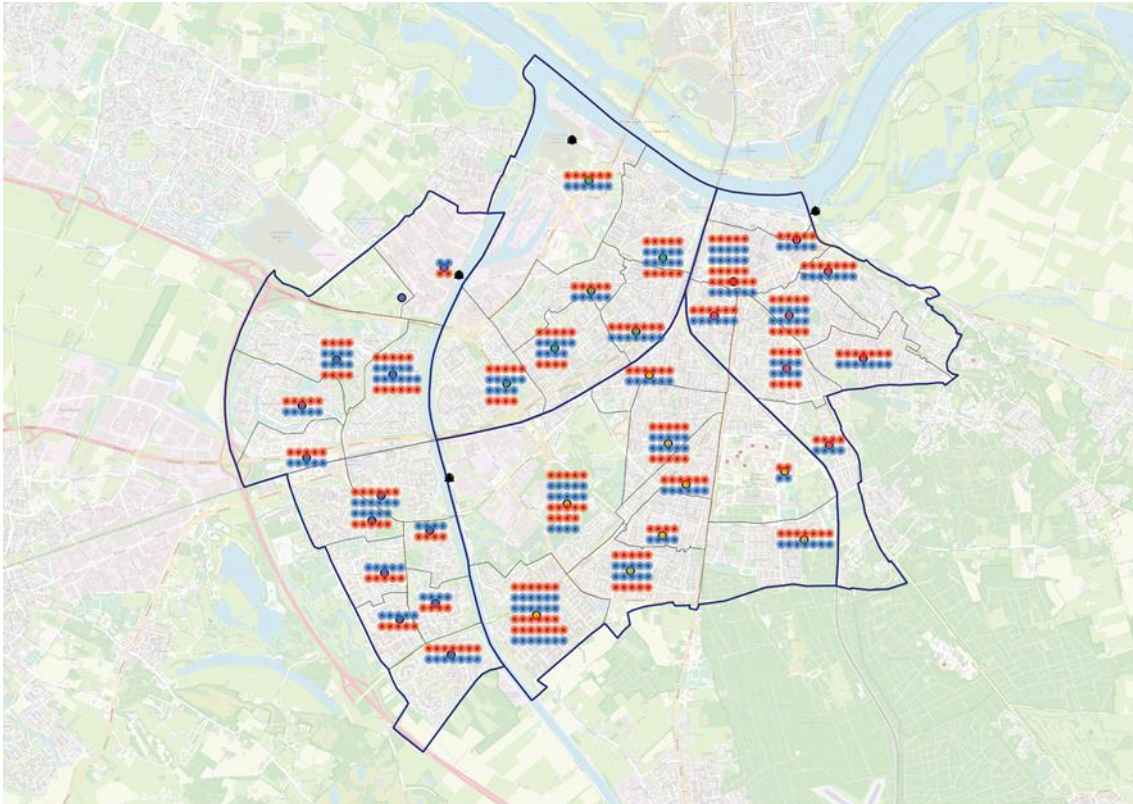
5.2.5 Ruimtebeslag

In Figuur 12 en Figuur 13 zijn de WKO velden ingetekend voor respectievelijk Variant 1 en Variant 2. Als warme bronnen en koude bronnen te dicht bij elkaar liggen, kunnen ze elkaar negatief beïnvloeden. In de praktijk wordt daarom een afstand tussen de koude en warme bronnen gehanteerd van 3 keer de thermische straal. In het geval van stadsdeel Midden-Zuid leidt dit tot een thermische straal van 63 meter. De afstand tussen de verschillende warme bronnen en koude bronnen onderling kan minder zijn, want deze beïnvloeden elkaar niet in negatieve zin. In dit geval hanteren we 1,5 keer de thermische straal. Dit leidt tot een afstand van 190 meter tussen de warme en koude bronnen. Het is daarom efficiënter op de WKO-velden te ordenen in warme en koude stroken.



Figuur 12: Ruimtebeslag van WKO systemen voor Variant 1.

In Variant 1, waarbij uitgegaan wordt van centrale WKO ter plekke van de inlaten, zijn er vier grote WKO velden van ongeveer 1.5 x 1.5km nodig. Omdat de inname locatie voor Variant 1 zowel beschikbaar moet zijn voor de stadsdelen Midden-Noord, Midden-Zuid en West, zou er een groot WKO veld bij de inlaat gemaakt kunnen worden ter grootte van zo'n 2.5 x 2.5km. In Figuur 12 zijn de WKO velden op schaal ingetekend. Hierbij is ervan uitgegaan dat de WKO velden direct onder de inlaatpunten worden aangelegd en er geen beperkende factoren zoals boringsvrije zones, archeologische vondsten, of niet-gesprongen explosieven, etc.



Figuur 13: Ruimtebeslag van WKO systemen voor Variant 2.

In Variant 2 wordt gebruik gemaakt van decentrale WKO-velden, welke in de wijken zijn gelegen. Aangezien de warmtevraag per buurt verschilt, resulteert dit in een gedifferentieerd beeld over de stad. Het gemiddeld aantal doubletten per wijkcluster is 8 doubletten, maar er zijn uitschieters naar boven en onder. Figuur 13 geeft het ruimtelijke beeld van de verdeling van de WKO velden voor Variant 2, waarbij de WKO velden op schaal zijn ingetekend. Bij het intekenen van de WKO velden is aangenomen dat deze direct onder de wijkclusters geplaatst worden, om de benodigde leidinginfrastructuur te beperken. Ook in deze variant is een aanzienlijk ondergrond ruimtebeslag te zien.

5.3 De warmtepompen

De warmtepompen zijn in alle varianten verschillend. Het verschil tussen Variant 1 en Variant 2 is dat de warmtepompen centraal geïmplementeerd zijn, danwel verdeeld over de wijkclusters. Omdat de aanvoer (uit de WKO) en de uitvoer (invoeding in het warmtenet) gelijk zijn in beide varianten zullen er niet of nauwelijks verschillen zijn in het rendement. Het verschil komt tot met name tot uitdrukking in het ruimtebeslag.

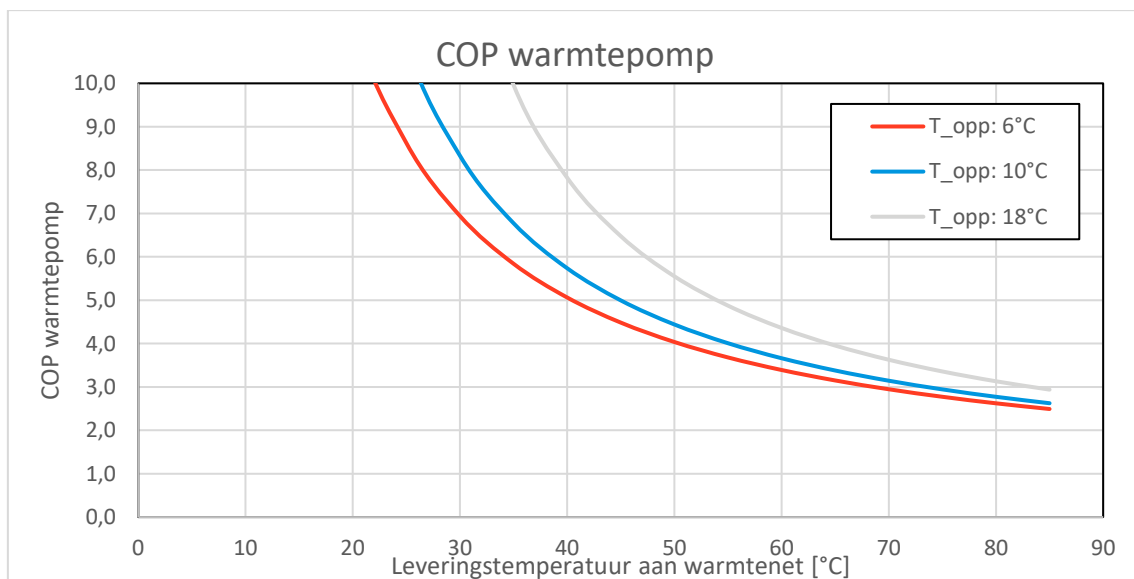
Doordat de warmtepompen in Variant 3 het hele jaar door warmte moeten leveren, is het rendement van de warmtepompen in deze variant lager. In Variant 1 en 2 wordt de warmtepomp gevoed met 18°C, terwijl dit voor Variant 3 kan afnemen tot 6°C. Hierdoor zakt de efficiëntie van de warmtepomp (COP), en moet er in de koude periodes meer energie worden toegevoegd.

5.3.1 Rendement

Het rendement van een warmtepomp wordt uitgedrukt met de Coëfficiënt of Performance (COP). Een warmtepomp met een COP van 4 betekent dat er bijvoorbeeld 1 MW aan elektrische energie nodig is om 4 MW thermische warmte vrij te geven op hogere temperatuur. In dit voorbeeld zou de 3MW thermische energie uit het oppervlaktewater of de WKO kunnen komen.

De COP van een warmtepomp is niet constant en hangt af van de aanvoertemperatuur en leveringstemperatuur. In Figuur 14 is de COP van de warmtepomp gegeven voor verschillende temperaturen van het oppervlaktewater en verschillende temperaturen van het warmtenet. In de varianten voor Nijmegen is rekening gehouden met een leveringstemperatuur van 70°C, wat resulteert in een COP van de warmtepomp tussen de 3 en 4. Indien een lagere aanvoer temperatuur mogelijk is (bijvoorbeeld 55°C), dan stijgt de efficiëntie van de warmtepomp en kan deze waarschijnlijk kleiner worden uitgevoerd.

In Variant 1 en Variant 2 wordt de warmte geleverd uit de WKO bron met een temperatuur van 18°C, wat zorgt voor een constante COP gedurende de winterperiode. In Variant 3 varieert de temperatuur gedurende het hele jaar, waardoor de COP mee varieert en in de winter zo rond de 3 zal zijn.



Figuur 14: COP van een warmtepomp voor verschillende leveringstemperaturen en verschillende temperaturen van het oppervlaktewater. De COP is bepaald op basis van een systeemrendement van 55%.

5.3.2 Vermogen

Het vermogen van de warmtepompen dat nodig is om de temperatuur op te hogen van 18 °C naar 70°C (in Variant 1 en 2) en van 6°C naar 70°C (Variant 3) verschilt dus ook. In Tabel 5.6 is een overzicht geven van de benodigde vermogens van de warmtepomp in de verschillende stadsdelen voor verschillende COP's. Hierbij is de basislast bepaald op basis van de winterperiode (4900 operationele uren – zie Tabel 3.1) waar de warmte uit de WKO bron wordt gewonnen.

Tabel 5.6: Benodigd vermogen van de warmtepomp voor verschillende COP's. In de winterperiode wordt de basislast uit de WKO gewonnen voor de Varianten 1 en 2.

Stadsdeel	Basislast vraag [MW _{th}]	Elektrisch vermogen [MW _e]			TEO/WKO vermogen [MW _{th}]		
		COP = 3	COP = 3.5	COP = 4	COP = 3	COP = 3.5	COP = 4
		Oost	32.7	10.9	9.4	8.2	21.8	23.4	24.6
Midden-Noord	24.6	8.2	7.0	6.2	16.4	17.6	18.5
Midden-Zuid	41.5	13.8	11.8	10.4	27.6	29.6	31.1
West	35.6	11.9	10.2	8.9	23.7	25.4	26.7

Voor Varianten 1 en 2 kan een COP tussen de 3.5 en 4 worden aangenomen, terwijl een COP van 3 reëler is voor scenario 3 (zie Figuur 14). Uit de tabel blijkt dat het maximale warmtepompvermogen meer dan 40 MW (Midden-Zuid) is. Zulke hoge vermogens voor warmtepompen zijn weliswaar niet gebruikelijk, maar bestaan wel. Een studie uitgevoerd door The European Heat Pump Association (2018) laat zien dat er binnen Europa meerdere grote warmtepompen van die omvang in productie zijn. Warmtepompen van zo'n 5 MW zijn goed leverbaar. Dit betekent dat voor grotere vermogens zoals in het geval van Nijmegen er gekeken moet worden naar meerdere warmtepompen die parallel geplaatst worden, wat ook een voordeel is voor betrouwbaarheid en onderhoudbaarheid van het systeem.

5.3.3 Ruimtebeslag

De ruimtelijke inpassing is van dergelijke grote warmtepompcentrales is een belangrijk punt van aandacht. In Variant 1 en 3 worden centrale warmtepompcentrales aangelegd nabij de winningslocaties. Om een inschatting te kunnen maken van het bovengrondse ruimtegebruik van de warmtepompen wordt een vergelijking gemaakt met bestaande warmtepompcentrale in Drammen, Noorwegen. In Figuur 15 is een foto van de centrale met een vermogen van 13.2 MW te zien. Het ruimtegebruik van de centrale is geschat op ca. 1000m². Als wordt uitgegaan van een lineaire toename van het oppervlak dan zou de centrale die voor het stadsdeel Midden Zuid nodig zou zijn ongeveer driemaal zo groot moeten zijn en bijbehorende oppervlak ongeveer 3000 m² zijn.



Figuur 15: Referentie centrale warmtepomp: Drammen Fjernvarme AS (bron: STAR Renewable Energy)

In Variant 2 worden de warmtepompcentrales verspreid over decentrale buurtclusters. Er zijn meerdere centrales nodig, maar de centrales zelf zijn kleiner. Ter illustratie zou gedacht moeten worden aan een centrale met de omvang van de Stadshaard in Enschede (zie Figuur 16). Voor een dergelijke centrale is naar schatting 400m² nodig.



Figuur 16: Referentie warmtegebouw voor buurtcluster: de Stadshaard in Enschede (bron: zoom.nl)

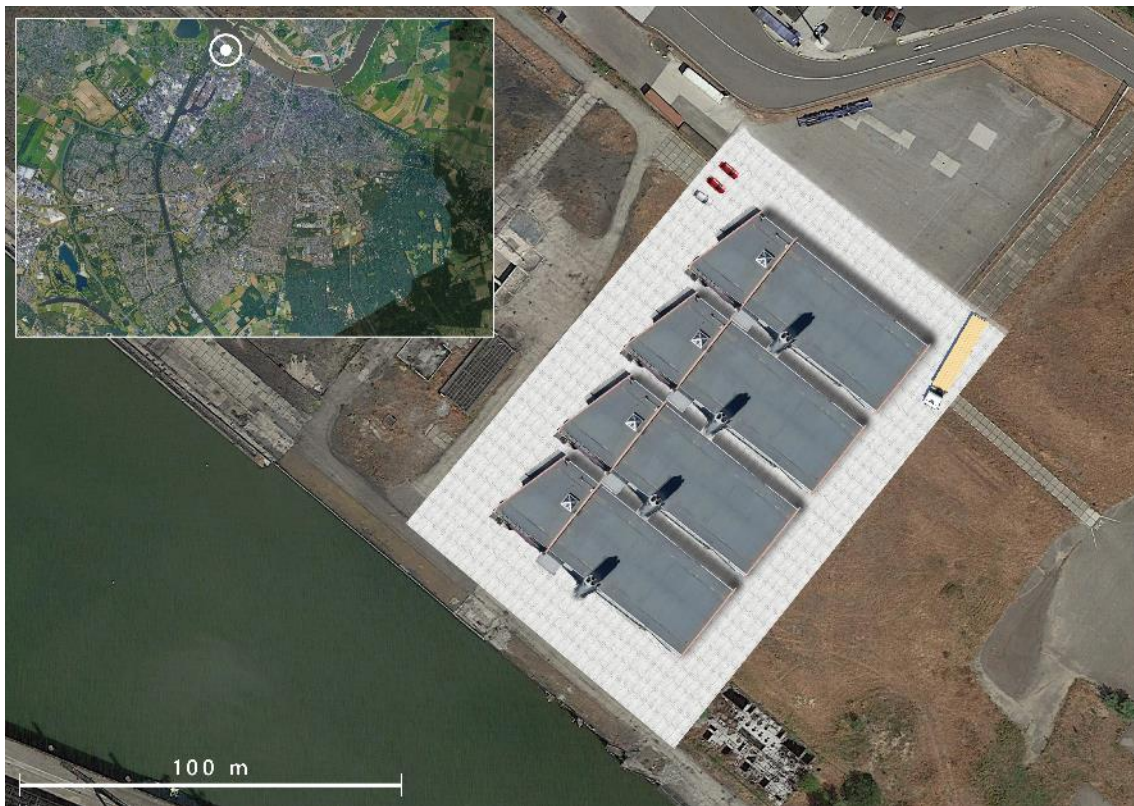
In Tabel 5.7 wordt een overzicht gegeven van het bovengrondse ruimtegebruik van de benodigde warmtepompen voor de verschillende varianten, gebaseerd op een lineaire extrapolatie van de referentie systemen zoals hierboven beschreven. Onder ‘oppervlakte’ wordt alleen het ruimtebeslag van het gebouw zelf beschouwd, exclusief parkeergelegenheden en veiligheidszones. Indien het gebouw voor stadsdeel West, Midden Noord en Midden Zuid samen genomen zou worden bij het innamepunt aan de Waal, dan is er een grotere oppervlakte nodig voor de warmtepomp (7700 m²).

Tabel 5.7: Ruimtegebruik van warmtepompen voor de verschillende varianten.

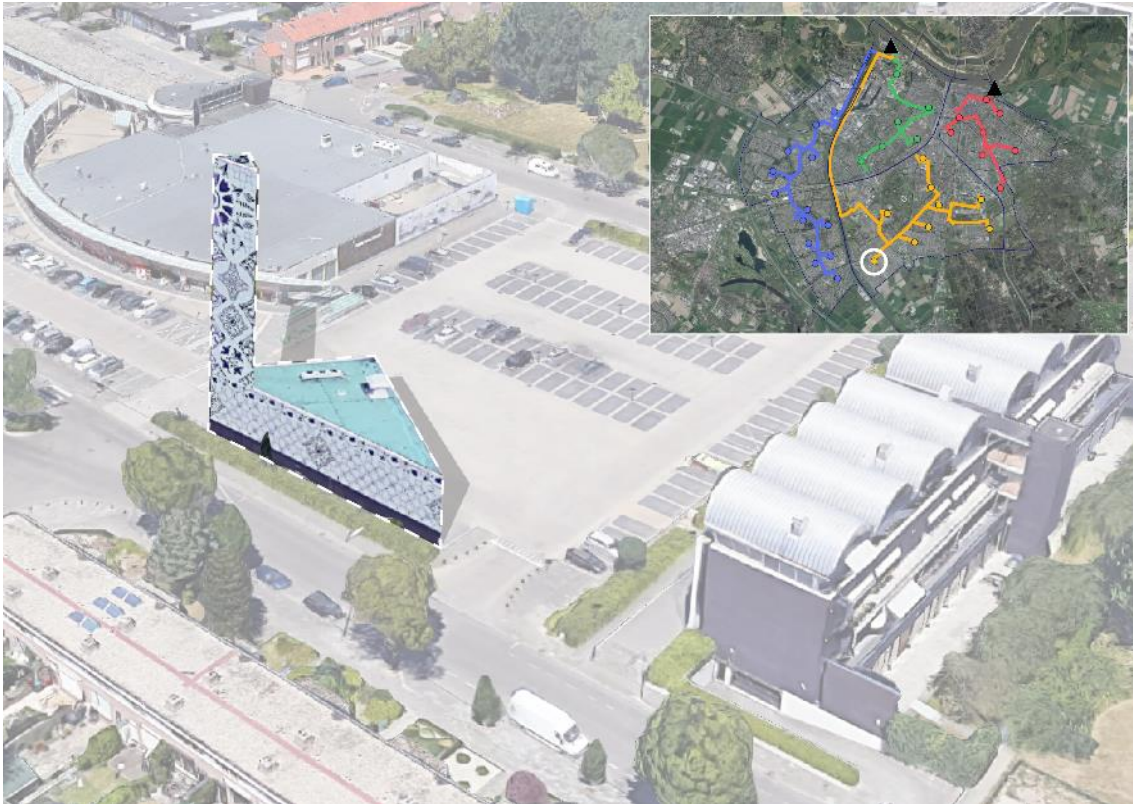
Referentie	Variant 1 & Variant 3		Variant 2
	Vermogen [MW]	Oppervlakte [m ²]	Oppervlakte [m ²]
<i>Drammen Fjernvarme AS</i>	13,2	1000	
<i>Stadshaard Enschede</i>			400
Oost	32,7	2480	400 <i>(er wordt uitgegaan van een uniforme grootte van de buurtclusters)</i>
Midden Noord	24,6	1866	
Midden Zuid	41,4	3142	
West	35,6	2698	

Een degelijke ruimtebeslag is aanzienlijk en is niet eenvoudig in te passen in bebouwd gebied. In de gecentraliseerde varianten (Variant 1 en Variant 3) is het echter mogelijk om buiten de bebouwde kom te zoeken naar geschikte locaties. In de decentrale variant moeten de warmtepompcentrales in de buurt worden geïntegreerd. Figuur 17 geeft een impressie van het ruimtegebruik van centrale warmtepompen (Varianten 1 & 3) en Figuur 18 geeft een impressie van de ruimtelijke impact van

een buurtcluster in de decentrale variant (Variant 2). De 4 warmtepompstations zoals ingetekend in Figuur 17 nemen ongeveer de ruimte in ter grootte van een voetbalveld.



Figuur 17: Indicatie van ruimtegebruik van een centrale warmtepomp: de centrale uit Drammen gepositioneerd bij de inlaat aan de Waal in Nijmegen. De capaciteit in Nijmegen moet 4 keer de capaciteit van Drammen zijn. De 4 centrales passen meerdere keren in het benodigde oppervlak. De 4 gebouwen tezamen beslaan de ruimte van een voetbalveld.



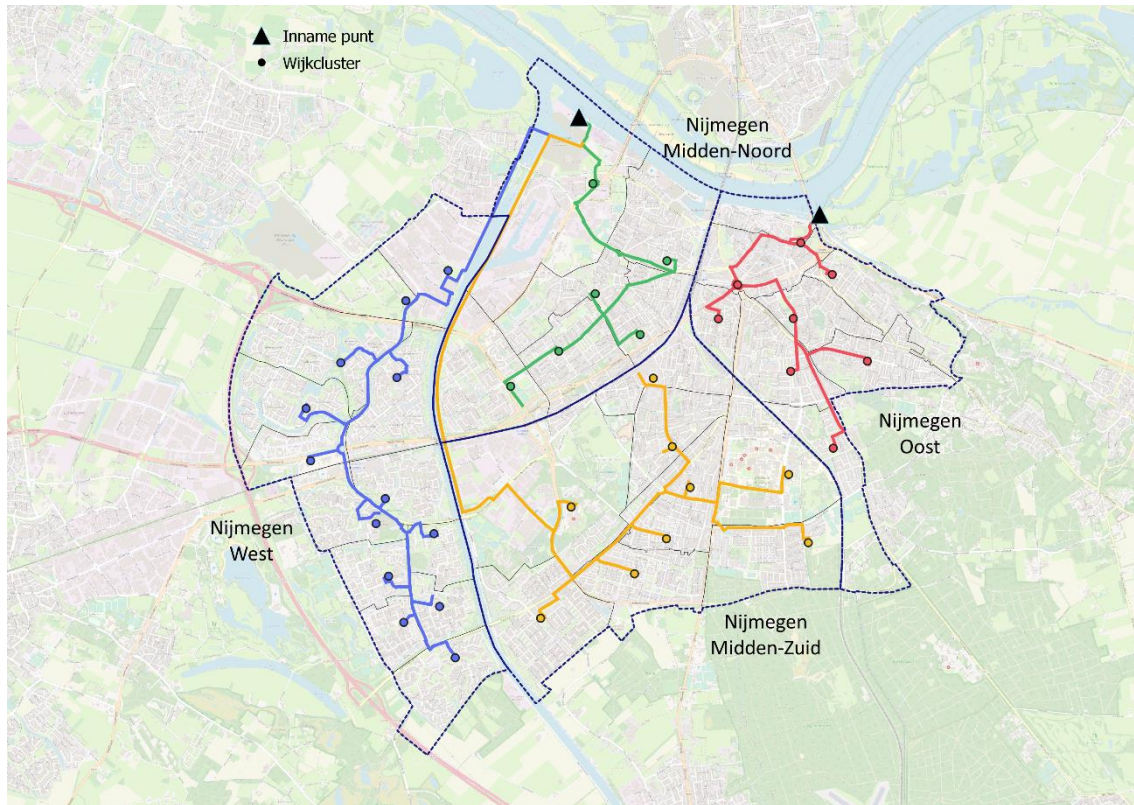
Figuur 18: Indicatie van ruimtegebruik van een buurtcluster: de Stadshaard uit Enschede geplaatst in de wijk Hatert.

5.4 Het warmtenet

In de uitwerking is ervoor gekozen om voor alle varianten van hetzelfde tracé van warmteleidingen uit te gaan. Hierbij wordt onderscheid gemaakt in de transportleidingen, het distributienet en de aansluitleidingen. In de praktijk kan dit tracé verregaand worden geoptimaliseerd. Voor deze studie reikt dat echter te ver en zijn schattingen gemaakt. De totale lengte van het warmtenet is bepaald om de warmteverliezen tijdens transport in te schatten. Naast lengte zijn ook de diameters van de leidingen bepaald om inzicht te krijgen in het ondergrondse ruimtebeslag.

5.4.1 Tracé

In Figuur 19 zijn de tracés van de transportleidingen voor de vier stadsdelen weergegeven. Deze leidingen lopen van de innamepunten (of WKO's) naar een centraal punt in de wijkclusters.



Figuur 19: Tracé van de vier warmtenetten en de wijkclusterpunten. Het water wordt benedenstrooms van de inname locatie geloosd.

In Figuur 20 is een mogelijk distributienet ingetekend, dat van vanaf het centrale punt tot aan de aansluitleidingen lopen. Het tracé bevat zowel een aanvoer als retourleiding, waardoor rekening gehouden moet worden met een verdubbeling van de totale leidinglengte. Voor de fijnmazige vertakkingen van het distributienet is een inschatting gemaakt van de totale leidinglengte. De schatting is gemaakt op basis van de bestaande weg met de aanname dat de aansluitingen hier parallel aan lopen. Voor de aansluitleidingen is gebruik gemaakt van kentallen uit het energietransitiemodel Vesta Mais (CE Delft, 2019). Wanneer alle woningen in een wijk worden aangesloten op een warmtenet dan wordt uitgegaan van 15 m leiding per woning of gebouw. Het aantal unieke adressen in Nijmegen is ongeveer 70.000. Een grove inschatting van lengte voor het distributienet en huisaansluitingen is dus ca. 1050 km.



Figuur 20: Wegbestand zoals meegenomen in berekening lengtes distributieleidingen (bron: Nationaal wegenbestand)

Tabel 5.8 geeft een overzicht van de totale geschatte tracélengtes in de verschillende stadsdelen. Hierbij is een verdeling aangenomen tussen transportleidingen, distributieleidingen en aansluitleidingen op basis van een analyse van 8 buurten in Nijmegen. Deze verdeling is:

- Transport 9 %
- Distributieleiding in de weg 41 %
- Aansluitleiding 44 %
- Overig 6 %

De totale lengte van het leidingnet is zo'n 1300 km. Voor het complete overzicht van tracélengte per wijk wordt verwezen naar Bijlage 3.

Tabel 5.8 : Geschatte tracélengtes voor de verschillende wijken voor de verschillende leidingtypes.

	transport [km]	distributie [km]	Aansluiting [km]	overige [km]	totaal [km]
Oost	24	108	116	16	264
Midden_Noord	24	109	117	16	266
Midden_Zuid	34	156	168	23	380
West	35	158	170	23	386
totaal	117	532	571	78	1297

5.4.2 Leidingdiameters

In Variant 1 en 3 is de aanvoertemperatuur in het warmtenet 70°C en de retourtemperatuur 40°C terwijl in Variant 2 het bronnet ingesteld is op een aanvoertemperatuur van 18 °C en een retourtemperatuur van 6°C, waarbij de aansluitleidingen op ook op 70°C-40°C ingesteld zijn. Bij hogere temperatuurregimes is in principe een kleiner debiet nodig en dus ook een kleinere leidingdiameter.

Voor het vaststellen van de optimale diameters van de leidingen is er een model gemaakt van het netwerk in de simulatie software WANDA. Met die modellen zijn meerdere simulaties uitgevoerd met variërende leidingdiameters. Tabel 5.9 geeft een overzicht van de maximaal en minimaal vereiste (commercieel beschikbare) binnen diameters per variant (zie Bijlage 4).

Tabel 5.9: Ingeschatte minimale en maximale leidingdiameters per variant

	Beschrijving		Warmtevermogen [MW]	Leidingmaat	Binnen diameter [mm]	Mantel diameter [mm]
Variant 1 & 3	<i>dT 30 °C en basislast</i>	Minimum	0,9	DN90	83	153
		Maximum	41,4	DN400	369	696
Variant 2	<i>dT 10 °C en vermogen WKO vullen</i>	Minimum	1,5	DN225	208	489
		Maximum	68,2	DN900	831	1086

Doordat in Variant 1 en Variant 3 hogere temperaturen over een grote afstand worden getransporteerd zijn de energieverliezen in deze varianten hoger dan in Variant 2.

5.4.3 Ruimtebeslag

Omdat de debieten in het bronnet (Variant 2) groter zijn dan in Variant 1 en Variant 3, zijn de diameters van deze leidingen ook groter, zoals aangegeven in Tabel 5.9. De leidingdiameters voor Variant 1 en Variant 3 zijn beperkt, waardoor deze leidingen indien nodig ook nog goed in te passen zijn onder het trottoir. De grote leidingdiameters voor het bronnet van Variant 2 zijn moeilijker inpasbaar. Deze grotere diameters zijn vergelijkbaar met diameters die worden toegepast voor rioleringen. Doordat het in bestaande wijken vaak al druk is met waterleidingen, gasleidingen, elektra en glasvezelkabels in de ondergrond, is het lastig om grote leidingdiameters (denk aan > DN 225) moeilijk in te passen. Deze grote leidingen zouden wel onder bestaande wegen kunnen worden toegepast. Dit kan resulteren in hogere kosten voor de aanleg van het systeem.

6 Vergelijking van de drie varianten

In dit hoofdstuk worden de drie varianten die zijn uitgewerkt in hoofdstuk 4 met elkaar vergeleken op een viertal prestatie-indicatoren:

1. Energieprestatie
2. CO₂-reductie
3. Kosten
4. Impact op ruimte, water en ondergrond

Op basis van deze vergelijking worden er lessen getrokken voor de mogelijkheid voor grootschalige aquathermie.

6.1 Energieprestatie

Allereerst worden de energieprestaties van de drie varianten met elkaar vergeleken. Er is naar het warmteverlies en het elektriciteitsverbruik gekeken.

6.1.1 Warmteverlies

Warmteverliezen treden voornamelijk op in de leidingen van het warmtenet. Het warmteverlies wordt bepaald door de temperatuur van de leiding (bij hogere temperaturen is het temperatuurverschil met de omgeving groter en dus zijn er grotere warmteverliezen), de lengte van de leiding, de diameter van de leiding en het type leiding. Bij het bepalen van de warmteverliezen is onderscheid gemaakt tussen de transportleidingen en het distributienet inclusief de aansluitingsleidingen. De warmteverliezen zijn berekend zoals voorgesteld in de (NEN, 2019). Het warmteverlies is hieronder beschreven voor het transportnet en het distributienet.

Transportnet

Tabel 6.1 geeft een overzicht van het warmteverlies voor de drie varianten. Er is zowel gekeken naar een situatie zonder isolatie van de leidingen en een situatie met isolatie van de leidingen. Uit de tabel blijkt duidelijk dat het warmteverlies in Variant 1 en 3 groter is dan in Variant 2. Dit is het gevolg van de hogere temperatuur in het transportnet (70-40 °C ten opzichte van 18-8°C voor Variant 2).

In Variant 2 zijn de transportleidingen in de winterperiode buiten bedrijf. Alleen in de zomerperiode wordt warmte gewonnen en via het bronnet naar de decentrale WKO's gebracht. Deze kortere periode zorgt uiteindelijk voor minder verlies in het transportnet voor Variant 2. Tabel 6.1 laat ook duidelijk zien de warmteverliezen in Variant 1 en 3 aanzienlijk te reduceren zijn met behulp van isolatie. Het nadeel hiervan is dat de diameters van de leidingen wordt vergroot, wat mogelijk consequenties heeft voor de ruimtelijke inpassing.

Tabel 6.1: Warmteverliezen in het traject vanaf inname tot aan wijkcluster

	Draaiuren traject [uur/jaar]	Warmteverlies zonder isolatie			Warmteverlies met isolatie		
		[MW]	[GWh/jaar]	[%]	[MW]	[GWh/jaar]	[%]
Variant 1 & 3	8760	7,6	66,57	5,3 %	0,9	7,54	0,6 %
Variant 2	2800*	0,24	1,41	0.1%	0,04	0,20	0 %

* In Variant 2 zijn de transportleidingen in de winter buiten bedrijf. Warmte wordt geleverd door de WKO's in de wijkclusters. In de zomer wordt er 2800 uur op volvermogen van de WKO's geleverd.

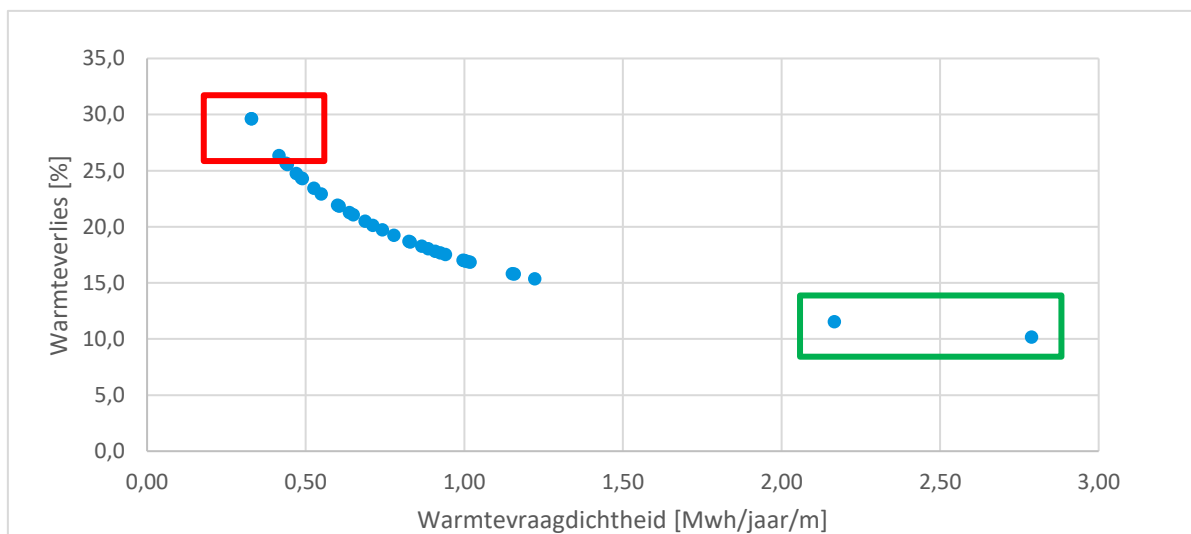
Warmteverlies in het distributienet

Met betrekking tot het distributienet zijn er geen verschillen tussen de varianten. Tabel 6.2 geeft een overzicht van de ingeschatte warmteverliezen per stadsdeel. In totaal zorgt het distributienet en de huisaansluitingen voor een geschat warmteverlies van 18,1 %. De verschillen in warmteverliezen tussen de stadsdelen worden grotendeels bepaald door dichtheid van de warmtevraag van het stadsdeel.

Figuur 21 laat het warmteverlies zien ten opzichte van de warmtevraagdichtheid (LWD). De warmtevraagdichtheid in de wijk stadscentrum is relatief hoog, waardoor het warmteverlies hierdoor kleiner is dan in de wijken 't Acker en 't Broek, waar langere afstanden afgelegd moeten worden. (Zie ook Bijlage 5 voor de warmteverliezen per wijk.)

Tabel 6.2: Schattingen warmteverliezen in de wijkclusters per stadsdeel

	Warmtevraag aansluitingen [GWh/jaar]	Warmteverliezen [%]	Warmteverliezen [GWh/jaar]	Warmtevraag wijkclusters [GWh/jaar]
Oost	357	13.7	57	413
Midden-Noord	203	18.5	46	249
Midden-Zuid	277	18.9	65	342
West	173	24.1	55	228
Total	1009	18.1	222	1232



Figuur 21: Warmteverlies als functie van de warmtevraagdichtheid (LWD⁴) voor alle wijkclusters. In het groen de wijken stadscentrum en Hengstdal en in het rood de wijken 't Acker en 't Broek.

6.1.2 Elektriciteitsverbruik

Het elektriciteitsgebruik van het totale systeem bestaat uit verschillende componenten: de pomp van het TEO systeem, de pomp om de WKO te bedienen, de elektriciteit van de warmtepomp en de pomp voor het warmtenet.

⁴ Een hoge lineaire warmtedichtheid (LWD) geeft aan dat er veel warmte wordt gebruikt en daar zijn dan ook vaak veel warmteleidingen beschikbaar.

Waterinname

Het vermogen van de pomp bij de inlaat is het grootst bij de Varianten 1 en 2, aangezien de debieten voor deze 2 varianten in een korte periode (4 maanden) geleverd moeten worden. In Variant 3 moet de pomp wel het hele jaar door draaien, maar er is minder vermogen nodig, waardoor er een kleinere pomp kan worden toegepast.

Opslag

Bij de Varianten 1 en 2 moet de warmte in de zomer worden opgeslagen in de WKO zodat het in de winter weer onttrokken kan worden. Om dit te kunnen doen is een WKO bronpomp nodig. Afhankelijk van de druk en het debiet van de pomp wordt een pomp geselecteerd. Bij Variant 1 zou dit een pomp kunnen zijn om meerdere doubletten te vullen, maar bij Variant 2 zijn er meerdere pompen nodig, welke kleiner uitgevoerd zouden kunnen worden. Deze elektriciteitsvraag geldt niet voor Variant 3.

Warmtepomp

De grootste elektriciteitsverbruiker van het systeem is de warmtepomp. De energie voor de warmtepomp is normaal gesproken veel groter dan de benodigde energie voor de waterinname en de WKO bronpomp. Het elektriciteitsverbruik is afhankelijk van de COP van de warmtepomp. Deze is voor de varianten met WKO duidelijk lager dan voor de variant zonder WKO. Het verschil in stroomverbruik tussen Variant 1 en 2 wordt uitsluitend bepaald door de warmteverliezen. Omdat het warmteverlies in Variant 1 groter is dan in Variant 2 (zie vorige paragraaf) moeten de warmtepompen het verlies compenseren. De verschillen tussen Variant 1 en 2 zijn overigens klein, zeker als de leidingen goed geïsoleerd worden.

In Variant 3 wordt geen warmte opgeslagen, maar gedurende het hele jaar rechtstreeks warmte gewonnen uit het oppervlaktewater. In de winter is de watertemperatuur laag, gemiddeld 6°C graden. De warmtepompen moeten een groter temperatuurverschil overbruggen (van 6°C naar 70°C) en daar is meer elektriciteit voor nodig. Bovendien gaat de COP van de warmtepompen omlaag vanwege de lagere aanvoertemperatuur.

Distributiepomp

De distributiepompen om het water door het warmtenet te pompen zijn voor Variant 2 het grootst door de grote hoeveelheden water die door de leidingen gepompt moet worden. De pompen zullen voor Variant 1 en Variant 3 vergelijkbaar zijn.

Het is niet eenduidig om een voorkeur te geven voor het warmtenet op basis van elektriciteitsvraag. Doordat de elektriciteitsvraag van de warmtepomp het grootst is bij Variant 3, lijkt de voorkeur uit te gaan naar Variant 1 of 2. Echter, de afwezigheid van een WKO bronpomp zorgt voor een significante energiebesparing bij Variant 3. De extra elektriciteit die naar de grote warmte pompen moet zou ertoe kunnen leiden dat het elektriciteitsnet verzaagd zou moeten worden voor deze grote warmtepompen. Alle bovengenoemde punten moeten in een detailontwerp verder beschouwd worden.

6.2 CO₂-reductie

Om de CO₂ reductie ten opzichte van aardgas te bepalen is de uitstoot CO₂ per Peta joule bepaald op basis van de gegevens en voorspellingen van het klimaat en energieverkenningen rapport van de PBL (2020). In Tabel 6.3 is de CO₂ uitstoot voor aardgas en voor elektriciteit voor te zien voor de

huidige situatie en voor de jaren 2030 en 2050 zoals beschreven in het klimaat en energieverkenningrapport. Indien deze prognoses gehaald worden zal de CO₂-uitstoot van een 100% door aquathermie gevoed systeem naar nul gaan richting 2050 doordat de opgewekte stroom voor de warmtepomp door duurzame bronnen wordt geleverd.

Tabel 6.3: CO₂ uitstoot per PJ voor aardgas en elektriciteit voor verschillende jaren (gebaseerd op PBL 2020).

bron	CO ₂ uitstoot	Elektriciteitsgebruik		CO ₂ uitstoot per PJ
	[Mton]	[TWh]	[PJ]	[Mton/PJ]
aardgas	1.8	9.8	35.2	0.051
elektriciteit 2019	42.3	118	424.8	0.100
elektriciteit 2030	18.8	120	432	0.044
elektriciteit 2050	0	-	-	0

Op basis van de CO₂ uitstoot per PJ is een berekening gemaakt voor de CO₂ uitstoot voor de gemeente Nijmegen. Deze berekening is gebaseerd op de warmtevraag zoals beschreven in hoofdstuk 3.2. In Tabel 6.4 is een overzicht geven van de CO₂ uitstoot en de CO₂ reductie als gevolg van de grootschalige toepassing van aquathermie. Hierbij is de elektriciteitsvraag gebaseerd op een warmtepomp met een COP van 3.5 (zie paragraaf 5.3.1). Door de grootschalige toepassing van aquathermie wordt de CO₂ uitstoot gehalveerd in 2019. Deze CO₂ uitstoot zal naar 0 gaan als de elektriciteit volledig met duurzame bronnen wordt opgewekt (prognose 2050).

Tabel 6.4: CO₂ reductie in Nijmegen door toepassing van grootschalige aquathermie

warmtebron	verbruik (zie paragraaf 3.2)	CO ₂ uitstoot [Mton CO ₂ /jr]	besparing t.o.v. aardgas [Mton CO ₂ /jr]
aardgaswarmte	119 mln m ³ /jaar	0.214	-
TEO systeem 2019		0.107	0.107
TEO systeem 2030	3.8 GJ/jaar	0.047	0.167
TEO systeem 2050		0.000	0.214

Bij deze inschatting zijn de warmteverliezen en de piekvoorziening gemakshalve buiten beschouwing gelaten. In de praktijk is de piekvoorziening vaak nog een aardgasketel, wat tot extra CO₂-uitstoot zal leiden. Op termijn kan de piekvoorziening ook CO₂ neutraal worden door toepassing van een E-ketel, groengas of waterstof.

6.3 Kostenschatting

Kosten zijn essentieel voor een gebalanceerde afweging. In deze paragraaf wordt alleen ingegaan op de kosten voor het aquathermiesysteem met opslag. Het warmtenet wordt buiten beschouwing gelaten. De kosten voor een TEO aquathermie systeem worden bepaald door de bron, de eventuele opslag en de energiecentrale die de temperatuur op het gewenste niveau brengt. Om de kosten te bepalen is een globale kosteninschatting gemaakt, waarbij kostenkentalen zijn gebruikt zoals beschreven in het rapport WarmingUp programma 3C, Aquathermie configuraties (2021). Met behulp van deze kostenkentalen is een prijs per GJ bepaald van deze techniek. Daarnaast is de

gevoeligheid van deze prijs per GJ onderzocht door te variëren met het vermogen, de COP, de vollasturen en de afschrijvingstermijn van het TEO systeem. Een aantal belangrijke kostenposten die locatie afhankelijk zijn zoals grondkosten, bouwkosten en aansluitkosten zijn niet meegenomen in de berekeningen.

De kosten van een TEO systeem wordt bepaald door de componenten waar rekening mee is gehouden. Zo is er bijvoorbeeld geen WKO aanwezig in Variant 3 wat scheelt in de aanleg en operationele kosten. Dit resulteert echter wel in een lagere COP van de warmtepomp en een hoger elektriciteitsverbruik zoals beschreven in paragraaf 5.3. Het elektriciteitsverbruik van de energiecentrale is de grootste kostenposten van alle posten.

Omdat aquathermie is aangemerkt als duurzame energiebron is, kan er voor aquathermiesystemen SDE++ subsidie worden aangevraagd⁵, wat ongeveer € 50/MWh_{thermisch} voor maximaal 3500 vollasturen. Tot op heden is het alleen mogelijk om SDE++ subsidie aan te vragen voor systemen met een WKO koppeling, waardoor deze systemen (Variant 1 en 2) rendabeler zijn dan systemen zonder WKO koppeling (Variant 3).

Als de subsidie buiten beschouwing wordt gelaten, dan is Variant 3 het meest kostenefficiënt. De gereduceerde efficiëntie van de warmtepomp zorgt wel voor wat hogere elektriciteitskosten dan voor Variant 1 en 2, maar deze extra kosten wegen niet op tegen de aanleg en het onderhoud van de grote WKO velden en de extra kosten voor het grotere aquathermiesysteem die nodig zijn voor Variant 1 en 2. Een grove kosteninschatting laat zien dat de kosten voor aquathermie zonder subsidie en zonder vastgoed zo tussen de 8 en 16 euro per GJ liggen.

6.4 Ruimte, ondergrond en water

De varianten met WKO hebben een significant aantal WKO-doubletten nodig. Het is niet eenvoudig om deze WKO velden makkelijk in te passen in een stedelijke omgeving. Vanuit ruimtelijk perspectief is een variant zonder WKO daarom wenselijker. Als de varianten met WKO worden vergeleken, dan zou er een voorkeur kunnen zijn voor de decentrale variant, omdat de WKO-velden gespreid over de stad kunnen worden aangelegd. In de centrale variant liggen alle WKO's in een groot veld en de vraag is of een locatie gevonden kan worden waar genoeg ruimte is.

Op basis van de effecten op het watersysteem zou een variant met WKO de voorkeur krijgen. In een variant zonder WKO wordt ten eerste meer warmte onttrokken aan het watersysteem dan in de varianten met WKO, maar daarnaast is de lozingstemperatuur ook laag. De invloed van deze lage lozingstemperatuur op de nabijgelegen omgeving moet daarom goed worden onderzocht. Omdat het lozingsdebiet slechts 0.4% van het afvoerdebiet van de Waal is, is grootschalige impact niet te verwachten. Omdat het lozingsdebiet aanzienlijk is voor de verschillende varianten, moet er bij alle varianten onderzocht worden of het lozingsdebiet niet tot dwarsstromingen gaat leiden, wat de scheepvaart kan beïnvloeden.

Met betrekking tot de inpasbaarheid van het warmtenet zou een variant met een 70-40 warmtenet (Varianten 1 en 3) wenselijker zijn dan een bronnet (Variant 2), omdat de benodigde leidingdiameters kleiner zijn. In het geval van een bronnet zijn in delen van het tracé leidingdiameters tot 1 meter vereist. Door de drukte in de ondergrond zijn grote leidingen van warmtenetten een uitdaging voor de bestaande straat- en wijkinfrastructuur. Bovendien moet in of aan de rand van de

⁵ <https://www.rvo.nl/subsidie-en-financieringswijzer/sde/aanvragen>

buurt gezocht worden naar ruimte voor de warmtepompcentrales. In de gecentraliseerde variant kan naar ruimte buiten de bebouwde kom worden gezocht.

7 Discussie

In deze verkenning zijn drie varianten uitgewerkt voor grootschalige toepassing van aquathermie in Nijmegen en deze varianten zijn met elkaar vergeleken. Uit de verkenning komt een aantal interessante inzichten naar voren, zowel voor de toepassing van Aquathermie in Nijmegen als voor de voor de verdere kennisontwikkeling over Aquathermie. We achten het daarom zinvol om een aantal methodologische kanttekeningen te plaatsen bij deze verkenning.

Allereerst is in deze verkenning uit gegaan dat alle stadsdelen ten zuiden van de Waal gevoed worden met TEO. In de praktijk zal echter een mix van warmtebronnen gebruikt worden. Hierdoor zal in de benodigde capaciteit van de TEO-systemen altijd minder zijn dan waar vanuit is gegaan in deze studie, bij een gelijkblijvende energievraag. Ook de afweging tussen bronnen is buiten beschouwing van deze verkenning gehouden. In de Transitivievisie Warmte worden warmteopties per buurt gegeven. In deze verkenning is daar geen rekening mee gehouden. Voor de onderzoeksvraag was het juist gewenst om zoveel mogelijk van de warmtevraag met aquathermie te voorzien.

In deze studie is Nijmegen in vier warmtegebieden opgedeeld. Dit betekent dat er per warmtegebied forse capaciteit nodig is en dus ook relatief grote in- en uitlaten, warmtewisselaarstations en warmtepompcentrales. Als wordt uitgegaan van kleinere warmtekavels zal de dimensionering navenant afnemen en zal de infrastructuur makkelijker in te passen zijn. Bij eenzelfde totale capaciteit zullen er dan uiteindelijk meer kleinere installaties verspreid over de stad nodig zijn. Het schaalniveau in deze verkenning waren de wijkclusters. Maar door nog verder in te zoomen op woonblokken kan veel meer gevarieerd, gedifferentieerd en geoptimaliseerd worden. Op dat niveau kan worden nagedacht over de meest optimale systeemconfiguraties voor die specifieke locaties, de ruimtelijke inpassingen en mogelijke kostenreducties. Hiervoor wordt veel detail gevraagd, hetgeen te ver reikt voor deze verkenning.

Het warmtenet-tracé is in deze verkenning ingetekend op basis van de kortste route onder bestaande wegen. Er is hierbij geen rekening gehouden met eventuele belemmeringen in de ondergrond. In de praktijk zijn er echter talloze potentiële ondergrondse obstakels, waardoor tracés eventueel omgelegd moeten worden. Ook is er in deze verkenning geen rekening gehouden met de ontwikkeling van het warmtenet door de tijd.

De ontwikkeling van een warmtenet volgt in de praktijk de warmtevraag. Er moet voldoende zekerheid zijn over het aantal aansluitingen voordat er in een warmtesysteem geïnvesteerd wordt. Dit betekent dat een warmtenet ontwikkeld wordt langs stadsdelen waar genoeg klanten zijn, in plaats van de hier gekozen methode van de 'kortste route'. In de praktijk zal het tracé er dus anders uitzien. In de verkenning wordt in alle varianten de temperatuur uiteindelijk opgekrikt naar 70°C voordat het de gebouwen in gaat. Voor ruimteverwarming zijn vaak, zeker voor nieuwere woningen lagere temperaturen afdoende. De temperatuur is hier vastgezet op 70°C vanwege het tapwater en het risico op legionella. Bij lagere temperaturen zal er minder stroomverbruik zijn en minder warmteverliezen, wat een positief effect heeft op CO2 reductie. Vermogens van de installaties en de diameter van de leidingen kunnen daarmee ook omlaag, waardoor de kosten omlaag gaan en de ruimtelijke inpassing eenvoudiger wordt.

Tot slot een methodische kanttekening bij de gehanteerde WKO-capaciteit. Hoewel onder Nijmegen in principe meer dan 100 meter beschikbare aquiferdiepte aanwezig is, is vanwege de geologische opbouw in verschillende grondlagen de volledige capaciteit niet te benutten. In deze studie is

veiligheidshalve uitgegaan van 20 meter beschikbare aquifer. Als er toch een grotere aquiferdiepte beschikbaar is, dan zal het aantal WKO-doubletten ook verminderen.

Rekening houdend met de methodische kanttekeningen, is een aantal inzichten uit deze verkenning naar voren gekomen:

- De eerste is dat er is niet één variant is die duidelijk als beste uit de bus komt. De varianten scoren verschillend op de gestelde criteria. Er zijn trade-offs tussen de prestatiecriteria. Door bepaalde ontwerpkeuzen te maken kan de prestatie op één van de criteria verbeterd worden, maar dat zal mogelijk gevolgen hebben voor een ander criterium.
- Tweede inzicht is dat een variant zonder WKO voor stedelijke gebieden toch interessant kan zijn vanwege de ruimtedruk. Vanuit energetisch perspectief is een systeem zonder WKO niet optimaal, maar vanuit ruimtelijk perspectief juist wel interessant. Het ondergrondse ruimtebeslag is hierdoor veel minder. Bovendien zijn de kosten van de WKO relatief hoog, waardoor een variant zonder WKO goedkoper is.
- Derde inzicht is dat consequenties van ontwerpkeuze (de varianten) aanzienlijk zijn met betrekking tot de energieprestatie, CO₂-reductie, kosten en ruimtelijke inpassing. Deze effecten worden weliswaar kleiner als de systemen kleiner zijn, maar door slimme ontwerpkeuzes kan geoptimaliseerd worden naar hogere energieprestaties of ruimtelijke inpassing.
- Tot slot wordt opgemerkt dat goed gekeken moet worden naar de locaties van de in- en uitlaten en de omvang van de onttrekking per locatie. In het geval van Nijmegen waar de capaciteit van de Waal zeer groot is, is deze invloed beperkt, maar in het geval er warmte wordt onttrokken uit kleinere wateren, kan door een betere spreiding (meerdere kleinere winlocaties langs de watergangen) de ruimtelijke inpassing worden verbeterd en kan eventuele impact op de temperatuur en stroming worden verminderd.

8 Conclusies en aanbevelingen

In deze verkenning zijn drie varianten van grootschalige toepassing van aquathermie in Nijmegen uitgewerkt met als doel een beeld te krijgen over hoe dat er mogelijk uit zou kunnen zien, welke technische en ruimtelijke beperkingen er zouden zijn en welke overwegingen hierbij nog meer van belang zijn.

8.1 Conclusies

De conclusies zijn opgebouwd aan de hand van de onderzoeksvragen zoals benoemd in Hoofdstuk 1.2.

1. Er kan genoeg warmte uit het oppervlaktewater worden gewonnen om in de gehele warmtevraag van Nijmegen te voorzien

Er is meer warmte in de Waal en het Maas-Waal kanaal beschikbaar dan Nijmegen nodig heeft. Er zijn in principe ook geen technische belemmeringen om de warmte op deze schaal te winnen. Ook voldoet deze grootschalige warmtewinning uit de Waal aan de randvoorwaarden van het beleidskader koudelozingen in wording. Grootschalige toepassing van thermische energie uit oppervlaktewater in Nijmegen zou daarom als serieuze optie in de 'warmtemix' kunnen worden meegenomen. Hierbij dient rekening gehouden te worden met de verdeling van warmtewinning uit de Waal enerzijds en het Maas-Waal met een beperkte capaciteit anderzijds. Het Maas-Waal kanaal zelf heeft te weinig capaciteit om de helft van Nijmegen van warmte te voorzien. Wel is deze geschikt om kleinere delen (wijken) van de stad te voeden.

2. Aquathermie op deze schaal kan met bestaande technologie worden uitgevoerd

Uit deze verkenning komt naar voren dat voor de toepassing van aquathermie op deze schaal geen nieuwe technologie nodig is. Dit geldt voor alle drie de varianten. Er bestaan talloze kleinere toepassingen van aquathermie in Nederland. De systeemcomponenten waaruit deze aquathermie-systeem zijn opgebouwd zijn technisch gezien opschaalbaar:

- *In- en uitlaatwerken:* voor de hier bekeken TEO-systemen zijn debieten voor de verschillende stadsdelen van 2-3 m³/s nodig. Dit zijn debieten die veelvuldig voorkomen in poldergemalen. Ter illustratie, het debiet van het koelsysteem van de oude kolencentrale in Nijmegen bedroeg ca. 25 m³/s.
- *Warmtewisselaars:* de capaciteit van de warmtewinning is eenvoudig op te schalen door het aantal warmtewisselaars uit te breiden.
- *Warmte-koude opslag:* ook de capaciteit van de warmteopslag is opschaalbaar door het aantal WKO-doubletten uit te breiden. De totale opslagcapaciteit in de ondergrond van Nijmegen is voldoende.
- *Warmtepompen:* de warmtepompcapaciteit in de hier bekeken systemen is aanzienlijk, maar de benodigde capaciteit kan worden verkregen door meerdere industriële warmtepompen naast elkaar te zetten, die nu al op de markt verkrijgbaar zijn. In het buitenland (o.a. Zweden, Verenigd Koninkrijk), wordt al langer gewerkt met warmtepompen van deze omvang.

3. Het ruimtebeslag van toepassing van aquathermie met WKO op deze schaal is aanzienlijk

Het ruimtebeslag van dergelijke warmtesystemen is aanzienlijk. Dit geldt zowel voor het bovengronds als ondergronds ruimtebeslag. Het extra ruimtebeslag van de winning uit het water bij de inlaten en uitlaten en het warmtewisselaarstation vormt daar slechts een beperkt onderdeel van. Een veel groter deel van het ruimtebeslag wordt gevormd door het ondergrondse warmtenet. In geval van seizoensopslag komen hier ondergrondse WKO-doubletten. De variant van aquathermie zonder WKO heeft dus een veel kleiner ondergronds ruimtebeslag. Vanwege de grote warmtepompcapaciteit die nodig is, hebben de warmtepompcentrales een aanzienlijk ruimtebeslag. De inpassing van de centrales in de bebouwde omgeving kan een lastige opgave zijn.

4. Ook met de huidige energiemix kan al een aanzienlijke CO2-reductie worden gerealiseerd

Indien TEO op grote schaal zou worden toegepast voor Nijmegen dat zou dit een reductie van 50% in CO2 uitstoot op basis van de huidige energiemix. De uitstoot van CO2 voor aquathermie is het gevolg van de elektrische energie voor de warmtepomp. Door de toename van duurzame bronnen zoals wind en zon energie om elektriciteit op te wekken, zal de CO2 uitstoot dalen. Volgens de prognoses van het PBL, zou de elektriciteit in 2050 volledig met duurzame bronnen moeten worden opgewekt, waardoor de CO2 uitstoot naar 0 zal gaan.

5. Mogelijke risico's om rekening mee te houden

De risico's zijn door ontwerpkeuzen grotendeels te mitigeren. In het geval van Nijmegen zouden er potentiële risico's kunnen ontstaan door onttrekkingen in het Maas-Waal kanaal, door de beperkte capaciteit van het kanaal (zie Hoofdstuk 3.3). Dit zou dan gaan om temperatuurverlaging en veranderende stroompatronen door grootschalige onttrekking van water zijn. Deze uitdagingen gelden in veel mindere mate voor de Waal doordat het onttrekkingsdebiet minder dan een half procent is van de gemiddelde afvoercapaciteit.

Het effect van temperatuurverlagingen op de ecologie moet onderzocht worden in de ontwerpfase. Daarnaast kan bij het ontwerp van de inlaat en uitlaat, de stroompatronen rondom de inlaat en de uitlaat beperkt blijven.

Potentieel risico met betrekking tot de warmte-koude opslag is de mogelijkheid van interferentie tussen de WKO's. Dit kan worden voorkomen door de warme en koude bellen op voldoende afstand van elkaar te plaatsen. Daarnaast bestaat de mogelijkheid dat verontreinigen in de bodem gemobiliseerd kunnen worden. Bij grootschalig gebruik neemt dit risico toe.

8.2 Aanbevelingen voor toekomstige werkzaamheden

Uit deze verkenning volgt een aantal aanbevelingen voor verdieping:

- De eerste aanbeveling is om aquathermie als veel kansrijkere bron op te nemen in de visies en plannen en met name voor veel grootschaligere toepassing dan tot nu toe bedacht was. In een volgende stap moet dit in samenhang met andere bronnen bekeken worden. (In deze studie is een overschatting van de benodigde capaciteiten en het ruimtebeslag, omdat er geen rekening is gehouden met andere bronnen). Als de warmtemix uit de Transitievisie

Warmte van Nijmegen als uitgangspunt genomen wordt kan een nadere verdiepingsslag gemaakt worden.

- Een tweede aanbeveling is om de kosten nader uit te werken in de vorm van businesscases. In deze verkenning zijn de kosten bewust op hoofdlijnen meegenomen. Op het moment dat er een vergelijking gemaakt gaat worden tussen warmteopties zijn uitgebreidere analyses van de kosten noodzakelijk.
- Een derde aanbeveling is om varianten uit te werken waarbij ruimtelijk wordt geoptimaliseerd om een beter beeld te krijgen van de ruimtelijke inpassing. Dit kan onder andere door te variëren in de grootte van de warmtegebieden (dus meer dan vier stadsdelen) en spreiding van de in- en uitlaten, warmtewisselaarstations, warmtepompcentrales en WKO's. Hierin zou ook een verdiepingsslag moeten worden meegenomen met betrekking tot de WKO-capaciteit en potentiële filterlengtes.

Bronnenlijst

- Best, I., Orozaliev, J., & Vajen, K. (2018). Impact of Different Design Guidelines on the Total Distribution Costs of 4th Generation District Heating Networks. *Energy Procedia*, 149, 151–160. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.179>
- de Boer, T. J. (2018). *Optimization of a District Heating Network with the Focus on Heat Loss*, MSc thesis Delft University of Technology
- CE Delft (2019). Overzicht aanpassingen Vest MAIS, CE Delft rapportage publicatienummer: 19.190141.105
- Deltares (2021). Potentiekaarten aquathermie - www.aquathermieviewer.nl
- Deltares (2020). *SOBEK Suite*. <https://www.deltares.nl/nl/software/sobek-suite/>
- European heat pump association. (2018). *Large scale heat pumps in Europe: 16 examples of realized and successful projects*.
- ISSO (2012). Grondleidigen voor warmte- en koudetransport, ISSO publicatie 7, ISBN: 978-90-5044-232-9
- KWA. (2017). *Graaddagen in 2017, 2018, 2019*. <https://www.kwa.nl/diensten/graaddagen-en-koeldagen>
- NEN. (2017). *NEN 7125:2017 nl - Energieprestatienorm voor maatregelen op gebiedsniveau (EMG) - Bepalingsmethode*.
- NEN. (2019). *NEN-EN 13941-1:2019 Stadsverwarmingsbuizen - Ontwerp en installatie van thermisch geïsoleerde enkele en dubbele buissystemen voor ondergrondse warm water leidingnetten - Deel 1: Ontwerp*.
- Niewold, F. (2019). *Kengetallen aquathermie*.
- Ostergard D.S., Svendsen (2017). Space heating with ultra-low-temperature district heating - a case study of four single-family houses from the 1980s, *Energy Procedia* 116, p.p. 226-235, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.070>
- Ostergard D.S., Svendsen S. (2018a). Experience from a practical test of low temperature district heating for space heating in five Danish single-family houses from the 1930s, *Journal of Energy* 159 p.p. 569-578, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.142>
- Ostergard D.S., Svendsen S. (2018b). Are typical radiators over-dimensioned? An analysis of radiator dimensions in 1645 Danish houses, *Journal of Energy and Buildings* 178, p.p. 206-215, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.035>
- Papa, T., Wijnant-Timmerman, S., & van Leeuwen, R. (2019). *Warmtenetten: Technische karakterisering WIEfm Rapport werkpakket 4*.
- PBL, (2020). *Klimaat en Energieverkenning 2020*, <https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2020-klimaat-en-energieverkenning2020-3995.pdf>
- Pieper, H., Mašatin, V., Volkova, A., Ommen, T., Elmegaard, B., & Markussen, W. B. (2019). Modelling framework for integration of large-scale heat pumps in district heating using low-temperature heat sources: A case study of Tallinn, Estonia. *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*, 20, 67–86. <https://doi.org/10.5278/ijsepm.2019.20.6>
- RVO. (2020a). *Warmteatlas*. <https://rvo.b3p.nl/viewer/app/Warmteatlas/v2>
- RVO. (2020b). *WKO-bodemenergietool*. <https://wkotool.nl/>
- Sommer, W. T. (2015). *Modelling and monitoring of Aquifer Thermal Energy Storage : impacts of soil heterogeneity, thermal interference and bioremediation*. Wageningen Universit.
- Techniplan. (n.d.). *Powerpoint presentatie BENG-WKO*.
- WarmingUP (2021). *Aquathermie configuraties - overzicht TEO, TED en TEA door middel van factsheets, kostenkanten en beslisbomen*, WarmingUp werkpakket 3C, Deltares, KWR, Techniplan, IF|Technology, Syntraal, <https://www.warmingup.info/project/19/3c-techniek-ontwerp-en-kosten>
- WarmingUP (2021). *Potentiekaarten aquathermie*, <https://warmingup.geoapps.nl/#8f8334e5-9aaa-4d2e-ad9b-ffefb02888e1>

Bijlage 1 Warmtevraag

1.1 Energievraag

De jaarlijkse warmtevraag per wijk is gebaseerd op het gasverbruik van de desbetreffende wijk volgens de gegevens van het CBS. Met behulp van de onderstaande formule is de warmtevraag (Q_{warmte}) berekend.

$$Q_{warmte} \left(\frac{GJ}{jaar} \right) = \eta * Gas_{year} \left(\frac{m^3}{jaar} \right) * Cal_{waarde} \left(\frac{MJ}{m^3} \right) / 1000$$

Met $\eta = 0,9$ en $Cal_{waarde} = 35,17$

Met een energie-inhoud van $35,17 \text{ MJ/m}^3$ (NEN, 2017) van aardgas en een efficiëntie van 90 % resulteert dit een conversie factor van $31,65 \text{ MJ}$ warmtevraag per kubieke meter aardgasverbruik.

De totale jaarlijkse warmtevraag van alle wijken die op het traject worden aangesloten is $1,01 \text{ TWh}$.

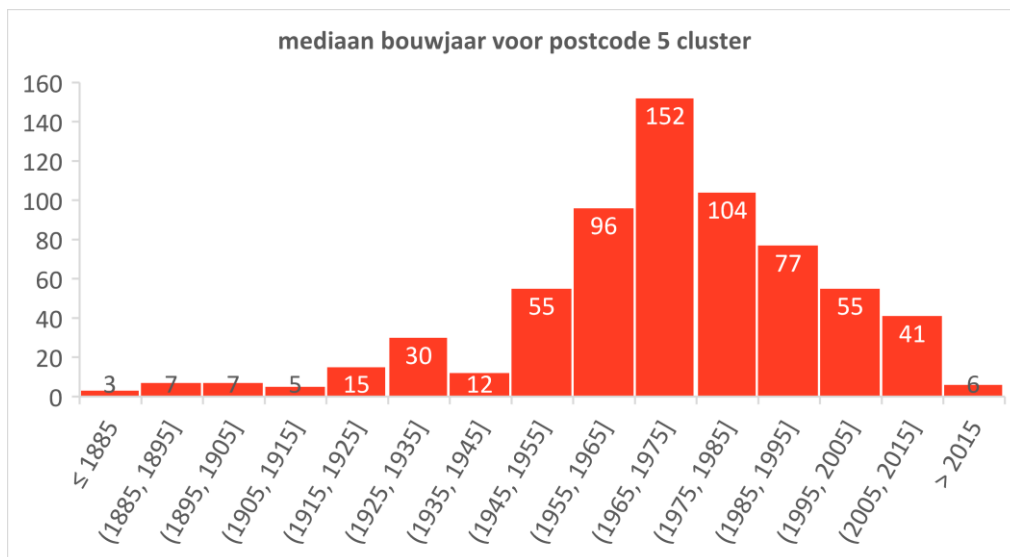
	Warmtenet	Wijknaam	Gas_verbruik (gebaseerd op gasvraag CBS) [m3/jaar]	Warmtevraag (gebaseerd op gasverbruik CBS) [GJ/jaar]	Ruimte- verwarming (82%) [GJ/jaar]	Tapwater- verwarming (18%) [GJ/jaar]
1	Oost	Benedenstad	2,190,870	69,348	56,598	12,750
2	Oost	Stadscentrum	7,569,200	239,588	195,538	44,050
3	Oost	Bottendaal	2,627,180	83,158	67,869	15,289
4	Oost	Galgenveld	3,841,490	121,595	99,239	22,356
5	Oost	Altrade	4,792,840	151,708	123,815	27,892
6	Oost	Hunnerberg	3,125,110	98,919	80,732	18,187
7	Oost	Hengstdal	3,125,230	98,923	80,735	18,188
8	Oost	Groenewoud	1,680,600	53,196	43,416	9,780
9	Midden_Noord	Biezen	4,533,900	143,512	117,126	26,386
10	Midden_Noord	Wolfskuil	3,207,560	101,529	82,862	18,667
11	Midden_Noord	Hees	2,468,440	78,134	63,768	14,365
12	Midden_Noord	Heseveld	4,338,090	137,314	112,068	25,246
13	Midden_Noord	Neerbosch-Oost	4,467,140	141,398	115,401	25,997
14	Midden_Noord	Haven- en industrieterrein	2,769,810	87,673	71,554	16,119
15	Midden_Zuid	Nije Veld	2,741,360	86,772	70,819	15,954
16	Midden_Zuid	Hazenkamp	4,679,250	148,112	120,881	27,231
17	Midden_Zuid	Goffert	6,667,580	211,049	172,246	38,803
18	Midden_Zuid	St. Anna	2,669,630	84,502	68,966	15,536
19	Midden_Zuid	Heijendaal	825,630	26,134	21,329	4,805
20	Midden_Zuid	Hatertse Hei	1,818,650	57,566	46,982	10,584
21	Midden_Zuid	Grootstal	4,930,120	156,053	127,362	28,691
22	Midden_Zuid	Hatert	9,326,120	295,200	240,925	54,274
23	Midden_Zuid	Brakkenstein	3,022,730	95,678	78,087	17,591
24	West	Tolhuis	2,459,120	77,839	63,527	14,311
25	West	Zwanenveld	2,954,580	93,521	76,327	17,195
26	West	Meijhorst	2,313,280	73,222	59,760	13,462
27	West	Lankforst	1,943,430	61,515	50,205	11,310
28	West	Aldenhof	2,301,150	72,838	59,447	13,392
29	West	Malvert	1,876,520	59,397	48,477	10,921
30	West	Weezenhof	3,203,080	101,387	82,746	18,641
31	West	't Acker	3,578,290	113,264	92,439	20,824
32	West	De Kamp	5,372,240	170,048	138,783	31,264
33	West	't Broek	2,376,460	75,222	61,392	13,830
34	West	Kerkenbos	2,160,710	68,393	55,818	12,574
35	West	Westkanaaldijk	961,700	30,441	24,844	5,597
		TOTAL	118,919,090	3,764,146	3,072,083	692,063

1.2 Energievraag per gebouw

Met de conversiefactor, en op basis van postcode 5 gegevens van het CBS kunnen de onderstaande gemiddelde warmtevragen per aansluiting voor het bestudeerde gebied in 2018 worden afgeleid:

- voor gebouwen (inclusief industrie en openbare gebouwen) 43,5 GJ/jaar/gebouw
- voor woningen 39,4 GJ/jaar

Typische ontwerpwaardes die voor bestaande bouw vaak wordt aangehouden is 45 GJ/jaar, en voor nieuwbouw 18 GJ/jaar (10 GJ voor tapwater verwarming en 8 GJ voor ruimteverwarming (Techniplan, n.d.). De hoge gemiddelde warmtevraag per woning van 39,4 GJ/jaar uit de CBS database kan worden verklaard door de opbouw van de woningvoorraad in Nijmegen. Figuur 22 laat zien dat de mediaan van het bouwjaar in de postcode 5 clusters verreweg het vaakst in de jaren 70 ligt. Op basis van deze verklaring is een ontwerpwaarde van 43,5 GJ/jaar/gebouw aangehouden voor het ontwerp van het warmtenet.



Figuur 22: Frequentie van voorkomen (mediaan) van woning met een specifiek bouwjaar voor alle 663 postcode 5 clusters in de vier stadsdelen van Nijmegen

1.3 Energievraag door het jaar

Dagelijkse ontwerp warmtevraag per aansluiting

Door middel van graaddagen kan er met de jaarlijkse warmtevraag een dagelijkse warmtevraag worden berekend. Het jaarlijks aantal graaddagen gebaseerd op metingen van het dichtstbijzijnde KNMI meetstation, Volkel, is 2687 dagen per jaar. Dit is lager dan het landelijk gemiddelde van 2800 graaddagen.

De jaarlijkse warmtevraag per aansluiting (43,5 GJ/jaar/gebouw) is omgezet naar een gemiddelde dagvraag gebaseerd op het aantal graaddagen:

$$Q_{day_average} (GJ/day) = \frac{Q_{year_house_average} (GJ/year)}{degree\ days\ (days/year)}$$

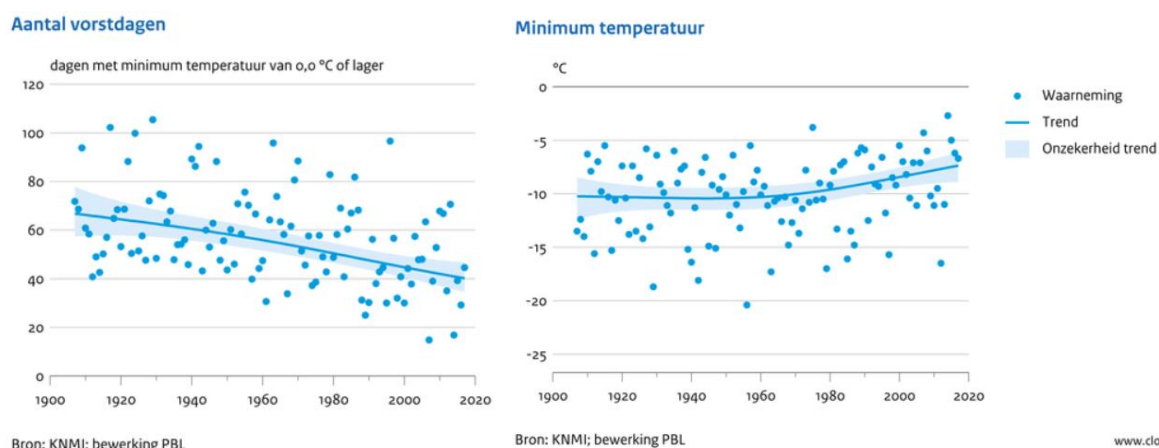
Vergelijking 8-1

Op basis van 2687 graaddagen is de resulterende gemiddelde warmtevraag voor Nijmegen 16.2 MJ/dag (of 4.5 kWh/dag).

Dit is de gemiddelde warmtevraag per dag. Voor het vaststellen van de benodigde capaciteit van het warmtenet is het noodzakelijk een inschatting te maken van de warmtevraag tijdens hele koude dagen. Een veel gebruikte ontwerptemperatuur voor warmtesystemen is -10 °C.

Figuur 23 laat een duidelijke trend zien van een lager aantal vorstdagen. Voor het ontwerp van het nieuw aan te leggen warmtenet in deze studie uitgegaan van een koude winterdag van -7 °C. Het totaal aantal graaddagen waar de capaciteit op ontworpen is, is $18 - (-7) = 25$ graaddagen.

De dagelijkse ontwerp warmtevraag van de afnemers is volgens onderstaande vergelijk 0,40 GJ/dag of 112 kWh.

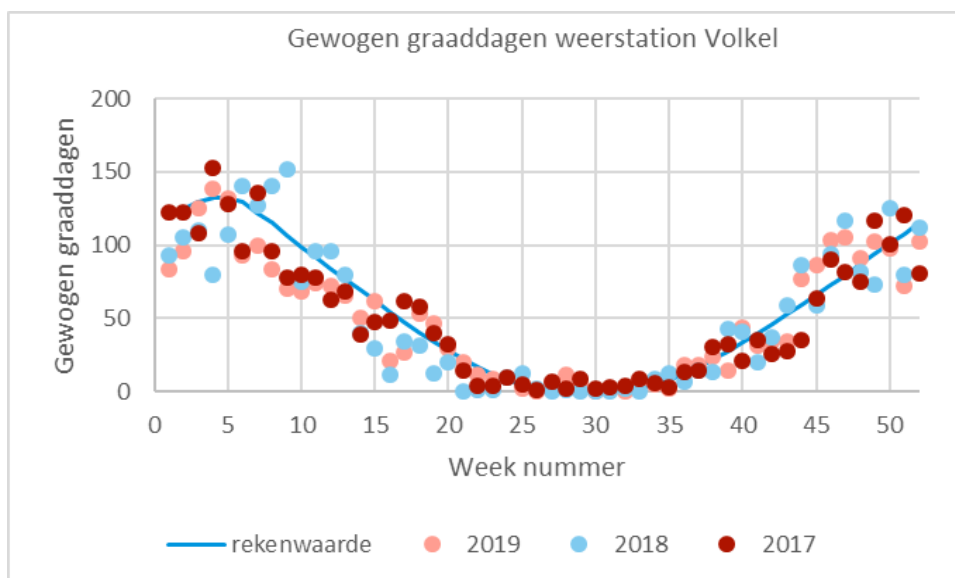


Figuur 23: Trend in vorstdagen en minimum temperatuur in Nederland

Graaddagen is een rekeneenheid die relatief is ten opzichte van een referentie temperatuur. De energie die nodig is om een huis te verwarmen is proportioneel aan het energieverval binnenshuis en buitenshuis. Dit kan grotendeels worden uitgedrukt in het temperatuurverschil tussen binnen en buiten. Voor het berekening van de warmtevraag wordt vaak uitgegaan van de typische temperatuur waarop er geen verwarming meer nodig is (18 °C) als referentie voor een graaddag. Het verschil van de gemiddelde dagtemperatuur t.o.v. 18 °C is gelijk aan het aantal graaddagen (bij een daggemiddelde temperatuur van 10 °C spreekt men van 8-graaddagen). Als de buitentemperatuur hoger is dan 18 °C telt dat als nul graaddagen.

Wekelijkse warmtevraag per wijk

Voor een inzicht in de benodigde en beschikbare seizoensopslag is een inschatting gemaakt van het verloop van de warmtevraag gedurende het jaar. De inschatting van het warmtevraagverloop is gerelateerd aan het aantal gewogen graaddagen per week in de afgelopen drie jaar, gemeten vanuit het weerstation Volkel (KWA, 2017, 2018, 2019). Op basis hiervan zijn de rekenwaardes vastgesteld, zie Figuur 24.



Figuur 24: Graaddagen over het jaar weerstation Volkel, 2017,2018,2019

1.4 Piekvraag

Om het benodigd vermogen van het net te bepalen is het noodzakelijk een piekvraag vast te stellen. De berekende dagelijkse warmtevraag houdt geen rekening met het dagelijks warmtevraagprofiel of met gelijktijdigheidsfactoren. Voor dit netwerk gaan we ervanuit dat de warmtevraag van 112 kWh plaats vindt over een periode van 12 uur. De piekvraag op een ontwerpdag van $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ is dan 9,4 kW per aansluiting, voor zowel ruimte- als tapwaterverwarming.

In een warmtenet zullen niet alle verbruikers gelijktijdig het maximaal vermogen vragen. Om hier rekening mee te houden is een gelijktijdigheidsfactor toegepast. Deze gelijktijdigheidsfactor drukt de verhouding uit van de gelijktijdige maximale belasting van alle verbruikers tot de som van hun individuele maximumbelastingen. Volgens ISSO (2012) kan er bij meer dan 205 aansluitingen uit worden gegaan van een gelijktijdigheidsfactor van 0,55, zie Tabel 8.1. Dit resulteert in een ontwerp piekvraag per aansluiting van $\sim 5,2\text{ kW}$.

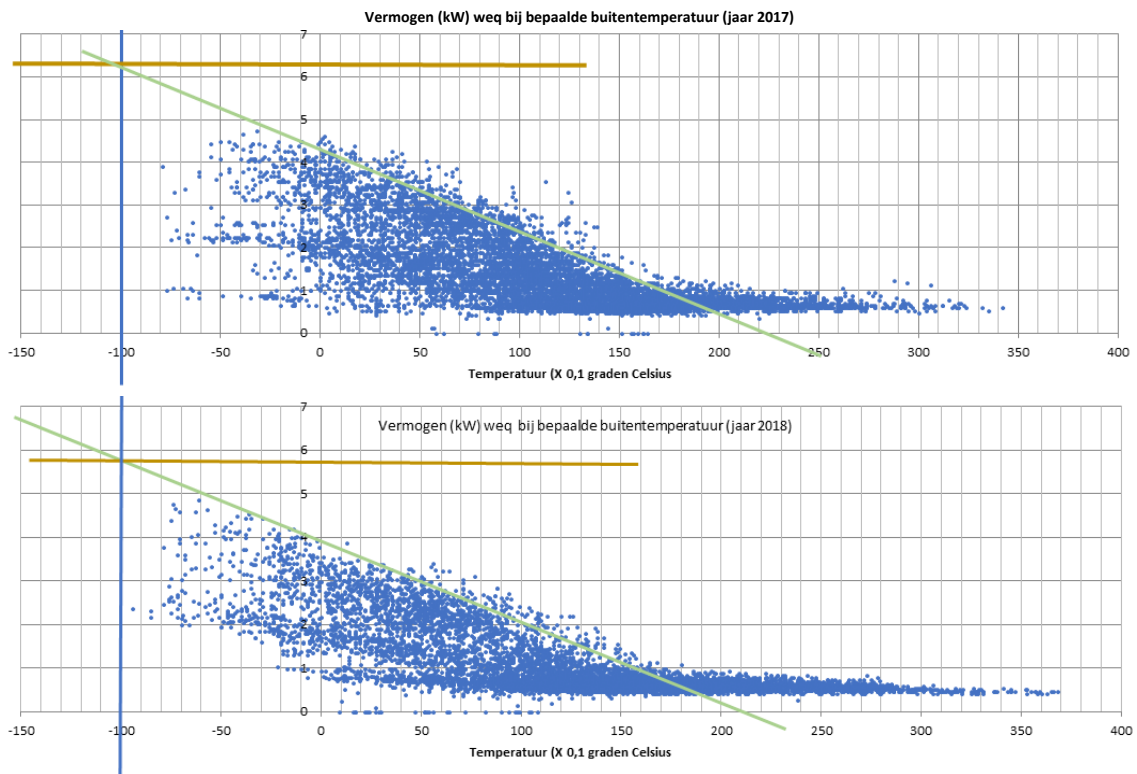
Tabel 8.1: Gelijktijdigheidsfactor als functie van aantal woningen (ISSO, 2017)

n	f
1-5	1.00
6-13	0.95
14-25	0.90
26-40	0.85
41-60	0.80
61-85	0.75
86-115	0.70
116-155	0.65
156-205	0.60
>205	0.55

Deze inschatting wordt onderschreven door een statistische analyse die Gemeente Nijmegen heeft gedaan op een deel van de Nijmeegse woningvoorraad met de jaarlijkse warmtevraag van 2017 en

2018. Figuur 25 laat zien dat het maximum gelijktijdig vermogen bij een buitentemperatuur van $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ in 2018 ook rond de 5,0 kW uitkomt.

Jaarbelastingduurkrommes van de warmtevraag laten zien dat de piekvraag van een warmtenet in de praktijk niet meer dan een aantal uren per jaar voor zal komen. Het aquathermie-systeem en het warmtetransport naar de wijkclusters zijn daarom in het schetsontwerp ontworpen op een basislast van 33 % van de pieklast.



Figuur 25: Maximaal gelijktijdig vermogen per huishouden voor verschillende buiten temperaturen voor de jaren 2017 en 2018 (Bron: Gemeente Nijmegen).

Peak-shaving

In de dagelijks belastingsduurkromme van een afnemer kunnen de ochtend- en avondpieken verkleind worden door “voorverwarming” van een gebouw. Het warmtenet kan dan op kleinere diameters gedimensioneerd worden: er zullen dan lagere aanlegkosten zijn. Echter, dit vereist medewerking van afnemers of actieve vraagsturing.

1.5 Warmteverlies

Om de benodigde diameters te bepalen van de leidingen is er naast de capaciteit voor de warmtevraag additionele capaciteit nodig die rekening houdt met de warmteverliezen. Warmteverliezen in de leidingen zijn afhankelijk van het oppervlak waarover warmte verloren kan gaan, dus de lengte en de diameter van de leiding, en het temperatuur verschil tussen het water in de leiding en de temperatuur buiten de leiding. Voor de berekening van de benodigde diameters is een inschatting gemaakt van de jaarlijkse verliezen. Het totale warmteverlies in het warmtenet over het hele jaar is geschat op 25 % (14,5 GJ/jaar) van het jaarlijks warmteverbruik. Als temperaturen als

constant worden aangenomen dan is het dagelijkse warmteverlies op het warmtenet 11,1 kWh. Ervan uitgaande dat de piek ongeveer een uur duurt zal er tijdens dat uur 0,46 kWh warmte verloren gaan. Het totaal benodigde piekvermogen is dan 5,6 kW/afnemer, en basisvermogen van 2.2 kW/afnemer.

Omdat warmteverliezen afhankelijk zijn van de diameters van de leidingen betreft het een inschatting.

Tabel 8.2: Resultaten berekeningen vereiste capaciteit

	Waarde per aansluiting
Jaarlijkse warmtevraag	43,5 GJ
Dagelijkse warmtevraag (op basis van ontwerpconditie -25 graaddagen met 2687 graaddagen per jaar)	112 kWh
Piekvraag (op basis van 12 uur gebruik)	9,0 kW
Gelijktijdig piekvermogen (op basis van gelijktijdigheid van 0.55)	5,2 kW
Piekvermogen netwerk (inclusief verlies van 0.46kW)	5,6 kW
Basisvermogen netwerk (inclusief verlies van 0.46kW)	2,2 kW

Bijlage 2 WKO opslagcapaciteit

2.1 Overzicht benodigde opslagcapaciteit per stadsdeel en per wijkcluster.

	Opslag [TJ/jaar]	Opslag [1000 m3/jaar]
Benedenstad	34	809
Stadscentrum	117	2,796
Bottendaal	41	970
Galgenveld	60	1,419
Altrade	74	1,770
Hunnerberg	48	1,154
Hengstdal	48	1,154
Groenewoud	26	621
Biezen	70	1,675
Wolfskuil	50	1,185
Hees	38	912
Heseveld	67	1,602
Neerbosch-Oost	69	1,650
Haven- en industrieterrein	43	1,023
Nije Veld	43	1,012
Hazenkamp	73	1,728
Goffert	103	2,463
St. Anna	41	986
Heijendaal	13	305
Hatertse Hei	28	672
Grootstal	76	1,821
Hatert	145	3,444
Brakkenstein	47	1,116
Tolhuis	38	908
Zwanenveld	46	1,091
Meijhorst	36	854
Lankforst	30	718
Aldenhof	36	850
Malvert	29	693
Weezenhof	50	1,183
't Acker	56	1,322
De Kamp	83	1,984
't Broek	37	878
Kerkenbos	34	798
Westkanaaldijk	15	355
Gemiddeld	53	1,255
Totaal	1,845	43,921

2.2 Overzicht van WKO bronnen per stadsdeel en wijkcluster

Stadsdelen	maximaal vermogen (ontwerp basislast) [MW]	debiet_injectie [1000 m3/dag]	aantal doubletten [#]	volume per doublet [1000 m3]
Net_Oost	32,7	87,5	59	173
Net_Midden_Noord	24,6	65,8	44	175
Net_Midden_Zuid	41,4	110,9	74	175
Net_West	35,6	95,2	64	174
TOTAAL	134	359	241	696

Wijken	debiet_inj [1000 m3/dag]	aantal doubletten [#]	volume per doublet [m3]
Benedenstad	6,6	5	154
Stadscentrum	22,9	16	167
Bottendaal	7,9	6	154
Galgenveld	11,6	8	169
Altrade	14,5	10	169
Hunnerberg	9,4	7	157
Hengstdal	9,4	7	157
Groenewoud	5,1	4	148
Biezen	13,7	10	160
Wolfskuil	9,7	7	162
Hees	7,5	5	174
Heseveld	13,1	9	170
Neerbosch-Oost	13,5	9	175
Haven- en industrieterrein	8,4	6	163
Nije Veld	8,3	6	161
Hazenkamp	14,1	10	165
Goffert	20,1	14	168
St. Anna	8,1	6	157
Heijendaal	2,5	2	146
Hatertse Hei	5,5	4	160
Grootstal	14,9	10	174
Hatert	28,2	19	173
Brakkenstein	9,1	7	152
Tolhuis	7,4	5	173
Zwanenveld	8,9	6	174
Meijhorst	7,0	5	163
Lankforst	5,9	4	171
Aldenhof	7,0	5	162
Malvert	5,7	4	165
Weezenhof	9,7	7	161
't Acker	10,8	8	158
De Kamp	16,2	11	172
't Broek	7,2	5	168
Kerkenbos	6,5	5	152
Westkanaaldijk	2,9	2	170
Gemiddeld	10	7	164
Totaal	359	254	5.726

Bijlage 3 Tracélengte voor de wijken

O.b.v. de verdeelsleutel 9 %, 41 %, 44 % en 6 % voor transport, distributie, aansluitleiding en overig respectievelijk.

	Aansluiting	overige	transport	distributie
	[m]	[m]	[m]	[m]
Benedenstad	10600	1400	2200	9900
Stadscentrum	23700	3200	4900	22100
Bottendaal	10500	1400	2200	9800
Galgenveld	18100	2500	3700	16900
Altrade	12900	1800	2600	12100
Hunnerberg	13200	1800	2700	12300
Hengstdal	15100	2100	3100	14100
Groenewoud	12000	1600	2500	11200
Biezen	21100	2900	4300	19600
Wolfskuil	15100	2100	3100	14000
Hees	12200	1700	2500	11400
Heseveld	19500	2700	4000	18100
Neerbosch-Oost	25600	3500	5200	23900
Haven- en industrieterrein	23700	3200	4900	22100
Nije Veld	14000	1900	2900	13000
Hazenkamp	14000	1900	2900	13000
Goffert	30300	4100	6200	28200
St. Anna	10500	1400	2100	9700
Heijendaal	23100	3200	4700	21600
Hatertse Hei	11900	1600	2400	11000
Grootstal	20500	2800	4200	19100
Hatert	28000	3800	5700	26100
Brakkenstein	15200	2100	3100	14200
Tolhuis	15100	2100	3100	14100
Zwanenveld	18200	2500	3700	16900
Meijhorst	10200	1400	2100	9500
Lankforst	9200	1300	1900	8600
Aldenhof	9900	1400	2000	9200
Malvert	10200	1400	2100	9500
Weezenhof	13200	1800	2700	12300
't Acker	26200	3600	5400	24400
De Kamp	22400	3100	4600	20900
't Broek	17500	2400	3600	16300
Kerkenbos	9700	1300	2000	9100
Westkanaaldijk	8000	1100	1600	7400

Bijlage 4 Beschikbare warmteleidingdiameters

Commerciële diameters voor SDR26 leidingen

Gebruikt voor het schetsontwerp van het tracé.



Polyethylene Pipe Dimensions

PE100	SDR26		SDR21		SDR17		SDR13.6		SDR11		SDR9		SDR7.4		PE100
	PN 6.3		PN 8		PN 10		PN 12.5		PN 16		PN 20		PN 25		
SIZE	MIN WALL	MEAN I.D.	MIN WALL	MEAN I.D.	MIN WALL	MEAN I.D.	MIN WALL	MEAN I.D.	MIN WALL	MEAN I.D.	MIN WALL	MEAN I.D.	MIN WALL	MEAN I.D.	SIZE
20	1.6	16.7	1.6	16.7	1.6	16.7	1.6	16.7	1.9	16.1	2.3	15.2	2.8	14.2	20
25	1.6	21.7	1.6	21.7	1.6	21.1	1.9	21.1	2.3	20.2	2.8	19.2	3.5	17.7	25
32	1.6	28.7	1.6	28.7	1.9	28.1	2.4	27.0	2.9	26.0	3.6	24.5	4.4	22.8	32
40	1.6	36.7	1.9	36.1	2.4	35.0	3.0	33.8	3.7	32.3	4.5	30.6	5.5	28.5	40
50	2.0	45.9	2.4	45.0	3.0	43.8	3.7	42.3	4.6	40.4	5.6	38.3	6.9	35.6	50
63	2.4	58.0	3.0	56.8	3.8	55.1	4.7	53.2	5.8	50.9	7.1	48.1	8.6	45.1	63
75	2.9	69.1	3.6	67.6	4.5	65.7	5.5	63.6	6.8	60.9	8.4	57.5	10.3	53.6	75
90	3.5	82.8	4.3	81.1	5.4	78.8	6.6	76.3	8.2	72.9	10.1	68.6	12.3	64.5	90
110	4.3	101.2	5.3	99.1	6.6	96.4	8.1	93.2	10.0	89.3	12.3	84.4	15.1	78.6	110
125	4.8	115.3	6.0	112.8	7.4	109.8	9.2	106.0	11.4	101.4	14.0	96.0	17.1	89.5	125
140	5.4	129.1	6.7	126.4	8.3	123.0	10.3	118.8	12.7	113.8	15.7	107.5	19.2	100.2	140
160	6.2	147.5	7.7	144.4	9.5	140.6	11.8	135.8	14.6	129.9	17.9	123.0	21.9	114.7	160
180	6.9	166.2	8.6	162.6	10.7	158.2	13.3	152.7	16.4	146.2	20.1	138.4	24.6	129.1	180
200	7.7	184.5	9.6	180.5	11.9	175.7	14.7	169.8	18.2	162.4	22.4	153.6	27.3	143.4	200
225	8.6	207.7	10.8	203.1	13.4	197.6	16.6	190.9	20.5	182.7	25.1	173.0	30.8	161.3	225
250	9.6	230.7	11.9	225.9	14.8	219.8	18.4	212.2	22.7	203.2	27.9	192.3	34.2	179.2	250
280	10.7	258.6	13.4	252.9	16.6	246.2	20.6	237.8	25.4	227.7	31.3	215.3	38.3	200.7	280
315	12.1	290.7	15.0	284.7	18.7	276.9	23.2	267.4	28.6	256.1	35.2	242.2	43.0	226.1	315
355	13.6	327.8	16.9	320.9	21.1	312.0	26.1	301.5	32.2	288.7	39.6	273.2	48.5	254.6	355
400	15.3	369.3	19.1	361.3	23.7	351.7	29.4	339.7	36.3	325.2	44.7	307.6	54.6	287.0	400
450	17.2	415.5	21.5	406.5	26.7	395.6	33.1	382.1	40.9	365.8	50.3	346.0	61.5	332.8	450
500	19.1	461.7	23.9	451.7	29.6	439.7	36.8	424.6	45.4	406.5	55.8	384.7	...	...	500
560	21.4	517.2	26.7	506.1	33.2	492.4	41.2	475.6	50.8	455.5	...	...	...	...	560
630	24.1	581.8	30.0	569.5	37.2	554.1	46.3	535.2	57.2	512.3	...	...	...	...	630
710	27.2	655.6	33.9	641.6	42.1	624.3	52.2	603.1	...	...	...	...	...	...	710
800	30.6	738.8	38.1	723.0	47.4	703.2	58.8	680.0	...	...	...	...	...	...	800
900	34.4	829.5	42.9	813.8	53.5	791.6	...	...	...	...	...	...	...	...	900
1000	38.2	923.0	47.7	904.2	59.3	879.8	...	...	...	...	...	...	...	...	1000

Bijlage 5 Leidingdiameters tot wijkclusters

Diameters in traject van innamepunt tot aan de wijkclusters. Gebaseerd op commercieel beschikbare leidingen gepresenteerd in Bijlage 4.

Variant 1 & Variant 3

DN SDR26	Diameters [m]			Tracé lengte [m]				
	Inner	Outer	Mantel	Midden- Zuid	West	Midden- Noord	Oost	Totaal
90	0.083	0.090	0.153	1252	0	0	0	1252
110	0.101	0.110	0.173	0	73	0	0	73
125	0.115	0.125	0.217	458	0	0	1309	1767
140	0.129	0.140	0.241	0	1799	311	23	2133
160	0.148	0.160	0.270	2728	2284	764	2023	7800
180	0.166	0.180	0.344	963	552	1109	647	3271
200	0.185	0.200	0.439	234	619	0	131	985
225	0.208	0.225	0.489	1285	205	689	44	2224
250	0.231	0.250	0.548	754	644	0	274	1673
280	0.259	0.280	0.617	1140	430	1018	1005	3593
315	0.291	0.315	0.697	364	1170	1820	37	3391
355	0.328	0.355	0.696	0	1084	705	1745	3534
400	0.369	0.400	0.696	2468	1799	0	0	4267

Variant 2

DN SDR 26	Diameters [m]			Tracé lengte [m]				
	Inner	Outer	Mantel	Midden- Zuid	West	Midden- Noord	Oost	Totaal
DN225	0,2078	0,225	0,489	1252	0	0	0	1252
DN250	0,2308	0,250	0,548	0	73	0	0	73
DN280	0,2586	0,280	0,617	0	0	0	1309	1309
DN315	0,2908	0,315	0,697	458	1799	0	23	2279
DN355	0,3278	0,355	0,696	2728	2284	1076	2023	8111
DN400	0,3694	0,400	0,696	385	552	15	425	1377
DN450	0,4156	0,450	0,696	578	619	1094	353	2645
DN500	0,4618	0,500	0,696	1520	205	0	44	1769
DN560	0,5172	0,560	0,696	754	644	689	274	2362
DN630	0,5818	0,630	0,786	576	613	1018	1005	3212
DN710	0,6556	0,710	0,886	564	988	1820	0	3372
DN800	0,7388	0,800	0,986	364	1084	705	1204	3357
DN900	0,8312	0,900	1,086	2468	1799	0	577	4844

Bijlage 6 Warmteverliezen in wijkclusters

names	Warmtevraag	warmteverlies	Warmteverlies
	[MWh/jaar]	[%/jaar]	[MWh/jaar]
Weurt Zuid	7486	2.570	197.506
Benedenstad	22140	11.436	2858.789
Stadscentrum	106174	8.386	9719.127
Bottendaal	22098	12.594	3184.107
Galgenveld	37533	14.092	6156.663
Altrade	31017	11.708	4112.848
Hunnerberg	27356	16.976	5593.380
Hengstdal	87290	8.591	8203.518
Groenewoud	22924	16.947	4677.625
Biezen	38636	12.944	5744.711
Wolfskuil	27011	14.189	4466.208
Hees	16451	17.197	3416.821
Heseveld	28690	15.822	5392.414
Neerbosch-Oost	32094	17.604	6856.972
Haven- en industrieterrein	59919	12.879	8858.013
Nije Veld	23989	14.491	4065.278
Hazenkamp	28793	13.251	4398.246
Goffert	43047	19.590	10487.602
St. Anna	20317	12.873	3001.978
Heijendaal	55163	12.713	8034.069
Hatertse Hei	18186	15.610	3363.807
Grootstal	22314	18.587	5094.485
Hatert	45081	15.051	7987.529
Brakkenstein	20088	21.052	5356.337
Tolhuis	13855	18.811	3210.158
Zwanenveld	20656	16.481	4076.204
Meijhorst	19181	13.583	3014.853
Lankforst	8996	17.979	1972.017
Aldenhof	10038	16.634	2002.964
Malvert	9249	17.682	1986.690
Weezenhof	16396	21.031	4366.568
't Acker	17843	24.538	5802.082
De Kamp	22593	18.065	4981.402
't Broek	11904	24.693	3903.190
Kerkenbos	8365	18.533	1902.854
Westkanaaldijk	13622	16.520	2695.774