



BTO 2015.001 | Februari 2015

BTO rapport

Terugwinnen energie uit
leidingen

BTO

Terugwinnen energie uit leidingen

BTO 2015.001 | Februari 2015

Opdrachtnummer

400554/049

Projectmanager

Kees Roest

Opdrachtgever

BTO - Thematisch onderzoek - Water en energie

Kwaliteitsborger

Frank Oesterholt

Auteurs

Martin Bloemendal, Andreas Moerman, Jan Hofman,
Mirjam Blokker, Claudia Agudelo-Vera

Verzonden aan

Dit rapport is selectief verspreid onder medewerkers
van BTO-participanten en is verder niet openbaar.

Jaar van publicatie
2015

Meer informatie

Ir. M. (Martin) Bloemendal
T +31 (0)30 6069 606
E martin.bloemendal@kwrwater.nl

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511
F +31 (0)30 60 61 165
E info@kwrwater.nl
I www.kwrwater.nl



BTO 2015.001 | Februari 2015 © KWR

Alle rechten voorbehouden.

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

Samenvatting

Aanleiding en aanpak

De mogelijkheden voor riothermie en het winnen van thermische energie uit drinkwater worden voorzichtig verkend door verschillende Nederlandse drinkwaterbedrijven en gemeenten. Op enkele plekken in Nederland worden ook al kleinschalige systemen aangelegd. De themagroep “water en energie” van het bedrijfstak onderzoek (BTO) van de Nederlandse drinkwaterbedrijven wil graag meer inzicht in de potentie en succesfactoren van riothermie en thermische energie uit drinkwater. Daarom is het BTO-project “Warmte – Koude uit Drinkwaterleidingen en Riolering” (WKDR) uitgevoerd.

In het kader van dit project is een casestudie in Almere uitgevoerd. Het doel van de casestudie is tweeledig:

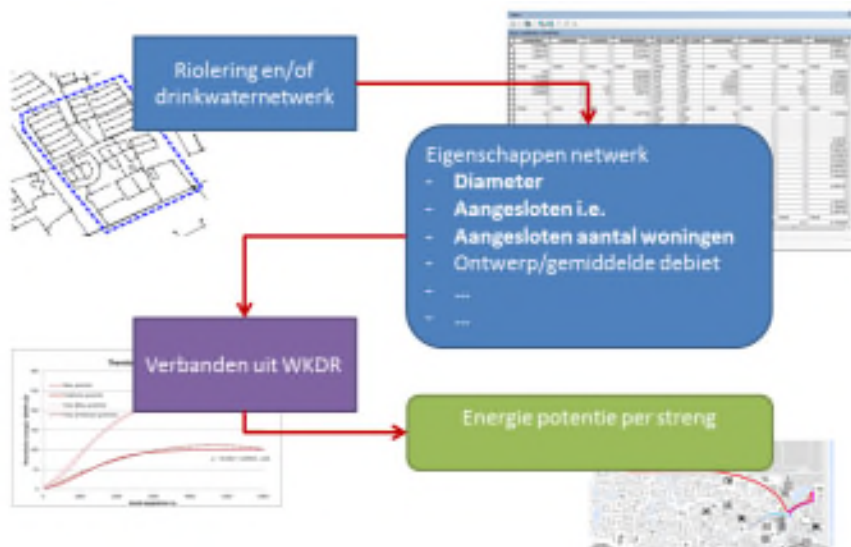
1. Het verkrijgen van inzicht in de variatie van de winbare thermische energie of beschikbare koelcapaciteit tijdens verschillende jaargetijden en op verschillende locaties in de stad
2. Het inventariseren van de mogelijkheden om een tool te ontwikkelen waarmee de variatie van de winbare thermische energie en beschikbare koelcapaciteit in de stad geografisch gevisualiseerd kan worden.

Modellering

Met behulp van modellen zijn simulaties voor drinkwaterleidingen en rioleringen op verschillende locaties in Almere uitgevoerd. Hierbij is het verloop van de temperatuur en de volumestroom berekend. Op basis van de uitkomsten van deze simulaties is de (bandbreedte van) potentieel winbare thermische energie berekend. Daarnaast is er een verband afgeleid tussen het potentieel te winnen vermogen of energie, de kenmerken van het drinkwater- of rioleringnetwerk (diameter, aangesloten inwonerequivalenten (i.e.) en het aantal aangesloten woningen).

Ontwikkeling geografische tool

De gevolgde methode voor de ontwikkeling van een geografische tool is weergegeven in onderstaande figuur. Eerst worden het netwerk en bijbehorende kenmerken geïmporteerd in het GIS. Vervolgens wordt op basis van vastgestelde relaties de potentie per streng berekend. Alle bewerkingen kunnen worden uitgevoerd voor zowel riool- als drinkwaterleidingen. De resultaten van de berekeningen zijn ten slotte gebruikt om relaties af te leiden, die beschrijven hoe het winbaar vermogen en de winbare energie afhangen van het aantal aangesloten inwonerequivalenten, het aantal aansluitingen en de leidingdiameter.



Conclusies

De winbare thermische energie uit drinkwater varieert minder dan voor rioolwater. Dichtbij de afnemers is de grootte van het vermogen en de hoeveelheid energie die kan worden gewonnen ongeveer even groot. Nabij een RWZI kan er echter veel minder energie worden gewonnen dan bij een reinwaterkelder. Door de waterkwaliteit is het praktisch gezien ook gemakkelijker om energie te winnen uit drinkwater, omdat de warmtewisselaars minder snel vervuilen. Microbiologisch gezien is er echter onzekerheid over de effecten voor de drinkwaterkwaliteit. Dit zorgt nog voor een beleidsmatige beperking ten aanzien van de toegestane temperatuurverandering van het water.

De potentie voor energiewinning met riothermie is erg locatieafhankelijk. In riolen met veel aansluitingen zit veel energie, waarvan maar een deel kan worden gewonnen. De resultaten laten heel duidelijk zien dat de ambitie om de thermische energie, die tijdens het gebruik aan het water wordt toegevoegd, weer terug te winnen, het beste zo dicht mogelijk bij de gebruiker kan worden gerealiseerd.

Inhoud

Samenvatting	2
Inhoud	4
1 Inleiding en Aanpak	6
1.1 Aanleiding en doel	6
1.2 Aanpak	6
1.3 Studiegebied	7
1.4 Leeswijzer	8
2 Aanpak van de modellering	9
2.1 Algemene uitgangspunten	9
2.2 Riolering	10
2.3 Drinkwatermodel	13
2.4 Analysewijze en beoordelingskader	15
3 Warmtewisselaars	18
3.1 Algemeen werkingsprincipe	18
4 Resultaten simulaties Almere	22
4.1 Inleiding	22
4.2 Potentieel winbare warmte in de riolering	22
4.3 Potentieel winbare thermische energie in drinkwaterleidingen	30
4.4 Synthese en discussie	40
5 Algemene methode GIS-kaart	46
5.1 Verbanden riolering	47
5.2 Verbanden Drinkwater	50
6 Conclusies en aanbevelingen	55
6.1 Conclusies	55
6.2 Aanbevelingen voor vervolg onderzoek	56
7 Literatuur	58
Bijlage I	59
• Aanvullende informatie bij modellering	59
Bijlage II	62
• Lozingen naar het riool	62
Bijlage III	65
• Bepalen aantal aansluitingen drinkwater	65

1 Inleiding en Aanpak

1.1 Aanleiding en doel

De mogelijkheden voor riothermie en het winnen van thermische energie uit drinkwater worden voorzichtig verkend door verschillende Nederlandse drinkwaterbedrijven en gemeenten. Op enkele plekken in Nederland worden ook al kleinschalige systemen aangelegd. De themagroep “water en energie” van het bedrijfstak onderzoek (BTO) van de Nederlandse drinkwaterbedrijven wil graag meer inzicht in de potentie en succesfactoren van riothermie en thermische energie uit drinkwater. Daarom is het BTO-project “Warmte – Koude uit Drinkwaterleidingen en Riolering” (WKDR) uitgevoerd.

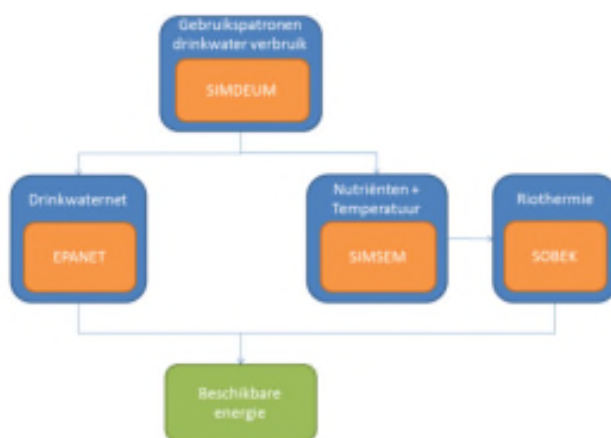
Een onderdeel van dit project vormde de casestudie in Almere. Het doel van de casestudie is tweeledig:

1. Het verkrijgen van inzicht in de variatie van de winbare thermische energie of beschikbare koelcapaciteit tijdens verschillende jaargetijden en op verschillende locaties in de stad
2. Het inventariseren van de mogelijkheden om een tool te ontwikkelen waarmee de variatie van de winbare thermische energie en beschikbare koelcapaciteit in de stad geografisch gevisualiseerd kan worden.

1.2 Aanpak

Inzicht in variatie en potentie

Om inzicht te verkrijgen in de omvang en variatie van de potentieel winbare thermische energie of de beschikbare koelcapaciteit is er een casestudie gedaan in Almere. Voor het onderzoeksgebied zijn het temperatuurverloop in de drinkwaterleiding en het temperatuurverloop in het rioolstelsel gemodelleerd op basis van drinkwaterverbruikpatronen. Deze laatste zijn gegenereerd met SIMDEUM® [Blokker, 2010]. In Figuur 1 is schematisch weergegeven welke instrumenten en datastromen voor welke stappen zijn gebruikt.



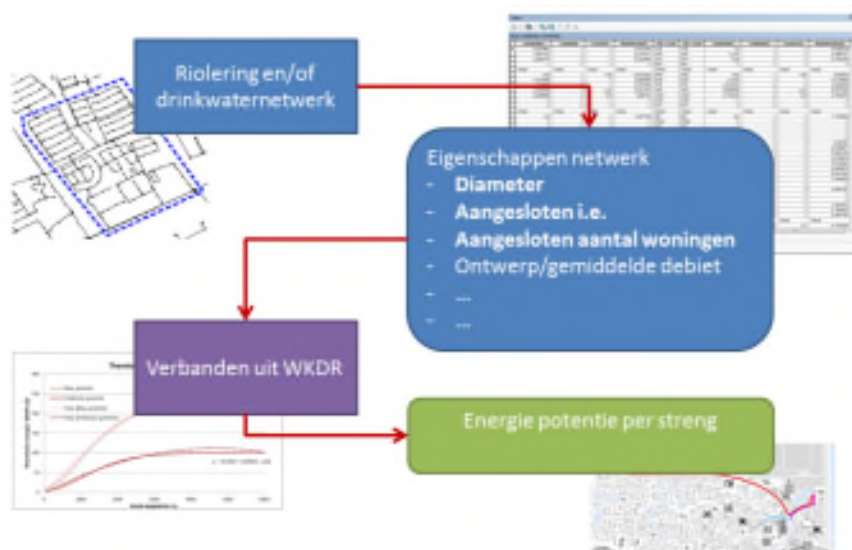
Figuur 1. Gebruikte modelinstrumenten en datastromen voor de berekening temperatuur in drinkwaterleidingen en riolen.

Op basis van het drinkwatermodel van Almere en de eerdere berekeningen die zijn uitgevoerd met dit model [Blokker, 2011], is het verloop van de drinkwatertemperatuur in het leidingnet bepaald. Verder zijn de afnamepatronen uit SIMDEUM opgelegd in het rioleringsmodel SIMSEM als lozingspatronen. Het verlies van water bij tappunten bijvoorbeeld voor besproeiing van de tuin is hierbij verwaarloosd.

Een belangrijke bepalende factor bij het winnen van thermische energie uit rioolwater is de rioolwaterwarmtewisselaar. De stand der techniek is apart in hoofdstuk 3 besproken.

Ontwikkeling geografische tool

Er is ook een methode/stappenplan ontwikkeld waarmee gemeenten en/of waterbedrijven o.b.v. hun eigen riool/water-model de potentie voor W/K-winning op een simpele manier in een GIS omgeving inzichtelijk kunnen maken. Het is lastig om het onderhavige dynamische proces te vangen in een statische kaart die recht doet aan de optredende variatie. De gevolgde methode voor de ontwikkeling van de geografische tool is weergegeven in Figuur 2. Eerst worden het netwerk en bijbehorende kenmerken geïmporteerd in het GIS. Vervolgens wordt op basis van vastgestelde relaties de potentie per streng berekend. Alle bewerkingen kunnen worden uitgevoerd voor zowel riool- als drinkwaterleidingen. De resultaten van de berekeningen zijn ten slotte gebruikt om relaties af te leiden, die beschrijven hoe het winbaar vermogen en de winbare energie afhangen van het aantal aangesloten inwonerequivalenten, het aantal aansluitingen en de leidingdiameter.



Figuur 2. De ontwikkeling van een grafische tool om de winbare thermische energie in drinkwater en rioleringen inzichtelijk te maken

1.3 Studiegebied

De casestudie richt zich op Almere als studiegebied. Gezien de eerdere studies van KWR aan de temperatuur in het drinkwaterleidingnet was Almere een voor de hand liggende keuze. De gemeente Almere en Vitens hebben het rioleringsmodel en het drinkwaterleidingmodel hiervoor ter beschikking gesteld. De casestudie is opgeknipt in twee delen, elk met een ander schaalniveau om de variatie in mogelijkheden en dynamiek goed in beeld te krijgen.

1. Er is gekeken naar een kleine wijk, de Danswijk. Deze wijk ligt ver van de reinwaterkelder en bovenstrooms in het rioleringsstelsel. In de eerdere studies over

het temperatuurverloop in drinkwaterleidingen is deze wijk ook gebruikt, maar het is verder een willekeurige keuze.

2. Daarnaast is ook Almere-Buiten bestudeerd. Almere-Buiten ligt vlakbij de RWZI en vlakbij de reinwaterkelder. In die wijk treden daarom grotere volumestromen op in zowel de drinkwaterleidingen als in het riool.

Almere heeft samen met het waterschap en de andere gemeenten in Flevoland al een riothermiekansenkaart laten maken door Tauw. Dit was een studie op een relatief hoog abstractieniveau met als voornaamste vereenvoudiging, dat is uitgegaan van een constante afvalwaterstroom. In dit project gebruiken we het drinkwaterafnamepatroon als input voor het bepalen van het temperatuurverloop in de drinkwaterleidingen en de riolen. Dat moet een genuanceerder beeld geven van de mogelijkheden tot het winnen van thermische energie uit leidingen. Omdat Tauw alleen keek naar de hooftriolen hebben zij geen uitspraak gedaan over de haalbaarheid van riothermie “in de wijk”. De studie van Tauw concludeert dat hoe verder benedenstrooms je gaat er steeds meer potentie is, en dat de praktische toepassing afhankelijk is van een nabijgelegen afnemer.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 is beschreven hoe de modellering is aangepakt, het beoordelingskader is vastgesteld en worden de belangrijkste uitgangspunten toegelicht. In hoofdstuk 3 is een beknopte toelichting gegeven over de werking van warmtewisselaars en hoe daarmee wordt omgegaan in de modellering. Vervolgens worden in hoofdstuk 4 de resultaten van de modellering gepresenteerd en besproken. In hoofdstuk 5 wordt de vertaalslag gemaakt naar de toepassing van de uitkomsten van de modellering om in andere steden inzichtelijk te maken waar locaties met potentie voor thermische energiewinning zijn en met welke omvang. Tot besluit volgen in hoofdstuk 6 de conclusies en aanbevelingen.

2 Aanpak van de modellering

2.1 Algemene uitgangspunten

2.1.1 Vaststellen potentieel winbare thermische energie

Hoeveel thermische energie er in een bepaalde waterstroom zit, is afhankelijk van de gebruikte referentietemperatuur en het debiet van de waterstroom. Uitwisseling van thermische energie wordt doorgaans gedaan met een warmtewisselaar, vaak ook aangeduid met de term tegenstroomapparaat (TSA).

De mate waarin thermische energie kan worden gewonnen uit rioolwater of drinkwater hangt af van verschillende factoren, zoals de thermische overdracht tussen het water en de TSA-wand, en tussen TSA-wand en medium in de TSA. Omdat dit een algemene studie is, zijn de exacte eigenschappen van de warmtewisselaar niet bekend en daarom niet meegenomen in de berekeningen. De winbare thermische energie wordt inzichtelijk gemaakt op basis van de eigenschappen van het drinkwater of afvalwater in de leiding. Deze beïnvloeden de warmteoverdracht tussen het riool- of drinkwater en TSA-materiaal. Bij het bepalen van de potentie wordt daarom uitgegaan van één van de volgende situaties:

1. *Potentieel winbare energie*

De potentieel winbare energie wordt in deze situatie bepaald door het functioneren van de toegepaste warmtewisselaar. Met hoeveel graden kan de TSA de betreffende waterstroom opwarmen of afkoelen? Het betreffende temperatuurverschil vormt dan samen met de volumestroom de maat voor het potentieel winbare vermogen.

2. *Temperatuur traject LTV/HTK*

In de praktijk wordt de potentie bepaald op basis van een (maximale) gewenst temperatuurverschil. Dus de vrager van koeling of verwarming biedt een volumestroom met een bepaalde temperatuur aan die moet worden opgewarmd of afgekoeld naar een gewenste andere temperatuur. Hierbij wordt uitgegaan van een lage temperatuur verwarming (LTV) of een hoge temperatuur koeling (HTK). Een typisch temperatuurtraject daarbij is 5–15°C. Dit traject sluit ook goed aan bij eventuele toepassing van een WKO-systeem.

Zie paragraaf 2.4 voor nadere uitwerking hiervan in het beoordelingskader.

2.1.2 Randvoorwaarden bodemtemperatuur

Op basis van bodemtemperatuurmeting, die zijn uitgevoerd door het KNMI in de Bilt, is de temperatuur van de bodem ter plaatse van de rioolbuizen in de Danswijk afgeleid. De rioolbuizen liggen ongeveer 2 m beneden maaiveld (-mv). Er is daarbij uitgegaan van drie verschillende situaties:

- tussenseizoen: gemiddelde temperatuur van de bodem.
maanden: april tot en met juni en oktober tot en met december
- winterperiode: koude bodem
maanden: januari tot en met maart
- zomerperiode: warme bodem
maanden: juli tot en met september

De maandgemiddelde temperatuur is berekend op basis van eens per 6 uur gemeten waarden op 1 m-mv. De metingen van het KNMI zijn in een ongestoorde situatie buiten stedelijk gebied gedaan. Voor de bodemtemperatuur in Almere is daarom rekening gehouden met het “urban heat island” (UHI) effect, de aanwezige bestrating en de gewijzigde bodemsamenstelling. De grootte van dit effect op 1 m-mv is afhankelijk van de bebouwingsdichtheid en het klimaat, en varieert tussen de 1 en 5 °C [MMB, 2012]. Er zijn geen richtlijnen of referentietabellen voor het doorvertalen van algemene UHI-cijfers naar willekeurige andere steden. Aangezien Almere een relatief grote stad is maar niet zo dicht bebouwd en met veel groen, is voor leidinginfrastructuur in Almere is uitgegaan van een UHI effect van 2°C, tussen het gemiddelde en de onder waarde in. De gehanteerde bodemtemperaturen voor de simulaties zijn weergegeven in Tabel 1

TABEL 1 GEHANTEERDE ACHTERGRONDTEMPERATUUR IN DE BODEM(°C)

Maand	T 1 m-mv De Bilt	T 1 m-mv Almere	rekenwaarde
1	5,9	7,9	8
2	5,3	7,3	
3	6,5	8,5	
4	8,4	10,4	
5	10,9	12,9	13
6	13,5	15,5	
7	15,4	17,4	18
8	16,6	18,6	
9	15,8	17,8	
10	13,8	15,8	13
11	11	13	
12	8	10	

2.2 Riolering

2.2.1 Warmte uit het riool

Rioolwater bevat nog relatief veel warmte, afkomstig van warmwaterlozingen door huishoudens en industrie. Tijdens het transport door het riool wordt de aanwezige warmte afgegeven aan de omgeving. In 2012-2014 is door KWR een conceptueel model ontwikkeld waarmee de warmtebalans van een rioolstelsel kan worden berekend [Hofman *et al.*, 2014]. Dit model is door Deltares in de bestaande rioleringssoftware (SOBEK) geïmplementeerd. Als input voor dit model zijn de lozingspatronen vanuit SIMDEUM™ en SIMSEM gebruikt. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen doordeweekse en weekenddagen én verschillende perioden in het jaar. Dat geeft vervolgens inzicht in waar en wanneer in het rioolstelsel thermische energie kan worden gewonnen of koelcapaciteit beschikbaar is.

De warmteoverdracht tussen water en het materiaal van de warmtewisselaar is afhankelijk van verschillende parameters [Hofman *et al.*, 2014]. De parameters van het rioolwater die de potentie van warmtewinning bepalen zijn de temperatuur van het rioolwater en de stroomsnelheid.

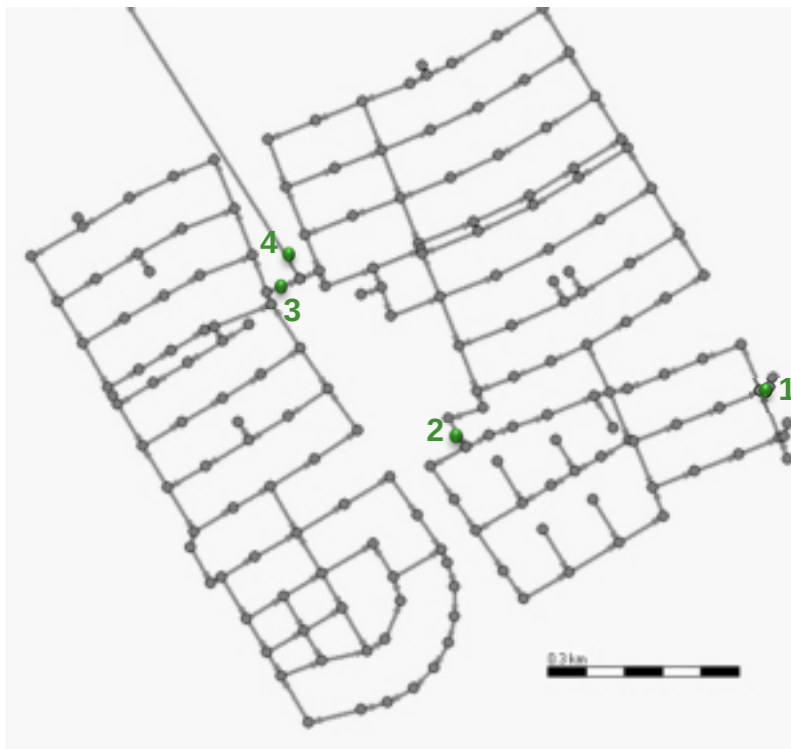
- **Temperatuur.** De grootte van het temperatuurverschil tussen rioolwater en medium in de warmtewisselaar heeft invloed op de overdracht, hoe groter de gradiënt hoe groter de overdracht. Bij een hoge rioolwatertemperatuur, ontstaat er een grotere gradiënt tussen het medium in de warmtewisselaar en het rioolwater, wat de warmteoverdracht bevordert.

- *Stroomsnelheid.* De warmteoverdrachtscoëfficiënt van het rioolwater naar de wand van de wisselaar is afhankelijk van de turbulentie van het water, welke weer in grote mate afhankelijk is van de stroomsnelheid. Hoge stroomsnelheid geeft een hogere overdrachtscoëfficiënt. Hoge stroomsnelheid treedt op bij een grote volumestroom afvalwater.

2.2.2 Modelbeschrijving Danswijk

Het rioleringsmodel van Danswijk en Almere-Buiten is door de gemeente Almere beschikbaar gesteld. Ten aanzien van de hydraulische eigenschappen van het riool zijn er geen aanpassingen gedaan aan het model of kalibraties op het model toegepast. De lozing van de huishoudens op het riool is opgegeven in tijdstappen van 5 minuten. Ook de berekeningen van SOBEK zijn uitgevoerd met een tijdstap van 5 minuten.

Het model van de Danswijk is opgebouwd uit 171 knopen waarop in totaal 6001 inwonerequivalenten zijn aangesloten. Het aantal inwonerequivalenten per knoop varieert tussen 3 en 96. Er zijn 214 strengen die de knopen met elkaar verbinden en het afvalwater onder vrij verval afvoeren naar een verzamelleiding en vervolgens naar een gemaal. Alle buizen zijn van PVC en hebben een diameter van 250 mm, m.u.v. de drie benedenstroomse verzamelleidingen, die zijn 315 mm. In Figuur 3 is een overzicht van de modelschematisatie weergegeven.



Figuur 3. De knopen en strengen van het SOBEK model van de Danswijk.

2.2.2.1 Evaluatie op vier locaties in de Danswijk

Om inzicht te krijgen in het verloop van de potentieel winbare warmte over de dag in relatie tot het aantal inwonerequivalenten is het verloop van de temperatuur en de volumestroom op vier verschillende rioleringsstrengen in de wijk geanalyseerd, zie Figuur 3.

1. Een bovenstroomse streng met twee knopen waarop 50 inwonerequivalenten zijn aangesloten.
2. Een streng waar circa 500 inwonerequivalenten op zijn aangesloten.
3. Een streng waar circa 2.500 inwonerequivalenten op zijn aangesloten.
4. En een streng waarop de hele wijk (6.000 inwonerequivalenten) is aangesloten.

Ten aanzien van de belasting op het riool is uitgegaan van twee verschillende situaties: week- en weekenddagen. Er zijn afzonderlijke analyses uitgevoerd op basis van het verwachte lozingspatroon gedurende vijf weekdays en twee weekenddagen. De volumestroom en temperatuur van het afvalwater zijn vastgesteld met SIMDEUM en SIMSEM. Dit is toegelicht in Bijlage II.

2.2.2.2 Evaluatie op twee locaties in hoofdriool

Het gescheiden stelsel van Almere is zodanig opgebouwd dat er op wijkniveau afvalwater wordt ingezameld en getransporteerd met een vrij verval riool, zoals ook is gemodelleerd voor de Danswijk. Na de Danswijk is er een persleiding die het rioolwater naar de RWZI transporteert. Omdat er van de rioolpersleidingen geen model beschikbaar was, is er voor het bepalen van de potentie van riothermie voor grotere riolen een vereenvoudigde verkenning uitgevoerd. Hierbij is de gemodelleerde temperatuur van het afvalwater uit de Danswijk uit het SOBEK-model als input gebruikt. De volumestroom is lineair geschaald naar het aantal i.e. dat in deze fase is beschouwd: 24.000 en 36.000 (resp. (virtuele) locatie 5 en 6). Er is een stuk rioolbuis gemodelleerd van 500m, met een warmtewisselaar helemaal rondom de buis.

Voor locatie 6 zijn 2 varianten doorgerekend:

- 6_1 de invoertemperatuur is de uitvoertemperatuur uit het SOBEK-model.
- 6_2 de invoertemperatuur is de uitvoertemperatuur uit locatie 5. Hierin zit dus het effect van energiewinning bovenstrooms.

2.2.2.3 Parametermeterwaarden temperatuuroverdracht

Het maaiveld van de Danswijk ligt op circa NAP -4 m. De rioolbuizen zijn van PVC en liggen op een diepte van circa NAP -5 m bovenstrooms en NAP -6 m benedenstrooms. De ondiepe bodem bestaat in Almere uit klei [TNO, 2013], het is echter de verwachting dat de rioleringsbuizen in het zandbed van het wegcunet liggen. De grondwaterstand in de Danswijk is NAP -4,5 / -5 m, de buizen liggen dus onder de grondwaterspiegel. Op basis van bovenstaande gegevens zijn de parameterwaarden zoals weergegeven in Tabel 2 toegepast in het model. Deze parameterwaarden zijn vastgesteld op basis van een combinatie van een eerder uitgevoerde modelkalibratie op basis van temperatuurmetingen in het riool van Amsterdam, literatuurwaarden en eigen expertise.

De warmte-uitwisseling tussen rioolwater en rioolbuis is ook afhankelijk van de vervuiling die ontstaat door het afvalwater. Door het aangroeien van biofilm wordt de thermische overdracht beïnvloed. De thermische geleidbaarheid van biofilm is echter een factor vijf groter dan die van het PVC waar de rioolbuis van is gemaakt [Buckman, 2010]. Aangezien zo'n biofilm ook erg dun is, is het effect ervan op de energieuitwisseling tussen rioolwater en rioolbuis in deze verkenning verwaarloosd. Enkele verkennende berekeningen met een gemodelleerde biofilm rechtvaardigendat. Als er een metalen warmtewisselaar met een stuk betere geleiding dan de kunststof rioolbuis wordt toegepast, heeft de biofilm wel significant effect op de warmteoverdracht, in dergelijke gevallen moet de vervuiling wel worden opgenomen in het model.

TABEL 2. PARAMETERWAARDEN SOBEK MODEL

naam	waarde	eenheid	beschrijving
AlfaRW_U	-	W/m ² /K	Buis naar water warmteoverdracht coëfficiënt (berekend door Sobek)
CP	4183	J/kg/K	Warmtecapaciteit van water
CPPipe	900	J/kg/K	Warmtecapaciteit van buismateriaal (PVC)
CPSoil	1500	J/kg/K	Warmtecapaciteit bodem (nat)
LambPipe	0.1	W/m ² /K	Thermische geleidbaarheid buismateriaal (PVC)
LambSoil	1	W/m ² /K	Thermische geleidbaarheid bodem (nat)
RhoPipe	1400	Kg/m ³	Dichtheid buismateriaal (PVC)
RhoSoil	2190	Kg/m ³	Dichtheid bodem (nat)
RhoWater	1000	Kg/m ³	Dichtheid van het water
SoilThick	1.5	m	Dikte van de bodemlaag in het model

2.2.2.4 Gevoeligheidsanalyse en verantwoording

De thermodynamische eigenschappen van het water en de pijp zijn beschikbaar in de literatuur en goed vast te stellen op basis van meetgegevens en/of modellering. Daarnaast is uit een gevoeligheidsanalyse gebleken dat ze beperkte invloed op de berekende temperatuur van het rioolwater hebben.

De belangrijkste en tevens meest onzekere parameters zijn die voor de thermodynamische eigenschappen van de bodem. Voor één locatie in Amsterdam zijn temperatuurmetingen gedaan in de bodem en in het rioolwater. Op basis van de kalibratie en een gevoeligheidsanalyse van dat model bleek dat de meest belangrijke parameter voor de berekende rioolwatertemperatuur de dikte van de gemodelleerde bodemlaag is [Hofman *et al.*, 2014]. Deze moet minimaal één meter zijn. De rand van het model heeft een constante temperatuur; de natuurlijke temperatuur van de bodem. Als deze rand te dicht bij de rioolpijp ligt, beïnvloedt de temperatuur op die rand de thermische overdracht en de temperatuur van de bodem rondom de pijp te sterk. De gemodelleerde temperatuur in de bodem komt dan niet overeen met de werkelijke/gemeten temperatuur. Dus bij een te dunne bodemlaag kan de randvoorwaarde van de bodemtemperatuur daarmee te veel invloed op de rioolwatertemperatuur hebben.

De verschillende parameters van de bodem hebben beperkte invloed op het temperatuurverloop in het rioolwater. De rioolwatertemperatuur wordt vooral bepaald door de temperatuur van het aanvoerwater en een beetje door de temperatuur van de buiswand. Om de temperatuurmetingen in de bodem goed te kunnen staven zijn de bodemeigenschappen dus wel van belang.

2.3 Drinkwatermodel

2.3.1 Warmte en koelcapaciteit in drinkwatersystemen

Warmteonttrekking of koelcapaciteit kan worden geleverd door het aanleggen van een warmtewisselaar in een transportleiding of reinwaterkelder (RWK). Er bestaan nog geen richtlijnen of normen waaraan een warmte-onttrekking of lozing moet voldoen. In geen geval mag de temperatuur van het drinkwater de wettelijke norm van 25 °C overschrijden. Het effect van een warmtewisselaar in een leiding of RWK wordt door warmte-uitwisseling met de bodem weer vereffend [Blokker, 2011]. De mate waarin dit plaatsvindt, is afhankelijk van de lokale omstandigheden zoals temperatuurverandering van het drinkwater, leidingmateriaal, bodemtemperatuur en stroomsnelheid. De warmtebalans in het drinkwaternet kan worden

berekend met EPANET MSX. Dit is toegepast voor een eerdere studie in Almere [Blokker, 2011], waar het effect van het afkoelen van drinkwater op de temperatuur van het drinkwater bij de afnemer in de RWK is gemodelleerd.

2.3.2 Modelbeschrijving en randvoorwaarden

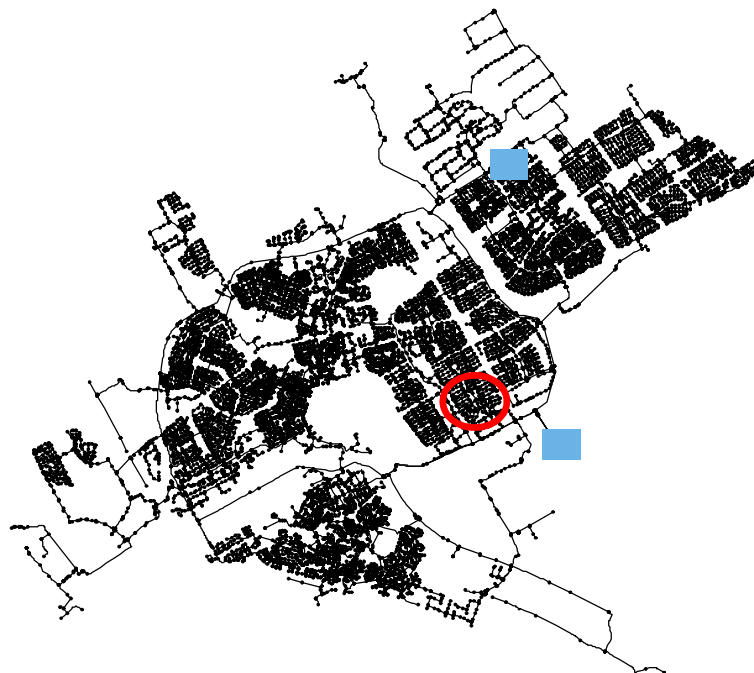
2.3.2.1 Hydraulisch model

Het hydraulisch model van het drinkwaterleidingnet in Almere is eerder verkregen van Vitens en in een aantal projecten toegepast. Om op elk niveau in het leidingnet zoveel mogelijk realistische stromingscondities te genereren zijn SIMDEUM-patronen toegevoegd om de verbruiken in het model te benaderen. In Figuur 4 is het hydraulisch model van Almere weergegeven. De rode cirkel markeert de locatie van de Danswijk. De blokken geven de locaties van de pompstations weer. De drukken ter plaatse van de pompstations bedragen 300 kPa (3 mWk). Omdat het maaiveld ter plaatse van de pompstations op een hoogte van -3 m boven NAP ligt zijn de absolute energiehoogten hier gelijk aan 600 kPa of 6 mWk.

De temperaturen van het drinkwater in de reinwaterkelders zijn eerder opgegeven door Vitens [Blokker, 2011]. Beide zijn weergegeven in Tabel 3.

TABEL 3. GEBUIKTE BODEMTEMPERATUREN EN TEMPERATUREN DRINKWATER AF POMPSTATION.

Seizoen	Temperatuur drinkwater af pompstation
Winter	10
Voor/najaar	12,5
Zomer	15



Figuur 4. Drinkwaterinfrastructuur Almere. Rode cirkel: Danswijk, blauwe blokken:

pompstations

2.4 Analysewijze en beoordelingskader

De totale potentie van winbare energie wordt bepaald door de combinatie van volumestroom en temperatuur van het water. Het potentiële (absoluut) te winnen vermogen wordt berekend met vergelijking 1.

$$P = \rho c_p Q |T - T_{grens}| \quad \text{Vergelijking 1}$$

P	=	vermogen [W]
Q	=	volumestroom [m ³ /s]
c _p	=	specifieke warmte water [J/(kg.K)]
ρ	=	dichtheid van water [kg/m ³]
T	=	temperatuur drinkwater [°C]
T _{grens}	=	maximum temperatuur bij winnen koude en minimumtemperatuur bij winnen warmte [°C]

In deze casestudie wordt de variatie van de potentieel winbare energie vooral bepaald door de variaties van de volumestroom. De temperatuur in een riool bij droogweerafvoer¹ en in een drinkwaterleiding variëren niet zo sterk. Het is echter niet realistisch om er vanuit te gaan dat alle energie uit het rioolwater kan worden gewonnen. Hogere stroomsnelheid leidt tot een betere overdracht, dus de winbare capaciteit is op dat moment groter. Echter door het hogere debiet is er ook relatief minder contact tijd tussen water en warmtewisselaar (TSA)². Daardoor stroomt er ook een groter deel van de potentiële energie weg, zonder gewonnen te (kunnen) worden. Er wordt daarom onderscheid gemaakt tussen twee verschillende methoden waarmee de potentieel winbare energie wordt berekend.

2.4.1 Potentieel winbare energie

De winbare hoeveelheid energie op basis van huidige toepassing van een TSA wordt omschreven als potentieel winbare energie ('P1' in figuren).

- a) Er zijn verschillende typen TSA's voor het winnen van warmte uit leidingen zoals riolen (zie hoofdstuk 5). Omdat in dit onderzoek inzicht in de potentiële thermische energie in het rioolwater gewenst is, wordt hier uitgegaan van een TSA die in/op de bodem van de rioolbuis wordt geïntegreerd en dus voornamelijk uitwisseling heeft met het rioolwater. Er is nog weinig bekend over de effecten van TSA's in het riool op de rioolwatertemperatuur. Deze TSA's zijn ook nog weinig toegepast in Nederland. In de praktijk blijkt de temperatuurverlaging van het rioolwater vaak niet meer dan 1°C te bedragen [Tauw, 2013]. Omdat rioolwaterzuiveringen warmte nodig hebben, stellen beheerders van rioolwaterzuiveringsinstallaties in de huidige praktijk als eis dat het rioolwater met niet meer dan 1°C mag afkoelen bij toepassing van een rioolwarmtewisselaar. De te winnen hoeveelheid energie uit het rioolwater zorgt dus voor een temperatuurverlaging van het rioolwater van maximaal 1°C. Verder is er uitgegaan van een TSA die ontworpen is op de gemiddelde volumestroom. De warmteoverdracht is niet lineair afhankelijk van de volumestroom. Als de volumestroom en daarmee de stroomsnelheid toenemen wordt de overdrachtscoëfficiënt groter. Maar omdat de ratio volumestroom/contactoppervlak

¹ De temperatuur van rioolwater in een DWA-riool varieert tussen de 15 en 30°C

² Een ander woord voor warmtewisselaar is tegenstroomapparaat, vaak afgekort tot 'TSA'

met TSA verslechterd, neemt de temperatuurverandering van het rioolwater af. Dus bij een stroomsnelheid boven de ontwerpsnelheid stijgt de overdracht niet automatisch mee. Daarom is de gehanteerde ΔT (gebouwszijde van de TSA per tijdstap) geschaald op basis van de ΔT bij het ontwerp debiet, zodat bij afvoeren hoger dan ontwerp een grotere ΔT heeft en een kleinere bij een lagere afvoeren ('P1a' in figuren)

- b) Bij het winnen van thermische energie uit drinkwater luistert het type TSA minder nauw, omdat vervuilingaspecten daar een geringe rol spelen. De TSA voor drinkwater kan daarom een efficiënte platenwisselaar zijn. Bij het berekenen van P1 gelden als enige randvoorwaarden een wettelijke bovengrens van 25°C en een praktische ondergrens van 1°C. Hierbij wordt verondersteld dat de TSA en de tegenstroom zo ontworpen kunnen worden dat het drinkwater de TSA verlaat met 25°C bij verwarmen en 1°C bij koelen. ('P1b' in figuren)

Ook in deze analyse is de invloed van het debiet op de winbare hoeveelheid energie geschaald ten opzichte van het gemiddelde debiet.

2.4.2 Winbaar bij toepassing duurzame koeling/verwarming

De hoeveelheid energie die uit het water wordt onttrokken als energiewinning wordt toegepast voor een LTV/HTK duurzaam energiesysteem wordt omschreven als winbare energie bij toepassing duurzame koeling/verwarming ('P2' in figuren).

- a) De potentieel winbare energie in het riool kan ook worden berekend door een fictieve TSA in het betreffende rioolsegment te modelleren in SOBEK. Dat kan door de eigenschappen van het betreffende stuk rioolbuis zodanig aan te passen dat de rioolbuis de eigenschappen van een TSA krijgt. Het verschil tussen de rioolwatertemperatuur in de simulatie met en zonder rioolwarmtewisselaar in het model is de maat voor hoeveel thermische energie er uit het rioolwater is onttrokken. Om dit te kunnen doen moeten er enkele aannamen worden gedaan:
- Temperatuur van de wisselaar.** Doordat er een koelmedium door de warmtewisselaar stroomt heeft het contactoppervlak van de wisselaar met het rioolwater een redelijk constante temperatuur. Er zijn vele bedrijfssituaties met mogelijke temperatuurtrajecten over de TSA denkbaar. Zoals eerder aangegeven gaan we uit van een LTV/HTK-systeem (5-15°C) en is het oppervlak van de TSA dat in contact staat met het rioolwater dus gemiddeld 10°C, deze waarde wordt toegepast in het model.
- Materiaal van de wisselaar.** De TSA heeft andere materiaaleigenschappen dan de rioolbuis. SOBEK heeft niet de mogelijkheid om verschillende delen van de buis andere eigenschappen te geven. De gehele buis wordt dus "meegenomen" als zijnde TSA. De thermodynamische eigenschappen van staal worden toegepast. Er zijn rioolsegmenten gekozen met beperkte lengte (~20m).
- Weerstand door vervuiling.** De warmte-uitwisseling tussen rioolwater en het medium in de TSA vermindert door de vorming van een biofilm op de TSA wand. Hier wordt rekening mee gehouden in de modellering. Er wordt een "virtuele" biofilm van 2mm dikte met een thermische geleidbaarheid van 0,6 W/m²/°C [Buckman, 2010] gemodelleerd. ('P2a' in figuren)
- b) Bij het berekenen van P2 voor drinkwater ontstaat een meer realistisch beeld door ook parameters van de tegenstroom en de TSA zelf mee te nemen. Hiervoor is een aantal aannames nodig.
- Eigenschappen TSA.** De TSA bestaat uit een platenwisselaar die zo ontworpen

wordt dat deze geen beperking vormt voor het vermogen. Dit betekent dat het interne oppervlak voldoende groot is en dat de interne warmteweerstand voldoende klein is ($A \cdot U = 2 \cdot 10^6$). Er wordt uitgegaan van enkele passage, dat wil zeggen dat het drinkwater slechts eenmaal de wisselaar passeert. Ook wordt uitgegaan van een ideale warmtewisselaar die geen warmte verliest aan de omgeving.

Eigenschappen van het warmtemedium. Het warmtemedium stroomt in tegenstroom door de TSA en heeft een temperatuur van 15°C in de winter en 10°C in de zomer. Dit zijn representatieve waarden voor een grondwaterbron (WKO) in respectievelijk winter en zomer. De volumestroom van de tegenstroom wordt gelijk geacht aan de gemiddelde volumestroom van het drinkwater.

Berekening. Wanneer de bovenstaande gegevens worden gecombineerd met de watertemperatuur ter plaatse van de wisselaar kan de potentie worden berekend. ('P2b' in figuren)

De winbare energie, die uit drinkwaterleidingen gewonnen (of toegevoegd) kan worden, hangt af van de volumestromen van het water en warmtemedium, en van temperatuur op de aan- en afvoerpunten van beide stromen. Hierbij geldt voor drinkwater een wettelijke maximumtemperatuur van 25°C. Als minimumtemperatuur bij het winnen van energie is 1°C aangehouden.

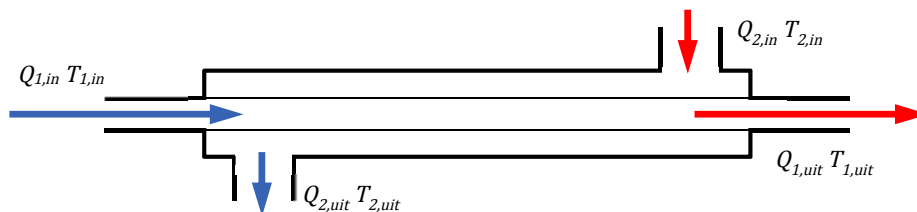
3 Warmtewisselaars

3.1 Algemeen werkingsprincipe

Een warmtewisselaar of tegenstroomapparaat (TSA) is een apparaat waarmee warmte van een medium met hoge temperatuur wordt overgedragen op medium met lage temperatuur. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 5. De omvang van thermisch vermogen dat kan worden overgedragen is afhankelijk van veel factoren:

- Het interne oppervlak van de warmtewisselaar;
- De gecombineerde warmteoverdrachtscoëfficiënt;
- De grootte van inkomende volumestromen Q_1 en Q_2 ;
- De dichtheid van het water en het warmtemedium;
- De temperaturen van inkomende volumestromen (water en medium);
- De configuratie van de wisselaar (tegenstroom of langsstroom, enkele of meervoudige passage);
- Het type wisselaar (buis-in-buis, platenwisselaar, etc.)

In het model is uitgegaan van een wisselaar die ontworpen is op een gemiddelde volumestroom. Bij een volumestroom die groter is dan gemiddeld zal de winbare energie niet meer verder toenemen. De warmtewisselaar kan geschematiseerd worden zoals weergegeven in Figuur 5.



Figuur 5. Schematische weergave warmtewisselaar (tegenstroom).

Het daadwerkelijke vermogen dat geleverd kan worden door de warmtewisselaar hangt af van het rendement van de warmtewisselaar. Dit rendement kan berekend worden met de zogenaamde *Effectiveness-NTU*³ of ϵ -NTU methode [Çengel, 2003]. De theoretisch maximaal winbare energie is gelijk aan:

$$P_{max} = C_{min} \Delta T \quad \text{Vergelijking 2}$$

P_{max} = maximaal potentieel vermogen [W]
 ΔT = maximale absolute temperatuurverschil tussen inkomende warme en koude volumestromen = $|T_{1,in} - T_{2,in}|$ [°C]

C is de zogenaamde 'heat capacity rate':

³ Number of Transfer Units

$$C_i = \dot{m}_i c_p = \rho Q c_p \quad \text{Vergelijking 3}$$

C_i	=	heat capacity rate [J/(s.K)]
$\dot{m}_i$	=	massastroom [kg/s]
Q	=	volumestroom [m ³ /s]
c_p	=	specifieke warmte water: 4186 J/(kg.K)
ρ	=	dichtheid van water: 1000 kg/m ³

De index i duidt op de koude of warme inkomende volumestroom. De index i is dus gelijk aan “c” (koud) of “h” (warm). Het theoretisch maximale vermogen (Vergelijking 1) wordt berekend met C_{min} . Dit is de minimale waarde uit de verzameling C_c en C_h , oftewel:

$$C_i = \min \{C_c, C_h\} \quad \text{Vergelijking 4}$$

Uitgaande van een tegenstroom platen warmtewisselaar met enkelvoudige passage is de effectiviteit gelijk aan:

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{-NTU(1-R)}}{1 - R \cdot e^{-NTU(1-R)}} \quad \text{Vergelijking 5}$$

waarbij R gelijk is aan de verhouding C_{min}/C_{max} . NTU is een afkorting van Number of Transfer Units. Dit is een dimensieloos getal en een maat voor het oppervlak van warmteoverdracht:

$$NTU = \frac{UA}{C_{min}} \quad \text{Vergelijking 6}$$

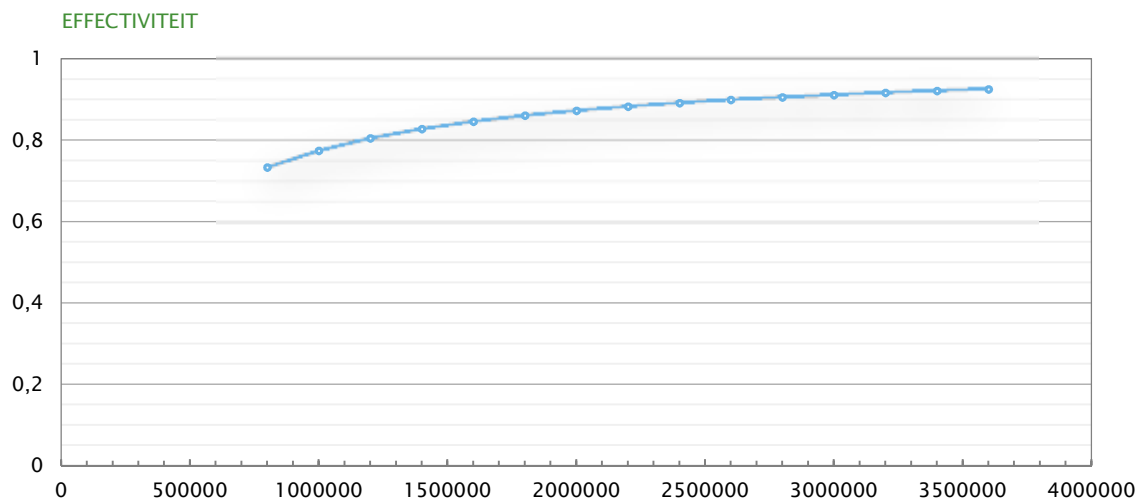
U	=	totale warmteoverdrachtscoëfficiënt [W/(m ² .K)]
A	=	totale oppervlak warmtewisselaar [m ²]

Typische waarden van U voor een warmtewisselaar waarbij beide media uit water bestaan variëren van 850-2500 W/(m².K) [Çengel, 2003]. Typische waarden voor het interne oppervlak van een warmtewisselaar hangen sterk af van het type wisselaar. Bij platenwarmtewisselaars kan dit oppervlak erg groot zijn. Voorbeelden hiervan zijn gegeven in Tabel 4 voor platenwisselaars met verschillende aansluitdiameters.

TABEL 4. ENKELE HANDELSMATEN VAN PLATENWARMTEWISSELAARS EN DE BIJBEHORENDE SPREIDING VAN INTERN OPPERVLAK [FUNKE, 2014].

Maat diameter aansluiting [mm]	Variatie in intern oppervlak platenwisselaar [m ²]
150	280-840
200	300-700
300	640-1520
500	1600-2400

In Figuur 6 is een beeld weergegeven van de effectiviteit van een warmtewisselaar waarbij Q_1 en Q_2 beide gelijk zijn aan 250 m³/h ($R = 1$). Deze effectiviteit is uitgezet tegen typische waarden van het product $U * A$ zoals deze hierboven genoemd zijn.



Figuur 6. Effectiviteit van warmtewisselaar met Q_1 en Q_2 gelijk aan $250 \text{ m}^3/\text{h}$ voor verschillende waarden van het product $U \cdot A$.

Het daadwerkelijke vermogen kan vervolgens berekend worden middels:

$$P_{\text{netto}} = \varepsilon C_{\min} \Delta T$$

Vergelijking 7

3.1.1 TSA bij drinkwaterstromen

Drinkwater is schoon en bevat weinig deeltjes (sediment). Daarom kunnen voor drinkwatertoepassingen platenwisselaars worden toegepast. Dit type wisselaar kan zeer effectief zijn door een groot intern oppervlak waarlangs warmte overgedragen kan worden. Indien een platenwisselaar gebruikt wordt met voldoende groot oppervlakte en voldoende kleine interne stromingsweerstand, indien verder de drinkwatertemperatuur nauwelijks varieert en het warmtemedium een constante temperatuur heeft, dan is de volumestroom van het warmtemedium zeer bepalend voor het vermogen dat geleverd kan worden. Ook de mate van variatie van het geleverde vermogen is daarvan afhankelijk.

3.1.2 TSA bij afvalwaterstromen

Door de samenstelling van afvalwater kunnen platenwisselaars of ander fijnmazige typen wisselaars niet worden toegepast. Er zijn verschillende typen warmtewisselaars op de markt die specifiek ontworpen zijn om thermische energie te winnen uit vervuilde waterstromen.

Er zijn systemen die het water uit de transportbuis afleiden naar een vrijstaande installatie waar met roterende of andere bewegende delen de aangroei van biofilm wordt tegengegaan. Er bestaan ook buissystemen waarin periodiek kleine sponsjes (zogenaamde pigs) door de buis worden geschoten om de biofilm te verwijderen. Omdat het gebruik van deze systemen intensief is en vaak met beperkte volumestroom kan worden toegepast, worden die toegepast bij kleine volumestromen met een hoge temperatuur. Economisch kan dat alleen uit als er ook een flinke hoeveelheid warmte te winnen is.

De meest bekende systemen zijn de wisselaars die zijn geïntegreerd in de (riool)buis. Binnen dit typen wisselaars zijn er twee varianten, zie ook Figuur 7:

1. Warmtewisselaars met het wisselend oppervlak op de bodem van de buis (type 1). Hierbij wordt vooral thermische energie uit het rioolwater gewonnen. Er kan nog

- onderscheid gemaakt worden tussen geïntegreerde systemen, of warmtewisselaars die in bestaande riolen kunnen worden ingebouwd.
2. Warmtewisselaars waarbij er leidingen met het warmtemedium rondom de hele buis lopen (type 2). Hierbij vooral thermische energie uitgewisseld met de bodem en voor een deel ook met het afvalwater (verhouding is afhankelijk van vullingsgraad van de buis).



Figuur 7. Verschillende typen rioolwarmtewisselaars (resp. 1 en 2)

De warmte-uitwisseling tussen rioolwater en rioolbuis is afhankelijk van de vervuiling die ontstaat door het afvalwater. Door het aangroeien van biofilm wordt de thermische overdracht beïnvloed. De thermische geleidbaarheid van biofilm is een factor vijf groter dan die van het PVC waar de rioolbuis veelal van is gemaakt [Buckman, 2010]. Dus voor de uitwisseling van thermische energie met de bodem heeft de biofilm beperkte invloed.

De thermische geleidbaarheid van een biofilm is echter weer kleiner dan die van het goed geleidende materiaal waar warmtewisselaars van worden gemaakt, dus daar heeft de biofilm wel invloed op de energie-uitwisseling.

Naast een biofilm kan zich ook sediment ophopen op de bodem van riolen. Dit kan een significante invloed hebben op de energetische prestaties van de TSA. Dit effect is door de lage stroomsnelheden bovenstroom in rioelstelsels sterker dan benedenstrooms, waar, door de hoge stroomsnelheden, sedimentvorming niet of minder sterk optreedt.

In deze studie wordt uitgegaan van toepassing van type 1 bij vrij verval riolen, en type 2 bij persleidingen.

4 Resultaten simulaties Almere

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zijn de resultaten van de modelleringen beschreven. Achtergrondinformatie over het studiegebied de Danswijk is opgenomen in Bijlage I.

4.2 Potentieel winbare warmte in de riolering

4.2.1 Resultaten doordeweekse dagen

Om meer inzicht te krijgen in de potentieel winbare warmten in het riool op weekdays zijn de volgende simulaties gemaakt:

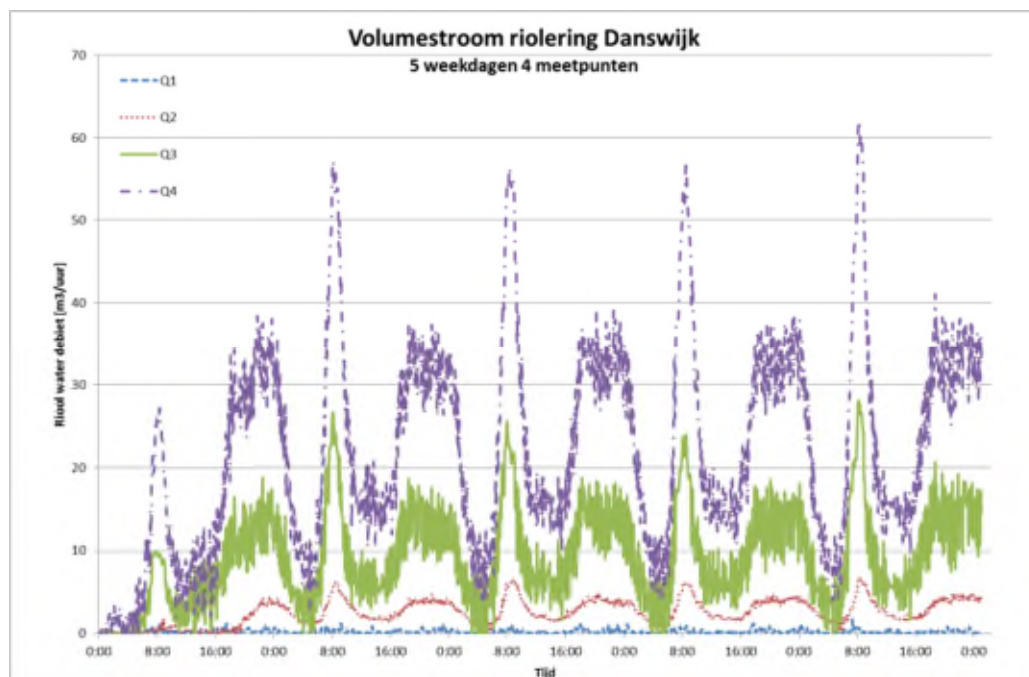
- Er zijn drie seizoenen doorgerekend: winter, zomer en herfst/voorjaar.
- De potentie is op basis van twee typen berekeningen vastgesteld, zoals beschreven in paragraaf 2.4. (P1 = praktisch haalbare ΔT ; P2 = toepassing van TSA)
- De potentie is inzichtelijk gemaakt op vier locaties in de wijk

NB

De simulatie is uitgevoerd voor 5 dagen met een gebruikspatroon voor een doordeweekse dag. In de figuren zijn echter maar 4 dagen weergegeven omdat door de beginvoorwaarden (leeg riool en natuurlijke bodemtemperatuur rondom het riool) de resultaten van de eerste simulatie dag niet representatief zijn.

4.2.1.1 Volumestroom en stromingssnelheid

De volumestroom en stroomsnelheid van het rioolwater zijn in alle drie de seizoenen gelijk en weergegeven in Figuur 8. In alle figuren komen de nummers van de series overeen met de meetpuntnummers zoals vermeld in §2.2.2



Figuur 8. Berekende volumestroom in de rioolbuis

Uit Figuur 8 komt duidelijk het dag-nacht ritme naar voren. Bovenstrooms zijn de berekende volumestromen en de stroomsnelheden klein, deze worden groter naarmate er verder benedenstrooms wordt gekeken. Opvallend is dat het debiet in de benedenstroomse strengen sterk terugvalt na de ochtendpiek.

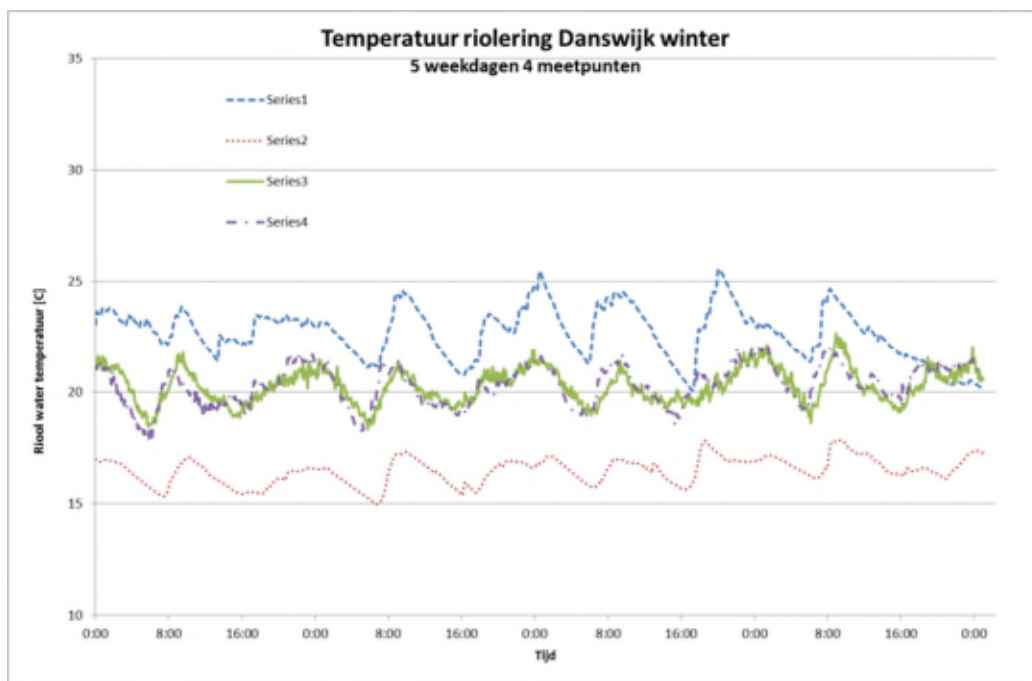
4.2.1.2 Temperatuurverloop

Het temperatuurverloop vertoont minder sterke schommelingen dan de volumestroom, zie Figuur 9, Figuur 10 en Figuur 11⁴. Het valt op dat de temperatuurschommelingen op locaties verder benedenstrooms afnemen.

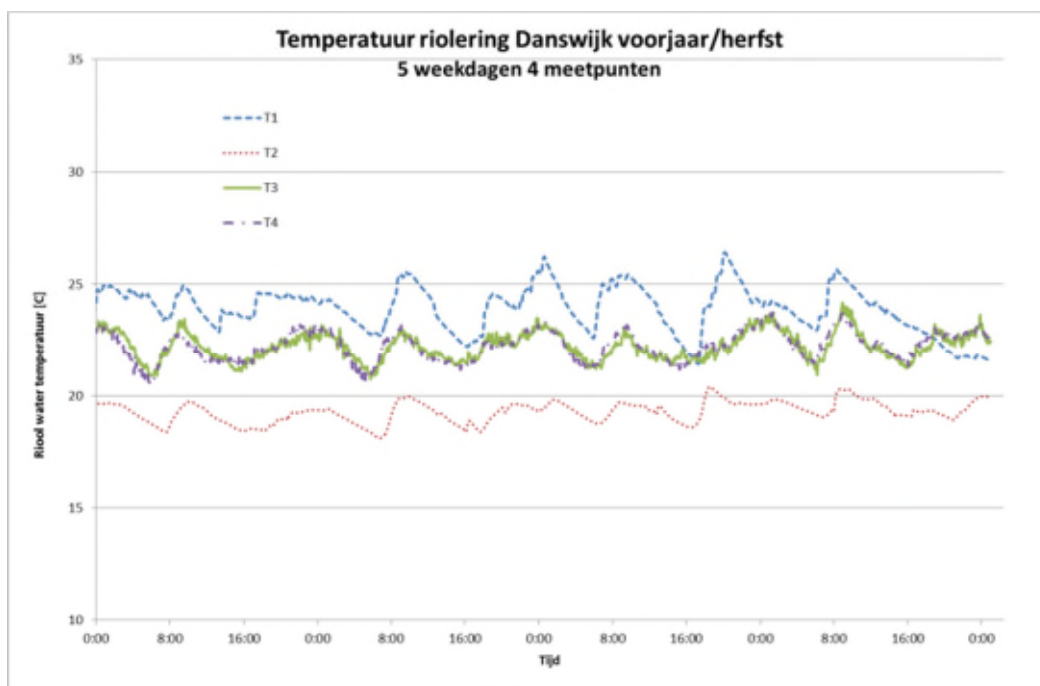
Opvallend is verder dat het temperatuurniveau van meetpunt 2, “halverwege de wijk”, lager is dan op de bovenstroomse locatie 1 en de benedenstroomse locaties 3 en 4. Dit kan worden verklaard op basis van de locatiespecifieke eigenschappen van deze tweede locatie. Geheel bovenstrooms heeft het rioolwater nog weinig warmte af kunnen geven aan de omgeving. Vandaar dat de temperatuur op locatie 1 hoger is dan op 2. Het gaat rondom locatie 1 om relatief korte strengen rioolbuis. Tussen locatie 1 en 2 zitten er langere strengen. Door de nog relatief beperkte volumestroom op dit traject koelt het rioolwater het eerste stuk in de rioolbuis blijkbaar relatief hard af. Dat het bij punten 3 en 4 weer warmer is, komt doordat er daar weer meer warm water aan de volumestroom is toegevoegd. In de winter is het verschil groter dan in de zomer.

De invloed van de omgevingstemperatuur op de temperatuur van het rioolwater is duidelijk zichtbaar: gemiddeld verschilt de temperatuur circa 2° C tussen elk opeenvolgend seizoen. De onderlinge verschillen tussen de locaties zijn groter in de winter en kleiner in de zomer. Dat is logisch omdat de bodemtemperatuur in de zomer dichterbij de rioolwatertemperatuur ligt. Door de wat langere strengen rondom locatie 2 is dit effect hier extra duidelijk.

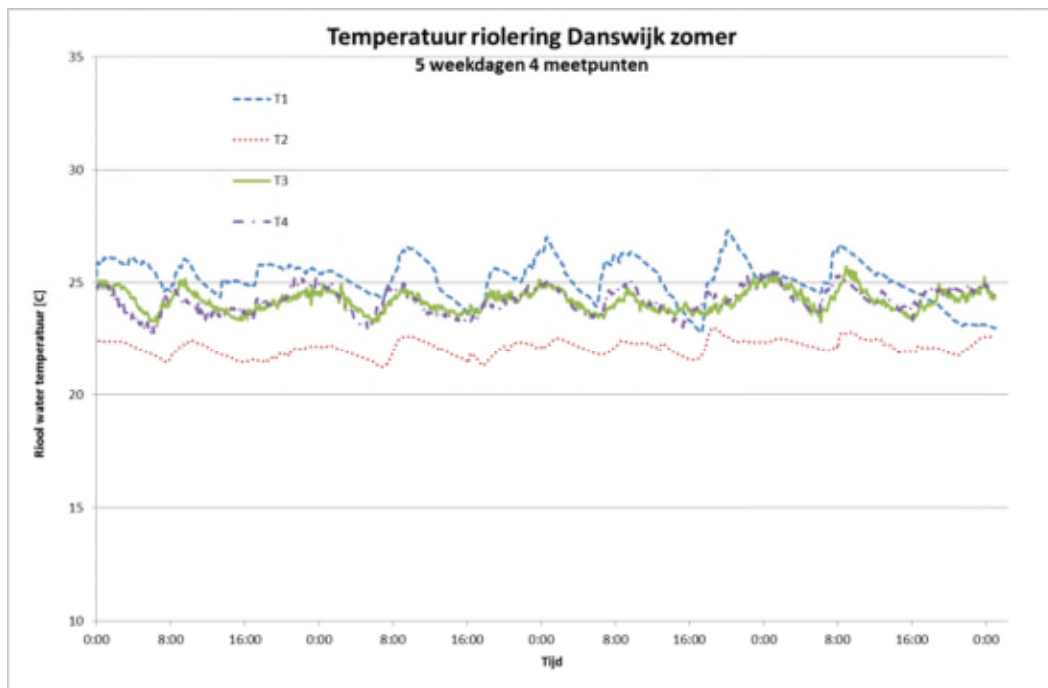
⁴ De eerste dag van de simulatie is niet opgenomen in de resultaten omdat die niet representatief zijn. Dit heeft te maken met de randvoorwaarde van de bodemtemperatuur en het inregelen van het model. Omdat dat uren zijn dat er ook weinig wordt geloosd, koelt de kleine stroom rioolwater (met relatief veel contactoppervlak en lange contacttijd) snel weer af. Wanneer de bodem direct rondom de buis na enkele uren is opgewarmd dan wordt dit effect verminderd, waardoor het in de daaropvolgende nachten in het model niet meer optreedt.



Figuur 9. Berekende temperatuur in rioolwater in de winter.



Figuur 10. Berekende temperatuur in rioolwater in het voorjaar en de herfst.



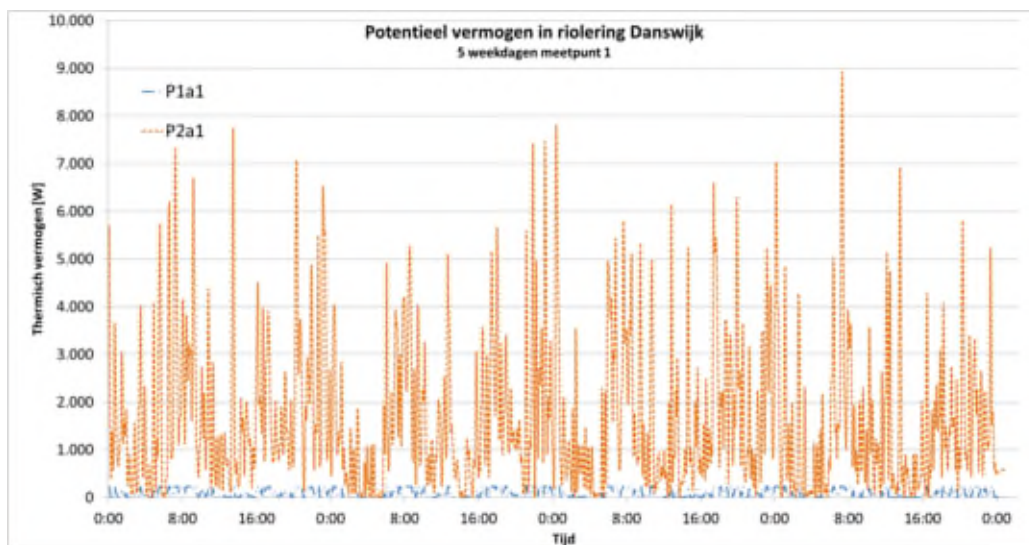
Figuur 11. Berekende temperatuur in rioolwater in de zomer.

4.2.1.3 Potentiele warmtewinning

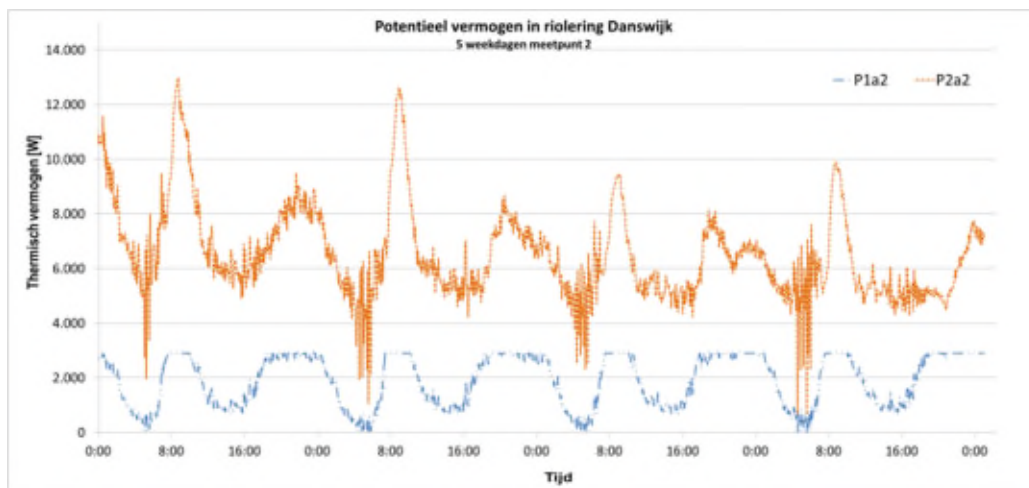
Het verloop van de potentieel winbare warmte over de simulatieperiode is voor de voorjaar/herfst-situatie weergegeven in Figuur 12 tot en met Figuur 15.

Uit de figuren blijkt dat de twee berekeningswijzen (zie paragrafen 2.4.1 en 2.4.2) voor winbare energie verschillende resultaten opleveren. Benedenstrooms bij punt 4 is het verschil tussen berekeningsmethode 'P1' (1°C afkoeling) en de methode die uitgaat van een fictieve warmtewisselaar 'P2' (relatief) het minst groot.

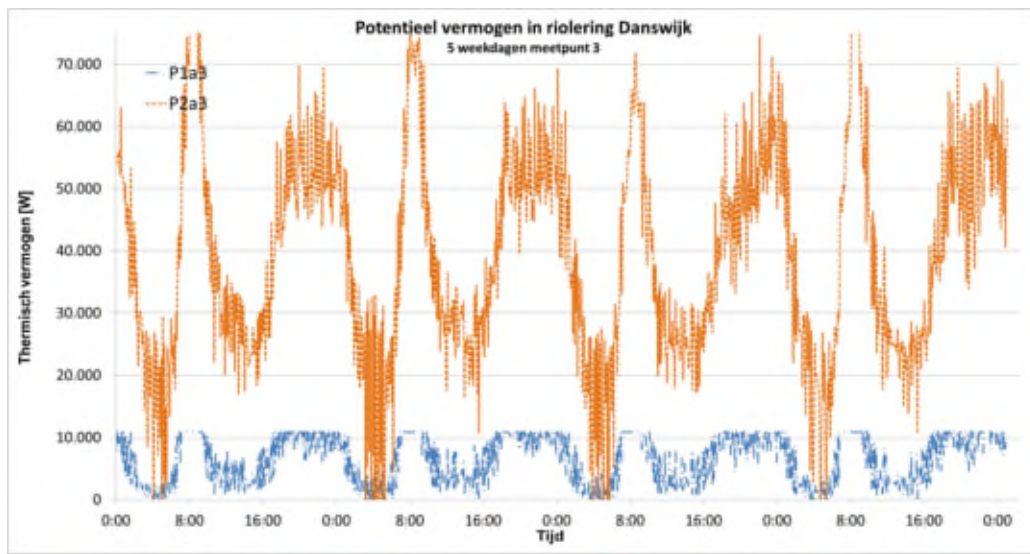
- Bij locatie 1 geeft berekeningsmethode P1 een hele kleine potentie vanwege het kleine debiet. De potentie berekend op basis van P2 is juist erg grillig in het verloop door de grote variatie in volumestroom en stromingssnelheid.
- Bij locatie 2 (500 inwonerequivalenten) is er nog steeds een relatief kleine volumestroom waarbij door de relatief lange leidingen het rioolwater snel afkoelt. Beide berekeningen geven wel potenties, maar die variëren sterk, berekeningsmethode P2 geeft een veel hogere potentie dan P1.
- Bij locatie 3 blijft de P1-methode grillig, gedurende piekmomenten kan er wel al redelijk wat warmte worden gewonnen, maar de potentie zakt ook ver terug gedurende verschillende momenten op de dag. De P2-methode laat ook een grillig verloop zien, en heeft structureel hogere pieken en dalen.
- Bij locatie 4 is eigenlijk hetzelfde beeld, alleen liggen de potenties hoger, en is er weinig verschil meer tussen de twee berekeningsmethoden.



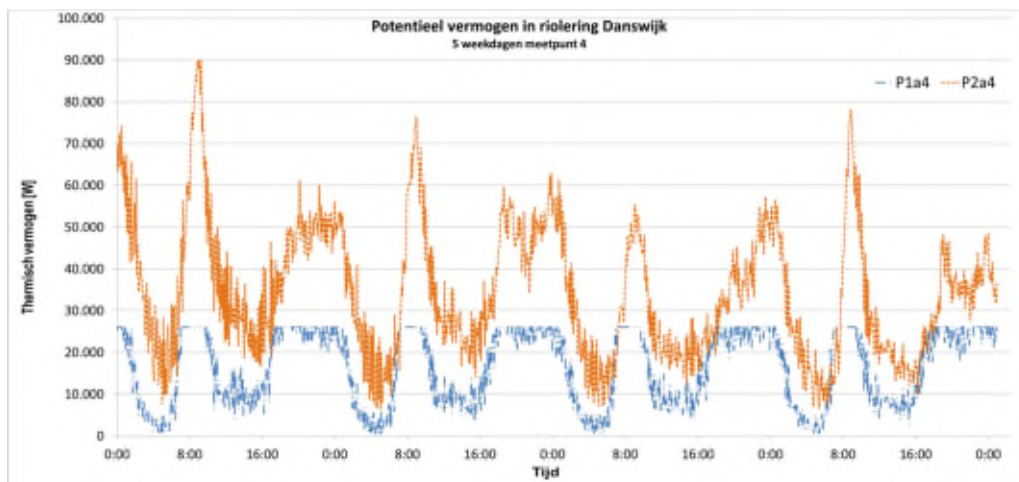
Figuur 12. Berekende potentieel winbare energie locatie 1, voorjaar/herfst.



Figuur 13. Berekende potentieel winbare energie locatie 2, voorjaar/herfst.



Figuur 14. Berekende potentieel winbare energie locatie 3, voorjaar/herfst



Figuur 15. Berekende potentieel winbare energie locatie 4, voorjaar/herfst

4.2.1.4 Kentallen potentiële warmtewinning

Beide potentieberekeningen zijn versimpelingen/benaderingen van wat een warmtewisselaar daadwerkelijk zou kunnen winnen. De berekening waarbij het temperatuurverschil tussen de situatie met en zonder een fictieve wisselaar (P2) een maat is voor de energie die kan worden gewonnen lijkt de meest reële inschatting te geven. De gemodelleerde rioolbuis zal in werkelijkheid echter niet over de gehele lengte een wisselaar bevatten. Ook de aangenomen gemiddelde temperatuur van de warmtewisselaar heeft mogelijk een te groot effect op de berekende potentie gehad omdat die bij een echte TSA mogelijk niet constant 10°C blijft. Daarom is het aannemelijk dat de werkelijke potentie tussen de berekende waarden van 'P1a' en 'P2a' in ligt.

Uit de berekeningen zijn vervolgens kentallen afgeleid uit het gemiddelde van de waarden van P1 en P2. Deze zijn voor alle seizoenen weergegeven in Tabel 5. De gemiddelde temperaturen bevestigen het beeld dat ook uit Figuur 9, Figuur 10 en Figuur 11 naar voren komt, namelijk dat tussen opeenvolgende seizoenen ongeveer 2°C verschil zit in rioolwatertemperatuur. Uit de tabel wordt ook duidelijk welk effect de rioolwatertemperatuur

heeft op het potentieel winbare vermogen: terwijl de gemiddelde temperatuur over de seizoenen maar beperkt verandert (gemiddeld circa 9%), varieert het winbare vermogen meer (gemiddeld circa 22%).

De standaarddeviatie gedeeld door de gemiddelde waarde van het vermogen per meetpunt is een relatieve maat voor hoe sterk het winbare vermogen relatief fluctueert over de vijf weekdays. Hieruit blijkt dat naarmate er verder benedenstrooms wordt gekeken hoe minder sterk de potentie fluctueert. Dit bevestigt het beeld uit Figuur 12 tot en met Figuur 15. Bij locatie 1 is de standaarddeviatie bijna even groot als het gemiddelde, terwijl vanaf locatie 2 de standaarddeviatie zich rond 50% van het gemiddelde stabiliseert.

Opvallend is de hoeveelheid vermogen die per inwonerequivalent kan worden gewonnen. Hoe verder benedenstrooms, hoe lager de potentie per aangesloten inwonerequivalent. Dit komt doordat bij de lage stroomsnelheden die bovenstrooms nog optreden er meer warmte uit het rioolwater kan worden gewonnen. Bovenstrooms is bovendien ook het niveau van het rioolwater lager dan benedenstrooms waardoor er een relatief groter contactoppervlak is tussen het water en de TSA. Er is dus een 'trade-off' tussen 'het winnen van zoveel mogelijk vermogen per inwoner equivalent' en 'het winnen met een zo constant mogelijk vermogen'.

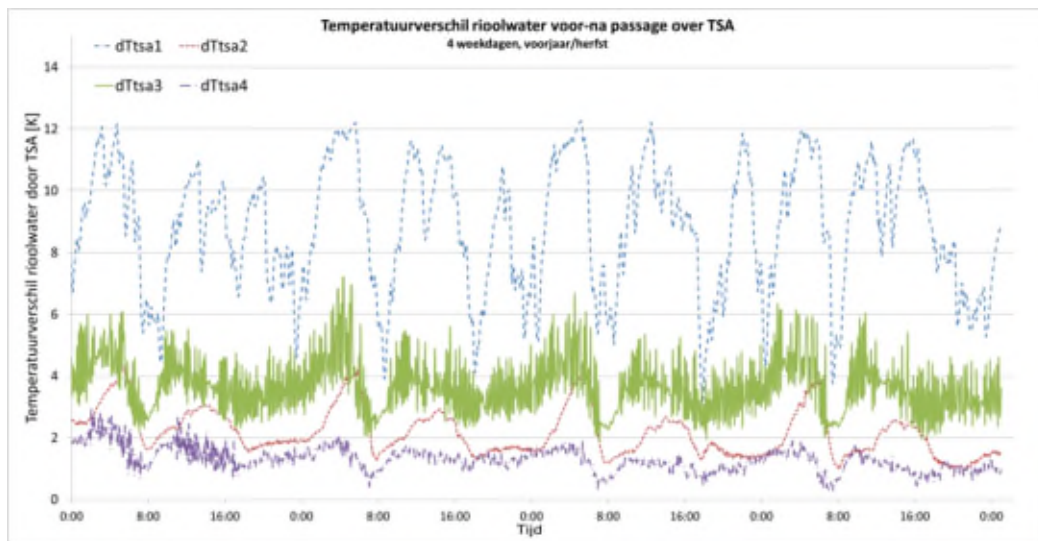
TABEL 5. RESULTATEN WINBAAR VERMOGEN IN RIOOLWATER, GEMIDDELDE VAN P1 EN P2, 5 WEEKDAGEN

	Locatie	1	2	3	4	eenheid
winter	Gem. temperatuur	22,5	16,6	20,1	20,4	°C
	gemiddeld vermogen	0,7	2	17	19	kW
	st.dev. / gemiddeld	0,94	0,54	0,54	0,65	-
	vermogen/inwoner	16	4	7	3	W
Voorjaar herfst	Gem. temperatuur	23,7	19,4	22,1	21,8	°C
	gemiddeld vermogen	0,8	4	21	25	kW
	st.dev. / gemiddeld	0,94	0,47	0,52	0,54	-
	vermogen/inwoner	18	8	9	4	W
zomer	Gem. temperatuur	25,0	22,1	24,1	24,3	°C
	gemiddeld vermogen	0,9	5	26	32	kW
	st.dev. / gemiddeld	0,95	0,47	0,51	0,50	-
	vermogen/inwoner	20	11	11	5	W

In bijlage I zijn de kentallen voor de 2 weekenddagen opgenomen.

4.2.1.5 Effect op temperatuurverloop door warmtewinning in riool

In Figuur 16 is de temperatuurverandering (ΔT) van het rioolwater als gevolg van de warmtewisselaarmodellering opgenomen voor de herfst/voorjaar situatie. Hieruit blijkt dat het toepassen van een TSA in het riool bovenstrooms een groter effect heeft op de temperatuur, en daarmee ook op de winbare potentie direct benedenstrooms van een riool-TSA. Naarmate er weer meer afvalwater wordt geloosd op het riool nemen de gevolgen van dit effect af. Omdat het bovenstrooms om relatief kleine volumestromen gaat, is het effect helemaal benedenstroom uiteindelijk toch beperkt. Indien er geheel bovenstrooms (locatie 1, $\Delta T \sim 8^\circ\text{C}$) een TSA wordt toegepast dan heeft dat een gemiddelde daling van minder dan $0,1^\circ\text{C}$ van het afvalwater geheel benedenstrooms (locatie 4) tot gevolg. Als op locatie 2 ($\Delta T \sim 2^\circ\text{C}$) een TSA wordt geplaatst dan heeft dat op locatie 3 een gemiddelde daling van $0,5^\circ\text{C}$ tot gevolg.



Figuur 16. Berekend temperatuurverschil van het rioolwater voor/na een TSA in het voorjaar/herfst op vier verschillende locaties

Uit Figuur 16 wordt nogmaals duidelijk dat het bovenstrooms winnen van thermische energie het beste lukt, getuige het grote temperatuurverschil dat op locatie 1 optreedt en de hoeveelheid energie die per inwonerequivalent kan worden gewonnen (Tabel 5). Opvallend is de sterke variatie in ΔT gedurende piekafvoermomenten op locatie 3. Mogelijk wordt dit veroorzaakt door het feit dat segment 3 relatief lang is (45m voor locatie 3, t.o.v. 10-20 m voor locaties 1,2 ,4).

Figuur 16 laat ook zien hoe belangrijk de volumestroom is bij het vaststellen van de potentie. Bij locatie 1 worden grote temperatuurverschillen gerealiseerd maar blijft de potentie achter door de hele lage volumestroom. Het omgekeerde is het geval bij locatie 4.

4.2.2 Evaluatie verzamelriool Almere-Buiten

De resultaten van de berekeningen voor het verzamelriool in Almere-Buiten zijn opgenomen in Tabel 6. Uit de resultaten blijkt dat energiewinning bovenstrooms beperkt effect heeft op het winbaar vermogen en dat het winbaar vermogen per i.e. benedenstrooms verder terugloopt zoals ook zichtbaar was in Tabel 5. De variatie in volumestroom is in de persleiding normaal gesproken minder groot dan in het vrij verval riool. Omdat er geen goed model van de persleiding beschikbaar is, en er dus ook geen koppeling gemaakt kan worden met het persleidingmodel, kan de vermindering van de mate van variatie niet goed inzichtelijk worden gemaakt. Om toch een uitspraak te kunnen doen over de potentie in het verzamelriool op basis van de gesimuleerde potenties in de Danswijk is uitgegaan van een reductie van de standaarddeviatie met 30% en is de potentie in het verzamelriool geschaald naar het aantal aangesloten i.e.'s.

TABEL 6. RESULTATEN WINBAAR VERMOGEN IN RIOOLWATER, P2, 5 WEEKDAGEN

	Locatie	5	6_1	6_2	eenheid
winter	gemiddelde temperatuur	19,6	20,0	19,7	°C
	gemiddeld vermogen	31,3	32,6	29,5	kW
	vermogen/aansluiting	3,39	2,36	2,13	W
	vermogen/inwoner	1,3	0,9	0,8	W
Voorjaar herfst	gemiddelde temperatuur	21,4	21,4	21,0	°C
	gemiddeld vermogen	35,4	37,3	35,8	kW
	vermogen/aansluiting	3,84	2,69	2,58	W
	vermogen/inwoner	1,5	1,0	1,0	W
zomer	gemiddelde temperatuur	21,9	21,9	21,5	°C
	gemiddeld vermogen	41,7	45,1	37,3	kW
	vermogen/aansluiting	4,52	3,26	2,69	W
	vermogen/inwoner	1,7	1,3	1,0	W

4.2.3 Jaarlijkse energie levering rioolwater

Op basis van de vastgestelde vermogens is bepaald hoeveel thermische energie er per jaar kan worden geleverd, zie Tabel 7. Hierbij is enerzijds uitgegaan van de situatie waarbij gedurende het hele jaar energie uit het afvalwater wordt gewonnen (potentie) en anderzijds van de meer praktische situatie waarbij dat alleen gedurende de winter en de helft van de herfst en het voorjaar gebeurt.

TABEL 7. WINBARE ENERGIE PER JAAR PER LOCATIE.

Locatie	1	2	3	4	5	6	eenheid
Potentie per jaar	7	34	198	232	314	333	MWh
Praktisch winbaar per jaar	3	13	88	102	146	153	MWh
Potentie energie per i.e.	156	68	79	39	13	9	kWh/inw
Praktisch energie per i.e.	73	27	35	17	6	4	kWh/inw

4.3 Potentieel winbare thermische energie in drinkwaterleidingen

4.3.1 Evaluatie op vier locaties in de Danswijk

In Figuur 17 is ingezoomd op de Danswijk. Het analysegebied is aangegeven met de blauwe markering. De drinkwaterinfrastructuur van de Danswijk is op zes plaatsen verbonden met de omliggende infrastructuur. In Figuur 17 zijn de volumestromen (in m³/h) op deze locaties weergegeven op het moment dat maximale volumestromen optreden (8:00 uur). De grootste volumestromen bevinden zich in de leidingen die de Danswijk aan de zuidwest en noordoost zijde voeden (+47,2 en +59,7 m³/s). Om de maximale potentie van de warmtewisselaar te onderzoeken zijn op deze locaties in de Danswijk warmtewisselaars gesimuleerd (Figuur 18). Daarnaast zijn twee locaties gekozen voor warmtewisselaars op kleinere volumestromen waarmee een deel van de Danswijk wordt voorzien van drinkwater. Dit deel is aangegeven met een oranje markering in Figuur 18.



Figuur 17. Drinkwaterinfrastructuur Danswijk met inkomende en uitgaande volumestromen (m^3/h) op piekmoment (8.00 uur).



Figuur 18. Locaties van de gesimuleerde warmtewisselaars. De rode cirkels (locatie 1 en 2) geven de locaties weer op de grootste ingaande volumestromen. De oranje cirkels (locatie 3 en 4) geven de locaties weer wanneer volumestromen naar een deel van de Danswijk (binnen rode markering) voorzien worden van een warmtewisselaar.

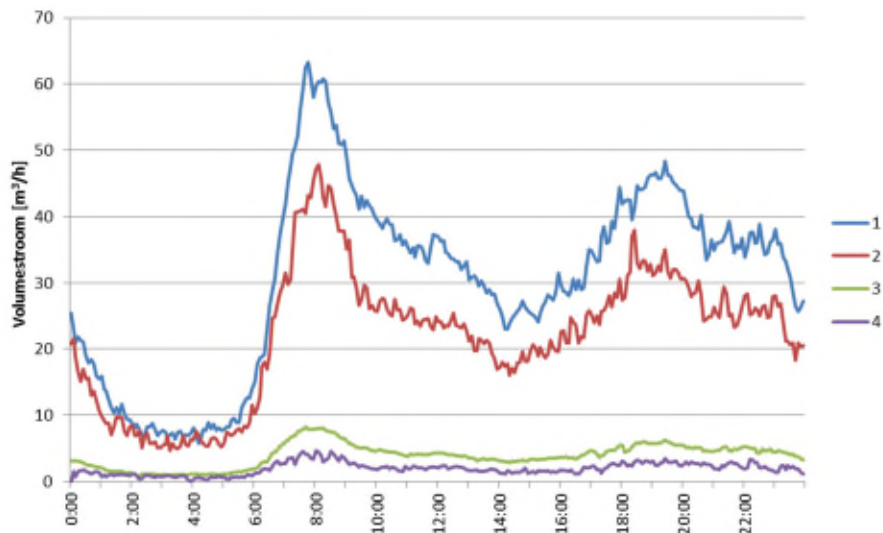
Omdat het drinkwaternet vermaasd is uitgevoerd, is het lastig om te bepalen hoeveel aansluitingen er zich exact achter de verschillende TSA locaties bevinden. In Bijlage III is uitgelegd hoe er een schatting gemaakt is van het aantal aansluitingen achter de TSA locaties. Om een vergelijking met energiewinning uit riolering mogelijk te maken is het aantal aansluitingen omgerekend naar het aantal inwoners (i.e.). Een gemiddeld huishouden

(aansluiting) in Almere bestaat uit 2,3 personen⁵. In de Danswijk is dit 2,6 personen per huishouden (zie Bijlage III).

4.3.2 Resultaten 1 weekdag

4.3.2.1 Volumestromen

De volumestromen over de dag voor de vier locaties in de Danswijk zijn weergegeven in Figuur 19. De volumestromen variëren sterk over de dag.



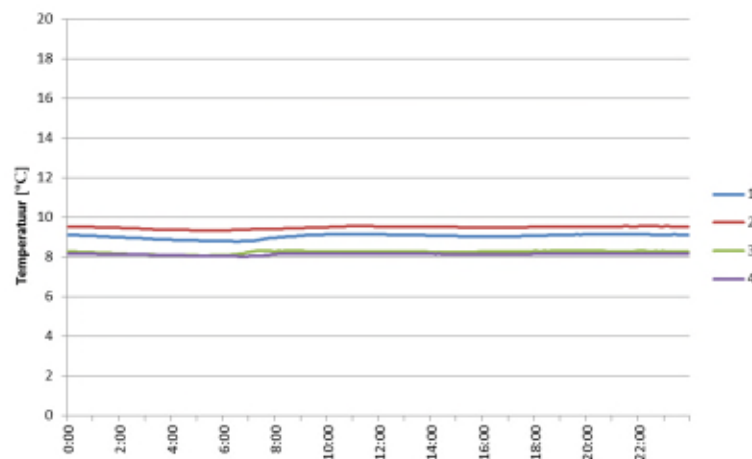
Figuur 19. Volumestroom drinkwater op de vier warmtewisselaar locaties.

4.3.2.2 Temperatuur van het drinkwater ter plaatse van warmtewisselaars

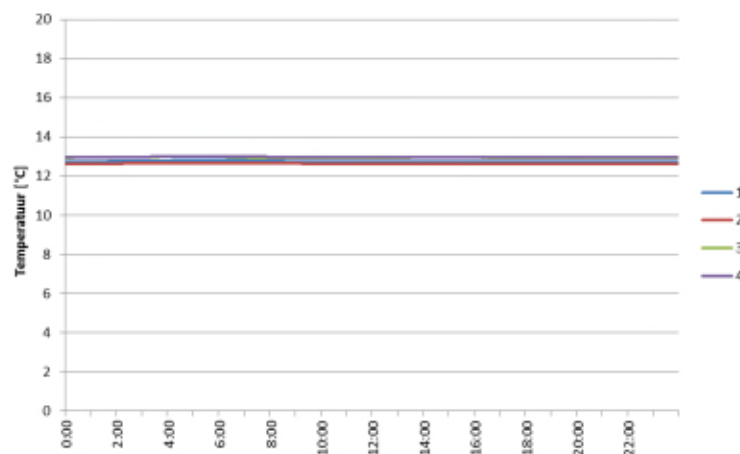
In Figuur 20, Figuur 21 en Figuur 22 is te zien dat de temperatuur van het drinkwater op de vier verschillende locaties nauwelijks varieert in de tijd. Daarom wordt voor elke situatie (winter, voor-/najaar, zomer) een gemiddelde temperatuur gehanteerd voor de verschillende locaties.

Omdat uitgegaan is van constante gemiddelde temperaturen, is het leverbaar vermogen voornamelijk afhankelijk van de volumestroom.

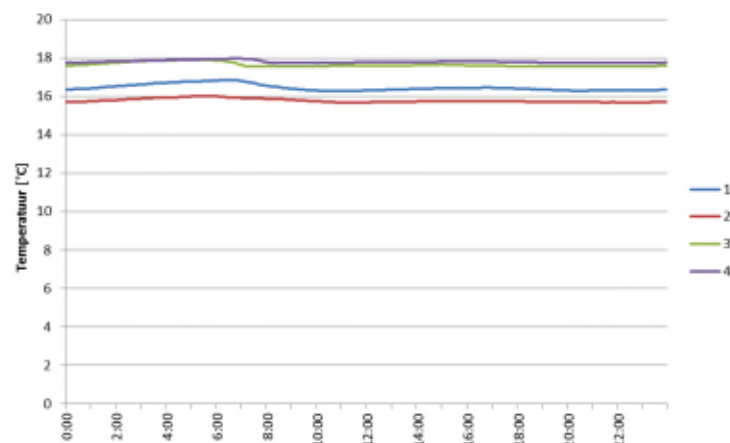
⁵ https://www.almere.nl/fileadmin/files/almere/overalmere/1_Bevolking_stad_en_wijk_pub.xls, bezocht op 10 oktober 2014.



Figuur 20. Drinkwatertemperatuur op vier warmtewisselaarlocaties in winter.



Figuur 21. Drinkwatertemperatuur op vier warmtewisselaarlocaties in voor/najaar.



Figuur 22. Drinkwatertemperatuur op vier warmtewisselaarlocaties in zomer.

4.3.2.3 Potentiële capaciteit thermische energie

Wanneer temperatuur en volumestroom bekend zijn kan de maximaal winbare energie (P1b) op de vier locaties berekend worden met Vergelijking 1. Hierbij wordt verondersteld dat de TSA en de tegenstroom zo ontworpen kunnen worden dat het drinkwater de TSA verlaat met

25°C bij verwarmen en 1°C bij koelen zodat het verschil in temperatuur maximaal benut wordt. De resultaten voor de verschillende seizoenen zijn weergegeven in Tabel 8.

TABEL 8. MAXIMALE WARMTE- EN KOUDECAPACITEIT (P1B) OP 4 LOCATIES IN DE DANSWIJK.

		1	2	3	4	eenheid
winter	temperatuur	9,0	9,5	8,2	8,1	°C
	gem. vermogen koude	562,1	396,2	75,3	37,8	kW
	st. deviatie/gemiddelde	0,46	0,46	0,46	0,48	-
	gem. vermogen warmte	284,2	217,1	32,7	16,0	kW
	st. deviatie/gemiddelde	0,47	0,46	0,47	0,48	-
Voor-/najaar	temperatuur	12,7	12,6	12,9	12,9	°C
	gem. vermogen warmte	432,5	316,2	54,3	27,0	kW
	st. deviatie/gemiddelde	0,46	0,46	0,47	0,48	-
	gem. vermogen warmte	413,9	297,1	53,7	26,8	kW
	st. deviatie/gemiddelde	0,46	0,46	0,46	0,48	-
zomer	temperatuur	16,4	15,7	17,6	17,7	°C
	gem. vermogen warmte	302,8	236,1	33,3	16,2	kW
	st. deviatie/gemiddelde	0,47	0,46	0,47	0,48	-
	gem. vermogen warmte	543,5	377,1	74,7	37,6	kW
	st. deviatie/gemiddelde	0,46	0,46	0,46	0,48	-

De analyse in Bijlage I geeft aan dat de berekende temperatuurverandering ter plaatse van de warmtewisselaar geen effect heeft op het energieverbruik voor de bereiding van warmtapwater in de woningen.

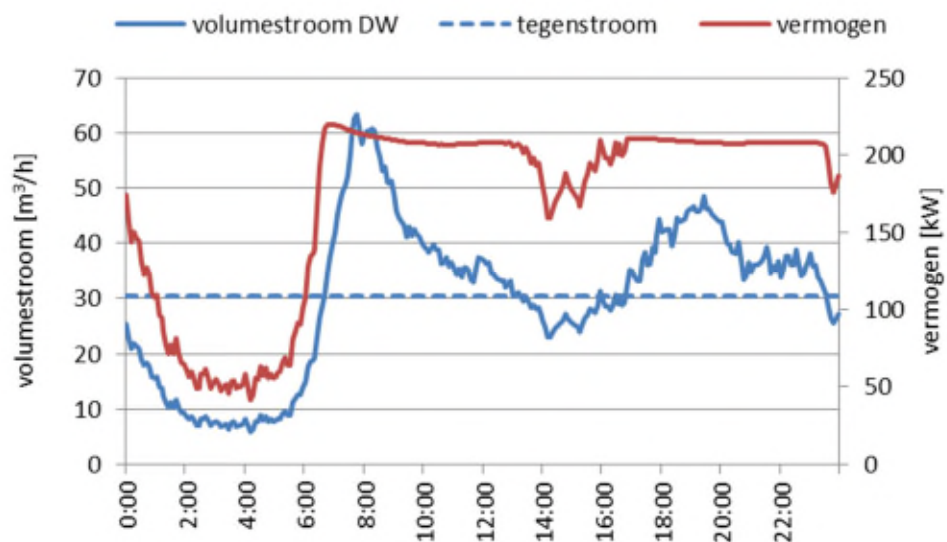
4.3.2.4 Warmte- en koudecapaciteit bij aannamen over tegenstroom

In de praktijk is het lastig is om een maximaal temperatuurverschil te realiseren (zoals bij de berekening van P1b), zeker wanneer randvoorwaarden aan de temperatuur van de tegenstroom gesteld zijn doordat er bijvoorbeeld sprake is van restwarmte of het gebruik van een WKO. Daarom is ook een berekening gemaakt waarbij aannamen gedaan zijn over de temperatuur en het volume van tegenstroom en de eigenschappen van de TSA (P2b). De methode die hiervoor gebruikt is heet de *Effectiveness-NTU methode*. Deze methode is toegelicht in hoofdstuk 3. Voor de temperatuur van de tegenstroom is gekozen voor een temperatuurtraject van 10-15 graden, wat een typisch traject is voor een WKO grondwaterbron (15 graden in de winter; 10 graden in de zomer). De volumestroom van de tegenstroom is gelijk gesteld aan de gemiddelde volumestroom van het drinkwater. Voor de warmtewisselaar is uitgegaan van een product $U \cdot A$ (totale warmteoverdrachtscoëfficiënt maal intern oppervlak) van $2 \cdot 10^6$ W/K. Dit is representatieve waarde voor een goed functionerende platenwisselaar. Het vermogen op de locaties 1-4 bij bovengenoemde aannamen over een TSA zijn weergegeven in Tabel 9.

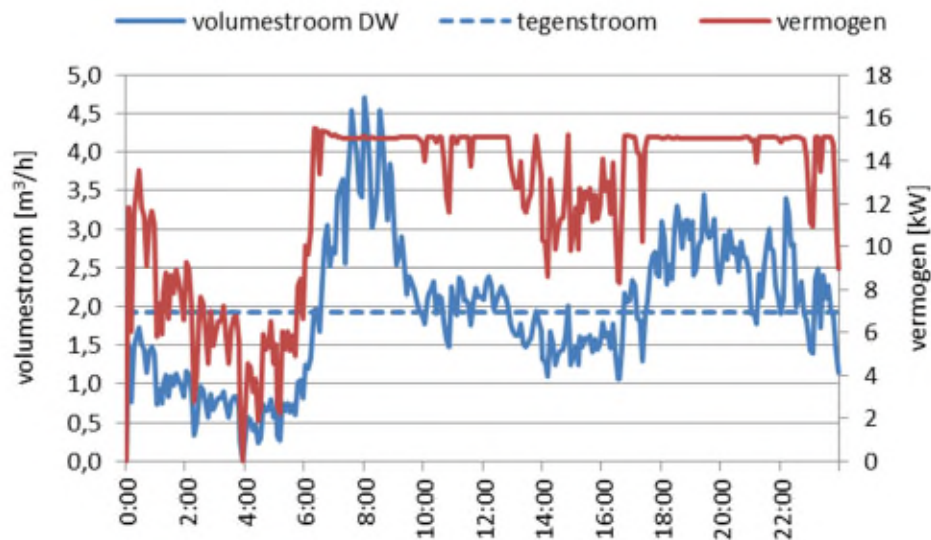
TABEL 9. GEMIDDELDEN VERMOGENS BIJ BEREKENING VAN P1B.

		1	2	3	4	eenheid
winter	temperatuur	9,0	9,5	8,2	8,1	°C
	gem. vermogen koude	170,6	115,6	24,8	12,2	kW
	st. deviatie/gemiddelde	0,35	0,33	0,33	0,32	-
	gem. vermogen / aansl.	100	82	88	94	W
	gem. vermogen / i.e.	39	31	34	36	W
zomer	temperatuur	16,4	15,7	17,6	17,7	°C
	gem. vermogen warmte	184,1	120,9	28,0	14,2	kW
	st. deviatie/gemiddelde	0,34	0,33	0,33	0,32	-
	gem. vermogen / aansl.	108	85	100	108	W
	gem. vermogen / i.e.	42	33	38	42	W

In Figuur 23 en Figuur 24 zijn de volumestromen en het vermogen op de locaties 1 en 4 weergegeven in de tijd.



Figuur 23. Volumestroom van drinkwater en tegenstroom en vermogen op locatie 1 in Danswijk.



Figuur 24. Volumestroom van drinkwater en tegenstroom en vermogen op locatie 4 in Danswijk.

Omdat de drinkwatertemperatuur en de temperatuur van de warmte/koude bron vrijwel constant zijn over de dag is het temperatuurverschil ook zo goed als constant. Daarmee is de verhouding tussen beide volumestromen (drinkwater en tegenstroom) sterk bepalend voor het geleverde vermogen. Zo lang de volumestroom van het drinkwater groter is dan de tegenstroom is het vermogen van de warmtewisselaar min of meer constant. Wanneer de volumestroom van het drinkwater kleiner is dan de tegenstroom neemt het vermogen sterk af. Dit is duidelijk zichtbaar tijdens de nachturen (0:00 – 6:00).

4.3.3 Bepaling warmte- en koudecapaciteit op vier transportleidingen buiten Danswijk

Om de resultaten voor de Danswijk in een breder kader te plaatsen zijn ook berekeningen uitgevoerd voor vier locaties met grotere volumestromen. Dit betreft transportleidingen op de locaties Almere Buiten (af pompstation) (5), ter hoogte van de kruising s101/Elementendreef (6), ter hoogte van de kruising s101/s102 (7) en ter hoogte waar de s102 het Weerwater passeert (8) (zie Figuur 25 voor numerieke referenties).

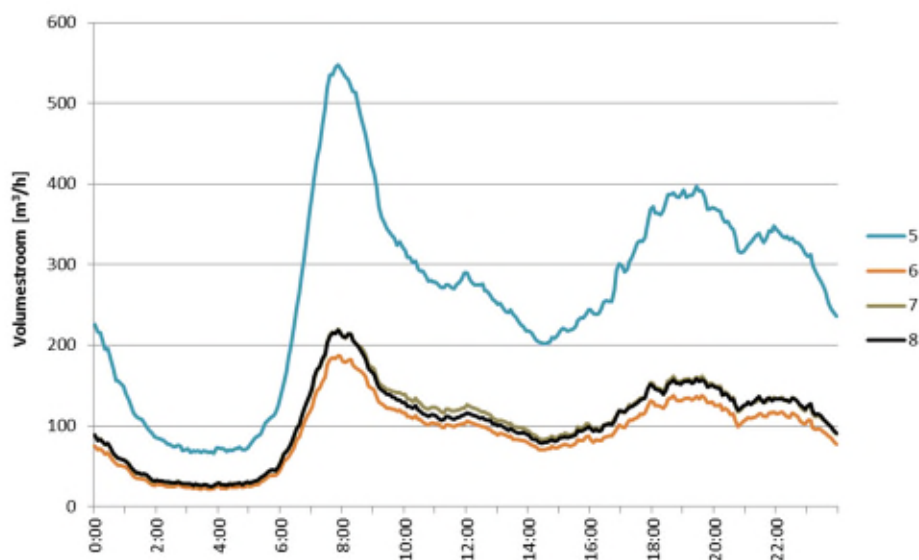


Figuur 25. Pilotlocaties op transportleidingen.

Locatie 5 is typisch 'af pompstation'. De locaties 6 tot 8 kunnen beschouwd worden als ingaande stromen voor een distributienet.

4.3.3.1 Volumestromen

In Figuur 26 zijn de volumestromen over de dag weergegeven voor de locaties 5 tot 8. Deze volumestromen zijn beduidend hoger dan de volumestromen van de locaties 1 tot 4 in de Danswijk.



Figuur 26. Volumestromen over de dag op locaties 5 en 6 buiten Danswijk.

4.3.3.2 Warmte- en koudecapaciteit bij aannamen over tegenstroom

Om de warmte- en koudecapaciteit te bepalen voor de vier bovengenoemde locaties is dezelfde methode gebruikt als in paragraaf 4.3.2.4. De resultaten voor de vier locaties buiten de Danswijk zijn weergegeven in Tabel 10. De gemiddelde temperaturen voor de locaties 6 tot 8 zijn vergelijkbaar.

TABEL 10. GEMIDDELDEN VERMOGEN P1B OP VIER LOCATIES BUITEN DANSWIJK.

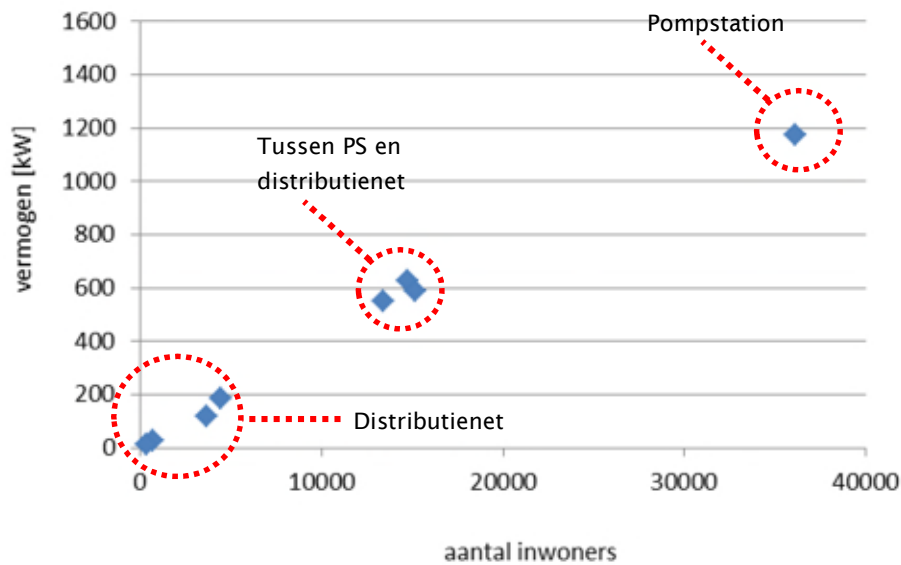
		5	6	7	8	eenheid
winter	temperatuur	10,0	9,0	9,1	9,3	°C
	gem. vermogen koude	1173,1	510,1	587,3	562,1	kW
	st. deviatie/gemiddelde	0,32	0,34	0,34	0,33	-
	gem. vermogen / aansl.	75	87	92	85	W
	gem. vermogen / i.e.	25	29	31	28	W
zomer	temperatuur	15,0	16,4	16,2	16,0	°C
	gem. vermogen warmte	1173,1	551,1	625,4	591,3	kW
	st. deviatie/gemiddelde	0,32	0,34	0,34	0,33	-
	gem. vermogen / aansl.	75	94	98	90	W
	gem. vermogen / i.e.	25	31	33	30	W

4.3.4 Vergelijking winnen warmte- en koude uit drinkwater op verschillende locaties binnen en buiten de Danswijk

De resultaten van de locaties binnen (1-4) en buiten (5-8) de Danswijk geven samen een beeld van het winbare vermogen op verschillende niveaus in het leidingnet van Almere:

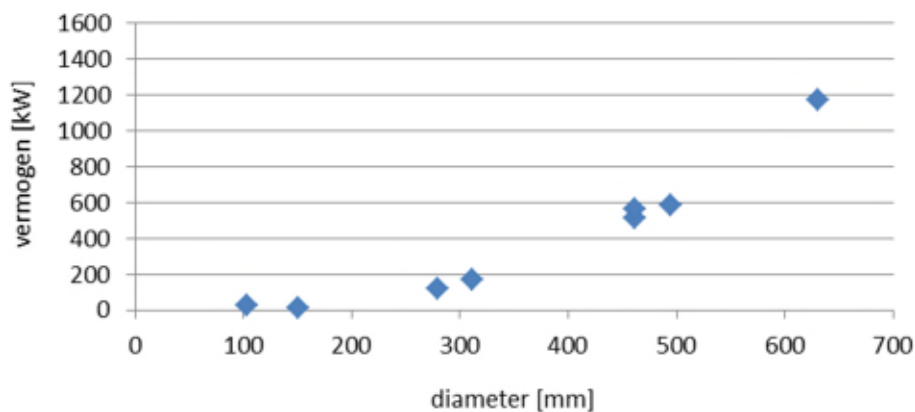
- vermogen af pompstation (locatie 5);
- vermogen ingaand distributienet (locaties 6,7 en 8);
- vermogen in het distributienet (locaties 1, 2, 3 en 4).

Het vermogen per aansluiting fluctueert niet sterk per locatie, zoals ook blijkt uit Tabel 10.



Figuur 27. Relatie tussen gemiddeld geleverd vermogen en geschat aantal aansluitingen achter de TSA op 8 onderzochte locaties in Almere.

De resultaten uit Figuur 27 geven een beeld van het vermogen wat beschikbaar is bij verschillende TSA locaties. Het lineaire verband wat hier op lijkt te treden correspondeert met de constante vermogens per aansluiting uit Tabel 10. Afhankelijk van de bodemparameters kan hier echter ook een meer parabolisch verband optreden, waarbij het optimum niet bij het pompstation ligt (vanwege grote volumestroom) maar bij het einde van de transportleiding (vanwege relatief grote volumestroom én groter temperatuurverschil door invloed van de bodem).



Figuur 28. Relatie tussen gemiddeld geleverd vermogen en diameter van de drinkwaterleiding op acht onderzochte locaties in Almere.

De relatie tussen beschikbaar vermogen en leidingdiameter laat een exponentieel verband zien (Figuur 28). De informatie uit Figuur 27 en Figuur 28 is gebruikt voor het opzetten van een methode voor het schatten van de vermogenspotentie in drinkwaterleidingen. Hierop wordt verder ingegaan in hoofdstuk 5.

4.3.5 Jaarlijkse energie levering drinkwater

Op basis van de vastgestelde vermogens is bepaald hoeveel thermische energie er per jaar kan worden geleverd, zie Tabel 11. Hierbij is uitgegaan van de totale potentie; winning gedurende het hele jaar en de praktische potentie; winning koude in de winter (1/4 deel van het jaar) en/of winning van warmte in de zomer (1/4 deel van het jaar).

TABEL 11. ENERGIE PER JAAR PER LOCATIE.

Locatie	1	2	3	4	Eenheid
Potentie per jaar	5622	3950	758	380	MWh
Praktische winbare energie	777	518	116	58	MWh
Potentie energie per aansluiting	3310	2790	2696	2903	kWh/aansl
Praktisch energie per aansluiting	457	366	412	441	kWh/aansl
Potentie energie per i.e.	1273	1073	1037	1116	kWh/inw
Praktisch energie per i.e.	176	141	158	170	kWh/inw

Locatie	5	6	7	8	Eenheid
Potentie per jaar	45461	16829	19631	19016	MWh
Praktische winbare energie	5138	2324	2656	2526	MWh
Potentie energie per aansluiting	2896	1072	1250	1211	kWh/aansl
Praktisch energie per aansluiting	327	398	415	383	kWh/aansl
Potentie energie per i.e.	1259	466	544	526	kWh/inw
Praktisch energie per i.e.	142	173	180	166	kWh/inw

4.4 Synthese en discussie

4.4.1 Energiewinning uit rioolwater

Uit de figuren en tabellen kan worden opgemaakt dat er een groot verschil zit tussen de verschillende rekenwijzen voor de winbare hoeveelheid thermische energie. Het wordt ook duidelijk dat er hoge vermogens kunnen worden geleverd, echter beperkt tot enkele momenten per dag. Op welke locatie de potentie ook bekeken wordt, het beschikbare vermogen fluctueert sterk.

- Op de meest bovenstroomse locatie is de variatie zo groot dat het niet haalbaar lijkt om op een structurele manier thermische energie te winnen. Ook is naar verwachting de potentie te klein om kostenefficiënt een voorziening aan te brengen ($< 1 \text{ kW}$)
- Vanaf locatie 2 (~500 inwonerequivalenten) tekent zich een basispotentie af, al is deze nog steeds erg klein: circa $2\text{-}4 \text{ kW}_{\text{th}}$.
- Bij 2500 inwonerequivalenten (locatie 3) wordt de potentie: $10\text{-}20 \text{ kW}_{\text{th}}$.
- Bij 6000 inwonerequivalenten (locatie 4) $20\text{-}30 \text{ kW}_{\text{th}}$.

4.4.1.1 Berekening van temperatuur in het riool

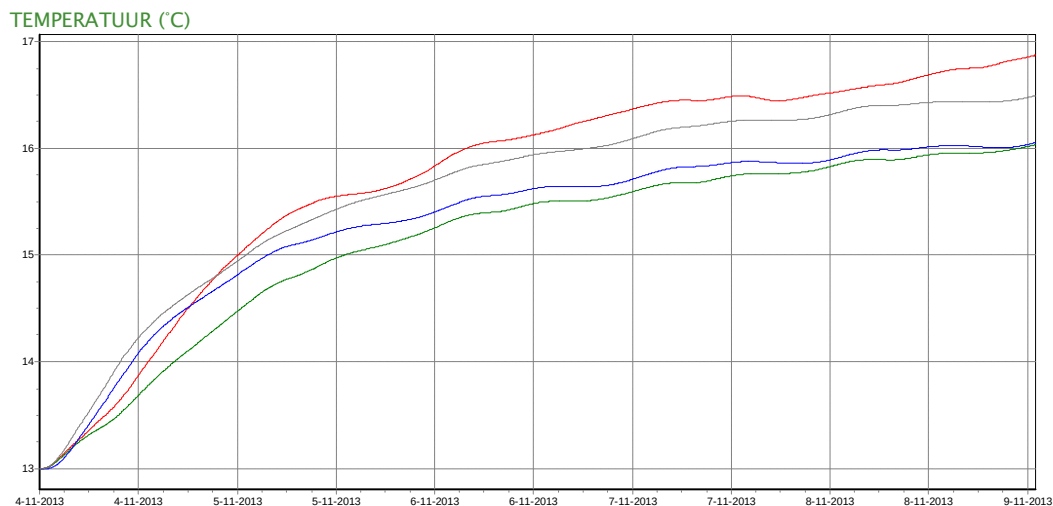
De hydraulische eigenschappen van het rioolmodel lijken op orde: er zijn geen opvallende dingen waargenomen. Er zijn ook geen aanpassingen gedaan aan de hydraulische eigenschappen en de belasting op het riool vanuit SIMDEUM ligt in de lijn van hetgeen waarop van het riool is ontworpen.

Met betrekking tot de temperatuurberekeningen is zo goed mogelijk rekening gehouden met ervaringen van andere locaties en modellen, en in de literatuur vermelde waarden voor de thermodynamische parameters in het model. Omdat met name de bodemparameters van locatie tot locatie kunnen verschillen, zelfs binnen één stad of wijk, zou een modelkalibratie

op basis van metingen moeten worden uitgevoerd om het gedrag van het temperatuursverloop zo correct mogelijk te simuleren. Een aspect dat in deze studie alleen bij de berekening van de energie-uitwisseling met een fictieve warmtewisselaar is meegenomen, is vervuiling van de pijpwand door biofilmgroei. Omdat de geleidbaarheid van de biofilm van gelijke orde-grootte is als die van de kunststof buis heeft dit naar verwachting maar een beperkt effect op de uiteindelijke uitkomst. De punten die hier worden genoemd hebben effect op de berekende temperatuur van het rioolwater, en daarmee op de uitkomsten ten aanzien van de grootte van de winbare capaciteit aan thermische energie. Ondanks dat deze processen niet of vereenvoudigd zijn meegenomen in de berekeningen blijft de algemene conclusies over de variatie en orde-grootte van de berekende potentie geldig.

4.4.1.2 Simulatieperiode

Bij elke simulatie is de initiële bodemtemperatuur gelijk aan de achtergrondtemperatuur. In de directe nabijheid van de rioolbuis stelt zich tijdens de eerste tijdstappen van de simulatie een nieuwe evenwichtssituatie in, zie Figuur 29. Temperatuur op het grensvlak tussen rioolbuis en bodem, onderkant buis op verschillende locaties in de Danswijk, voorjaar/herfst, vijf weekdagen. Voor de weekdagen wordt dit evenwicht nagenoeg bereikt, bij de twee weekenddagen is dat echter niet het geval. Er is een relatief korte periode gesimuleerd, waardoor de bodemtemperatuur direct rondom de buis niet de evenwichtssituatie bereikt. Dit heeft invloed op de berekende temperatuur in het riool. Het verschil tussen de gemiddelde temperatuur van de eerste 2 en laatste 2 dagen bij de doordeweekse dagen in de voorjaar/herfst situatie is berekend. Het verschil tussen deze twee gemiddelde temperaturen is op locatie 1; 0,6°C en op locatie 4; 1,1°C. De berekende temperaturen en winbare potenties zijn (zeker de eerste paar gemodelleerde dagen) onderschat. Zeker bij rioleringsbuizen waar veel inwonerequivalenten op zijn aangesloten, kan dit effect een belangrijke rol spelen, zoals ook kan worden opgemaakt uit de afvlakking van de pieken op locatie 4, Figuur 15.



Figuur 29. Temperatuur op het grensvlak tussen rioolbuis en bodem, onderkant buis op verschillende locaties in de Danswijk, voorjaar/herfst, vijf weekdagen, tijd staat op de x-as, temperatuur tussen rioolbuis en bodem op de y-as. Het gaat niet om de absolute waarden of de verschillen, maar dat er na enkele dagen een evenwichtssituatie ontstaat.

4.4.1.3 Berekeningswijze winbare hoeveelheid energie

Hoeveel energie er kan worden gewonnen is afhankelijk van de eigenschappen van de warmtewisselaar, zoals onder andere de grootte, het materiaaltype, het medium en de medium temperatuur. Deze aspecten zijn nu niet meegenomen. Het vermogen van de wisselaar om thermische energie op te nemen is vereenvoudigd benaderd. De representatieve eigenschappen van een TSA zouden beter in beeld kunnen worden gebracht dan in deze studie is gedaan, en dan vooral de temperatuur van het wisselaaroppervlak als gevolg van de temperatuur van het medium dat door de wisselaar stroomt.

4.4.1.4 Effect van hemelwaterafvoer op het temperatuurverloop.

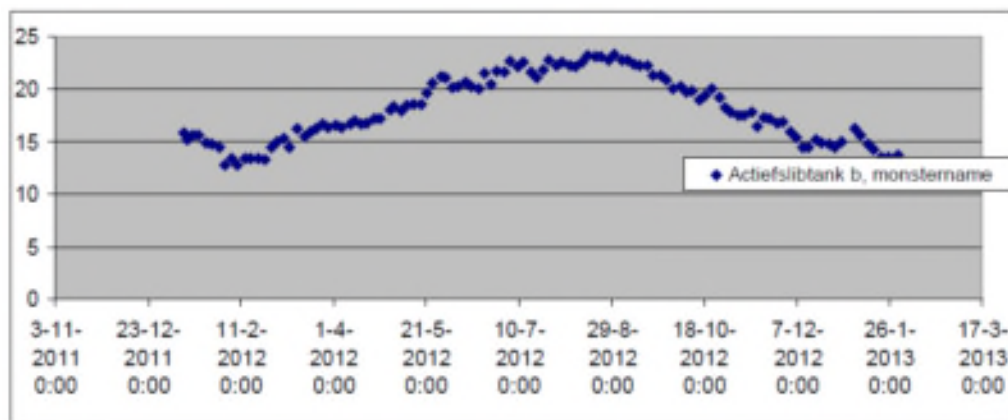
In deze studie is naar droogweerafvoer gekeken. Veel steden hebben een gemengd rioelstelsel waarin hemelwater- en droogweerafvoer (HWA en DWA) worden gemengd en afgevoerd. In een HW-riool heerst dan ook een heel andere stromingsregime; bij droog weer weinig afvoer en veel afvoer bij neerslag. De temperatuurschommelingen zijn ook groter. Mogelijk kan er in de wintermaanden zelfs koelcapaciteit worden aangeboden uit het riool. Vanwege dit perspectief is het interessant om te onderzoeken wat het effect van hemelwater op de potentie voor energiewinning is.

Een rioelwarmtewisselaar kan eigenlijk alleen kostenefficiënt worden aangelegd als het riool toch al wordt vervangen of aangepast. Gezien de landelijke trend in het afkoppelbeleid is het onwaarschijnlijk dat er nog veel gemengde stelsel worden aangelegd, mogelijk alleen in oude binnensteden, waar geen ruimte is voor dubbele infrastructuur. Daarom lijkt het juist interessant om te onderzoeken of er thermische energie kan worden gewonnen of worden afgegeven aan HW-riolen.

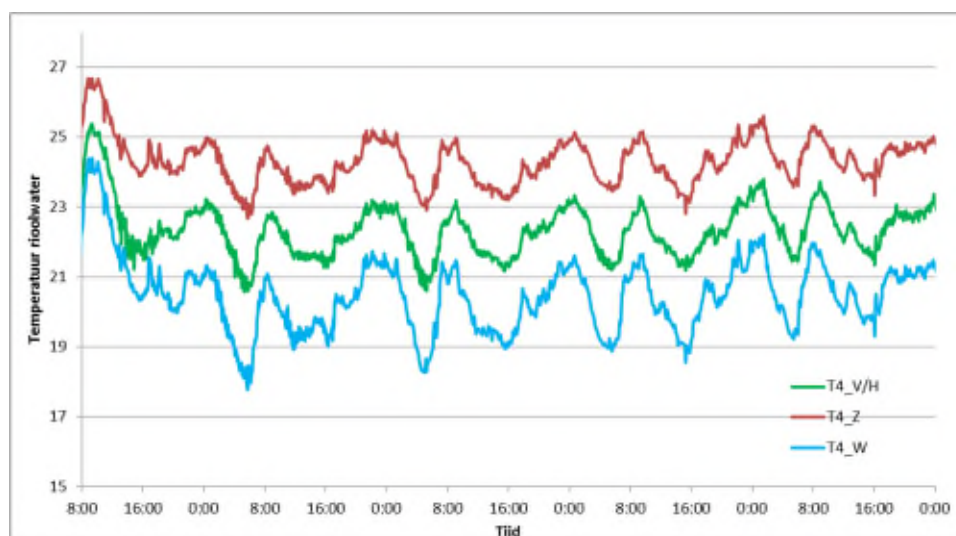
Aan de andere kant kan de potentie om thermische energie te winnen uit een gemengd stelsel een argument zijn om juist niet af te koppelen, dat inzicht is er nu niet, en is daarmee een argument om hier nader onderzoek naar te verrichten.

4.4.1.5 Vergelijking met resultaten Riothermiekansenkaart Tauw

In de kanskaart voor riothermie, die Tauw heeft opgesteld voor Almere, zijn meetgegevens van de temperatuur van het afvalwater in de actiefslibtank van de RWZI van Almere opgenomen, Figuur 30. Om te beginnen zijn deze vergeleken met de gesimuleerde rioolwatertemperaturen op locatie 4 in de Danswijk, Figuur 31. Deze komen niet overeen, het verschil tussen zomer en winter is in de modeluitkomsten kleiner, en het algehele temperatuurniveau in de metingen is lager. Dit kan voor een belangrijk deel worden verklaard door het feit dat de RWZI van Almere aan de andere kant van de stad ligt en dat de persleiding naar de RWZI om de stad heen loopt. Gedurende de tijd die het rioolwater onderweg is door die persleidingen zal het verder afkoelen onder invloed van de bodemtemperatuur. Gezien het effect van een relatief lange leiding (locatie 2) op het temperatuurverloop (Figuur 9, Figuur 10 en Figuur 11) is het aannemelijk dat dit effect een belangrijke rol speelt bij de verklaring van het waargenomen temperatuurverschil. Of het rioolwater zo ver afkoelt dat de temperaturen overeenkomen met de metingen is echter onbekend. De berekende temperaturen traden op in de vrij verval riolen met huisaansluitingen. Vanaf locatie 4 in de Danswijk komt het rioolwater in persleidingen, de thermische overdracht in een persleiding gedraagt zich anders dan in vrij verval riolen, het relatieve contactoppervlak is anders en ook hydraulische eigenschappen zijn anders.



Figuur 30, Metingen temperatuur afvalwater RWZI Almere [Tauw]



Figuur 31, Temperatuurverloop zomer, voorjaar/herfst, winter locatie 4.

Verder is er gekeken naar het verschil in potentieel winbare energie. De kansenkaart van Tauw begint waar de simulaties in deze studie stoppen, op locatie 4. Volgens Tauw is daar 20-30 kW aan thermische energie te winnen gedurende 16 uur (6:00-22:00). Voor hetzelfde uitgangspunt dat Tauw gebruikt dat het rioolwater met 1°C wordt afgekoeld is volgens deze studie op locatie 4 (Figuur 15) maximaal 23 kW aan thermische energie te winnen, maar alleen gedurende de piekafvoer. Rekening houdend met de overige berekeningsmethodes komt de indicatie van Tauw overeen met het resultaat met de kanttkening dat deze potentie niet de hele periode tussen 6 en 22 uur kan worden gewonnen, maar alleen tussen 8 en 9 uur en tussen 16 en 20 uur, op de weekdays. Gedurende het weekend is het vermogen iets lager en verschuiven de uren enigszins.

Het uitgangspunt om te kijken vanaf hoofdleidingen lijkt op basis van de uitgevoerde simulaties legitiem, bij riolen waarop minder dan 2500 inwonerequivalenten zijn aangesloten valt er praktisch lastig warmte te winnen.

4.4.2 Warmte winning uit drinkwater

4.4.2.1 Temperatuurgrenzen voor bewaking waterkwaliteit

Om dat er geen juridische kaders zijn voor de temperatuur van het drinkwater tussen pompstation en aansluiting is gekozen voor een praktisch minimum van 1°C en een maximum van 25°C wat gebaseerd is op het juridische maximum bij het leveringspunt (aansluiting). In praktijk is het niet duidelijk met hoeveel graden de temperatuur van het drinkwater op verschillende locaties benedenstroom het pompstation veranderd kan worden zonder dat er waterkwaliteitsproblemen ontstaan. In de casus waarbij de praktische winbaarheid onderzocht is was sprake van een temperatuurverschil van 5 tot 8°C (variërend per locatie). Met het oog op de waterkwaliteit is het op dit moment onduidelijk of dit wel of niet acceptabel is, of dat er juist potentie blijft liggen omdat er meer gewonnen kan worden door een hoger temperatuurverschil tussen drinkwater en tegenstroom.

4.4.2.2 Verhouding volumestroom in waterleiding en tegenstroom in TSA

Een kleine tegenstroom (gelijk aan minimum volumestroom in de waterleiding 's nachts) levert een constant vermogen omdat de volumestroom in de waterleiding op elk moment groter is dan de tegenstroom. Nadeel hiervan is dat een groot deel van de potentie onbenut blijft. Dit kan opgelost worden door de tegenstroom groter te maken. Nadeel hiervan is dat de fluctuaties in vermogen toenemen. Wanneer de tegenstroom even groot is als de volumestroom in de waterleiding zal de fluctuatie in vermogen ongeveer even groot zijn als de fluctuatie in de drinkwater volumestroom.

4.4.2.3 Optimale locatie warmtewisselaar

Het vermogen per aansluiting in de casestudie Almere (8 locaties) blijkt niet veel te variëren per aansluiting. Een warmtewisselaar af pompstation levert daarmee in absolute zin het hoogste vermogen omdat hier de volumestroom maximaal is. Er wordt dan echter niet optimaal gebruik gemaakt van de thermische invloed van de bodem op het drinkwater. Door de invloed van de bodem op het drinkwater zal de temperatuur van het drinkwater vanaf het pompstation in benedenstroomse richting in de winter afnemen en in de zomer juist toenemen. Dat betekent dat er op een grotere afstand van het pompstation een groter temperatuurverschil ontstaat tussen het drinkwater en de warme of koude bron van de tegenstroom. Door verder van het pompstation energie te onttrekken of toe te voegen wordt dus beter gebruik gemaakt van de thermische potentie van de bodem. Het nadeel is echter dat de volumestroom op deze locatie wellicht kleiner zal zijn dan vlak na het pompstation vanwege tussenliggende aftakke leidingen. Het verdient aanbeveling om verder

onderzoek te doen naar het effect van bodemparameters op de optimale positie van de warmtewisselaar.

In deze studie is uitgegaan van een homogene bodem. In werkelijkheid is dit uiteraard niet het geval. Een betere studie van de bodem en de effecten hiervan op het drinkwater in de transportleiding kunnen een beter licht werpen op het vermogen wat gewonnen kan worden aan het einde van de transportleiding (ingaaande het distributienet). In het distributienet zelf zal het water vrij snel de bodemtemperatuur aannemen omdat de warmtecapaciteit van het drinkwater klein is ten opzichte van de bodem en de stroomsnelheden veel lager liggen dan in het transportnet. In het distributienet kan het temperatuurverschil dus maximaal benut worden. Nadeel is dat hier de volumestroom kleiner en minder constant is.

4.4.2.4 Bepalen aantal aansluitingen achter winlocatie

Om het winbare vermogen en jaarlijkse energieopbrengst per aansluiting of inwoner te bepalen is een methode gebruikt om het aantal aansluitingen achter de winlocatie te bepalen. Doordat er in Almere sprake is van een klassiek vermaasd ontwerp, is de stromingsrichting van het water in het net niet overal eenduidig. Daarom kan het aantal aansluitingen achter een winlocatie alleen geschat worden (zie bijlage III). Wanneer dezelfde studie toegepast wordt op een vertakt ontwerp (zogenaamd zelfreinigend net) zal nauwkeuriger bepaald kunnen worden wat de opbrengsten per aansluiting of inwoner zijn.

4.4.2.5 Berekeningswijze winbare hoeveelheid energie

Hoeveel energie er kan worden gewonnen is afhankelijk van de eigenschappen van de warmtewisselaar; o.a. grootte, materiaaltype, medium, mediumtemperatuur, etc. De representatieve eigenschappen van een TSA zouden beter in beeld kunnen worden gebracht dan in deze studie is gedaan. Het vermogen van de wisselaar om thermische energie op te nemen is benaderd met de *Effectiveness-NTU methode*, een algemeen gangbare methode uit de literatuur [Çengel, 2003]. Hoewel hierbij gangbare waarden gebruikt zijn, is er bijvoorbeeld geen rekening gehouden met de ontwikkeling van biofilm op de warmtewisselaar (fouling). In praktijk zal hierdoor het winbare vermogen in de tijd afnemen, doordat de interne weerstand van de wisselaar toeneemt. Wanneer platenwisselaars met pakkingen toegepast worden, kunnen de platen wel achteraf uitgenomen worden voor reiniging. Dit zal dan operationele kosten met zich meebrengen waarvan nu niet duidelijk is hoe hoog deze zijn en met welke frequentie ze zullen voorkomen.

5 Algemene methode GIS-kaart

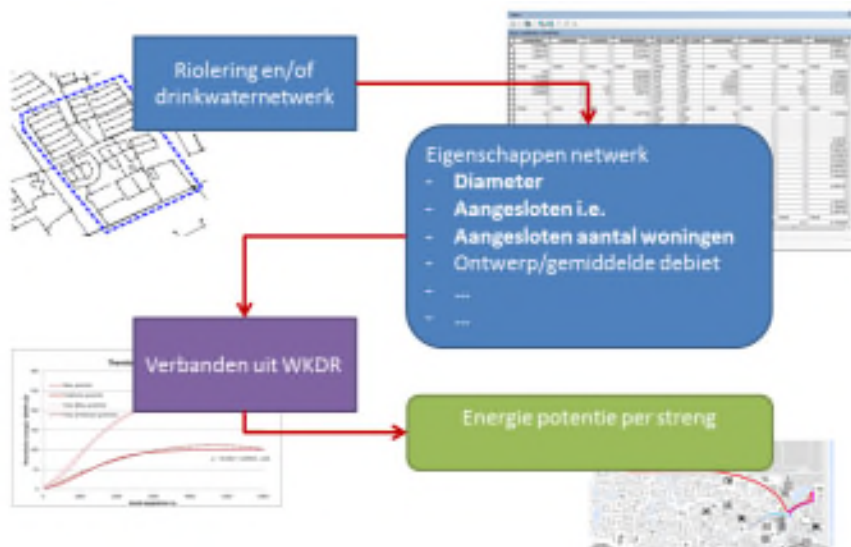
In dit hoofdstuk is (in de vorm van een stappenplan) de methode beschreven waarmee gemeenten en/of waterbedrijven de potentie voor het winnen van thermische energie uit riool of drinkwaterleidingen in een GIS omgeving inzichtelijk kunnen maken.

Het is lastig om het dynamische warmteaanbod te beschrijven met een statische berekeningsmethode.

- De resultaten van de eerder uitgevoerde modelberekeningen worden gebruikt om de beperkingen en kansen als gevolg van de dynamiek in riool en DW-systeem zo goed mogelijk inzichtelijk te maken. Zo blijkt uit deze studie dat er gedurende de dag bij riolering grote variatie is in de potentieel winbare thermische energie.
- Daarnaast is het verloop van de rioolwatertemperatuur en potentieel winbare thermische energie op verschillende plekken bestudeerd. Dat geeft inzicht in de ruimtelijke verdeling van de potentie. Het blijkt dat bij zowel riolering als drinkwater het verloop van de winbare potentie toeneemt naar mate er verder stroomafwaarts wordt gekeken.

De resultaten uit de simulaties zijn veralgemeniseerd en dienen als basis voor GIS-gebaseerde kanskaarten. De kentallen uit de tabellen 7 en 11 in hoofdstuk 4 zijn uitgezet in grafieken waaruit vervolgens functies zijn afgeleid die het verband beschrijven tussen aantal aansluitingen, aangesloten inwoner equivalenten (i.e.) en/of de leidingdiameter. Op basis van de gewenste gegevens en bekende eigenschappen van het netwerk kunnen met deze verbanden de mogelijkheden voor het winnen van thermische energie worden bepaald, zie §5.1 en §5.2.

Gebruikers van de methode voor importeren zelf het netwerk met bijbehorende eigenschappen en georeferentie in GIS. De zogenaamde "attribute table" van GIS wordt uitgebreid met enkele kolommen waarin op basis van vastgestelde relaties de gewenste potentie per leidingsectie kan wordt berekend. Alle bewerkingen kunnen worden uitgevoerd voor zowel riool- als drinkwaterleidingen. De stappen zijn schematisch weergegeven in Figuur 32.

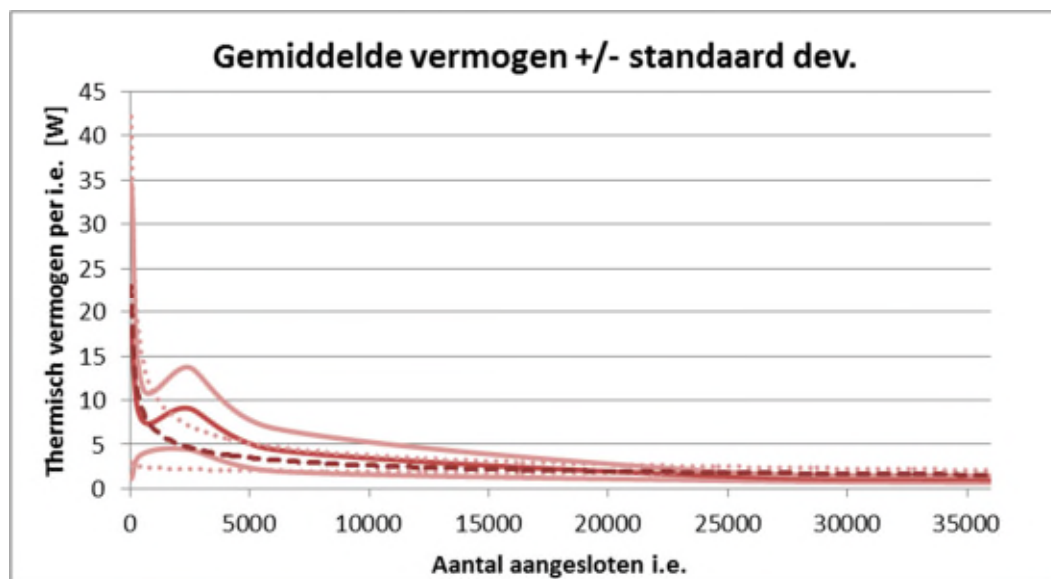


Figuur 32 Schematische weergave aanpak om tot potentie kaart te komen

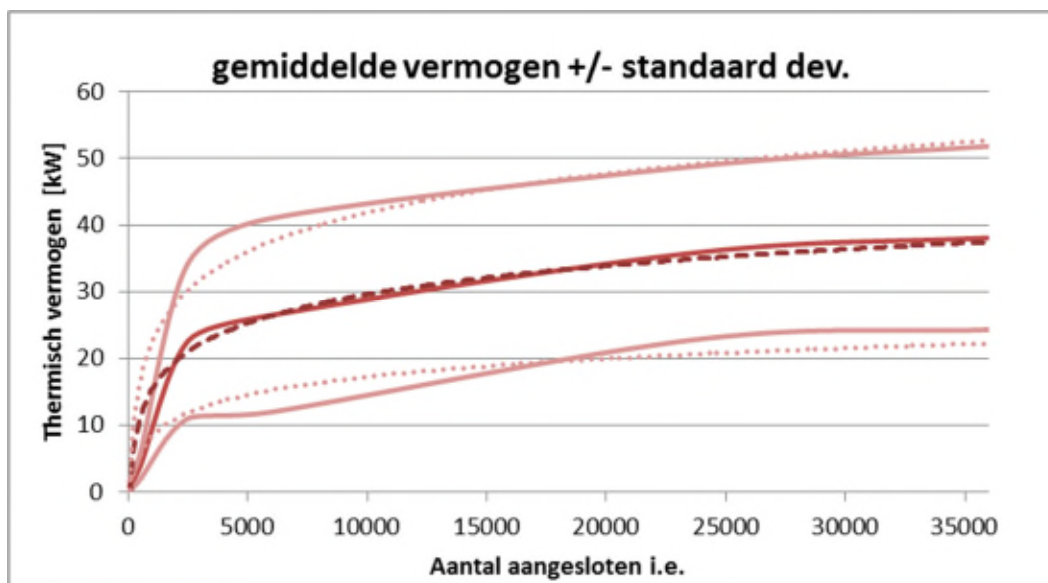
5.1 Verbanden riolering

In onderstaande figuren en Tabel 12 zijn de relaties tussen de eigenschappen van het rioleringsnetwerk en winbaar energetisch potentieel opgenomen. De figuren geven globaal het verloop van de potentie aan bij veranderende eigenschappen. Hierin zien we duidelijk terug wat eerder in dit rapport is geconcludeerd: bij meer aangesloten woningen of i.e.'s neemt het winbare vermogen en energie per i.e. af, maar neemt het totale winbare vermogen en de winbare energie per jaar toe.

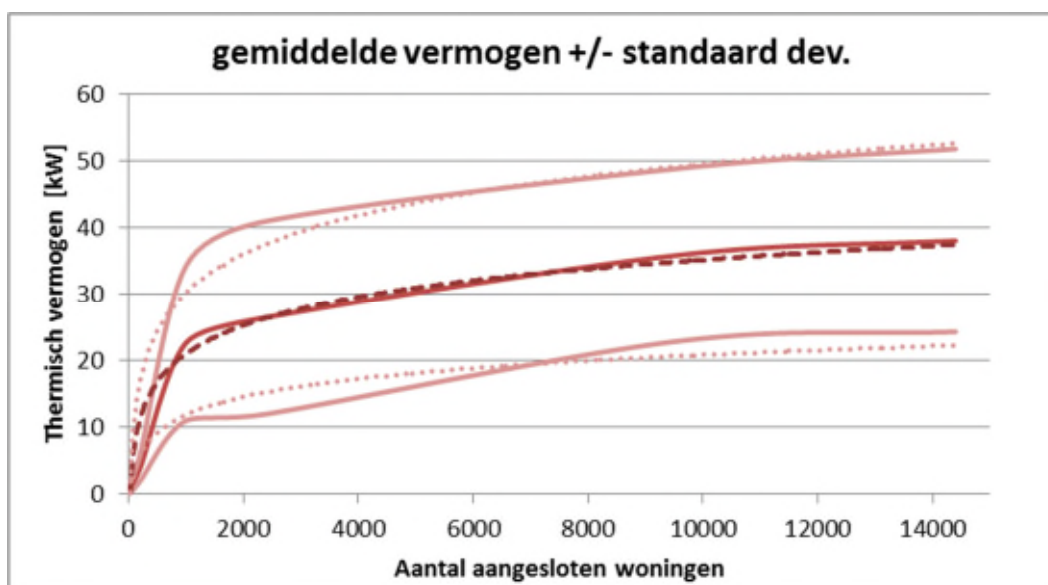
In Tabel 12 zijn de formules voor de verschillende relaties opgenomen. Met deze uitdrukkingen kan de (spreiding in) potentie voor elk willekeurig gescheiden rioolstelsel inzichtelijk worden gemaakt. Door deze formules te koppelen aan GIS-bestanden met eigenschappen van rioolstelsels kunnen zo potentie kaarten worden gemaakt.



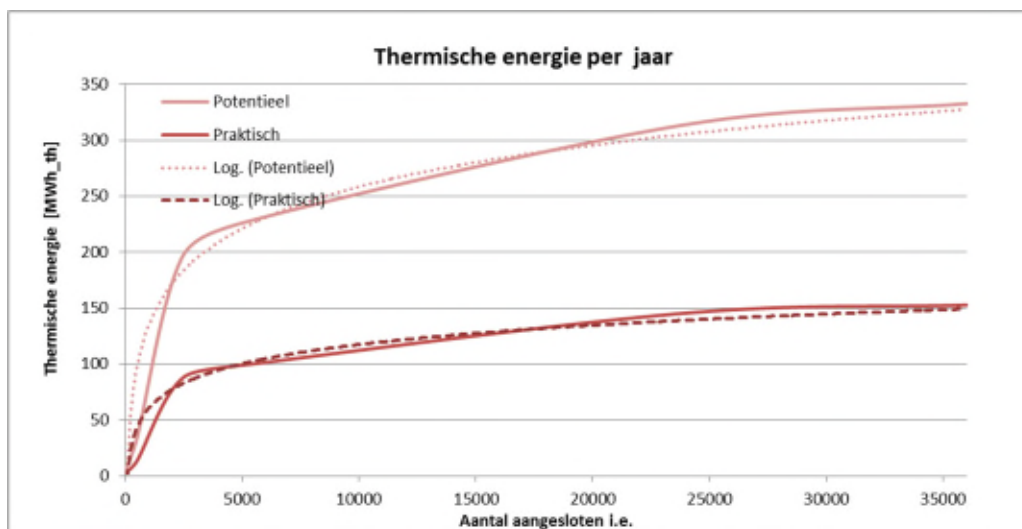
Figuur 33 Riolering; relatie aangesloten i.e. en winbaar vermogen/ i.e.



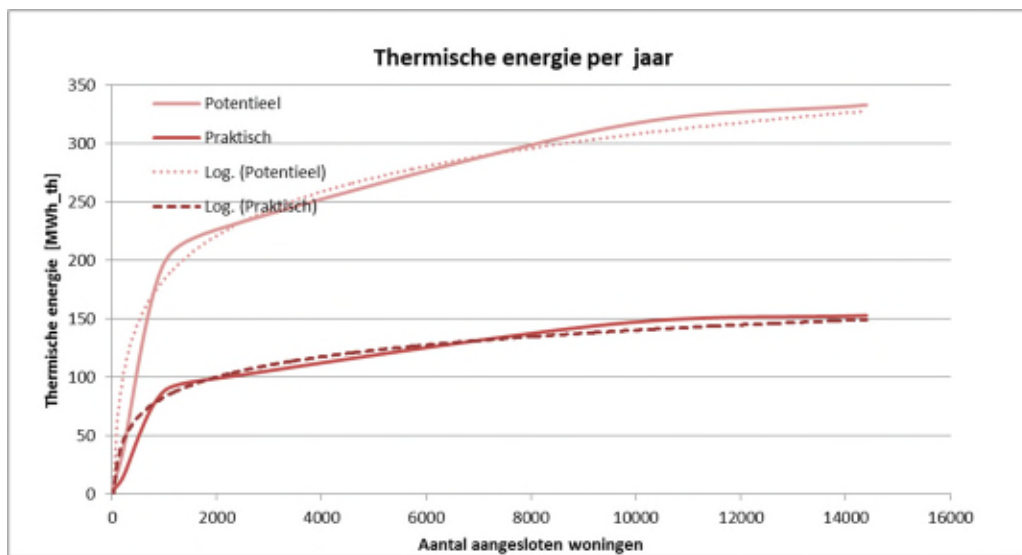
Figuur 34 Riolering; relatie aangesloten i.e. en winbaar vermogen



Figuur 35 Riolering; relatie aangesloten woningen en winbaar vermogen



Figuur 36 Riolering; relatie aangesloten i.e. en winbare energie.



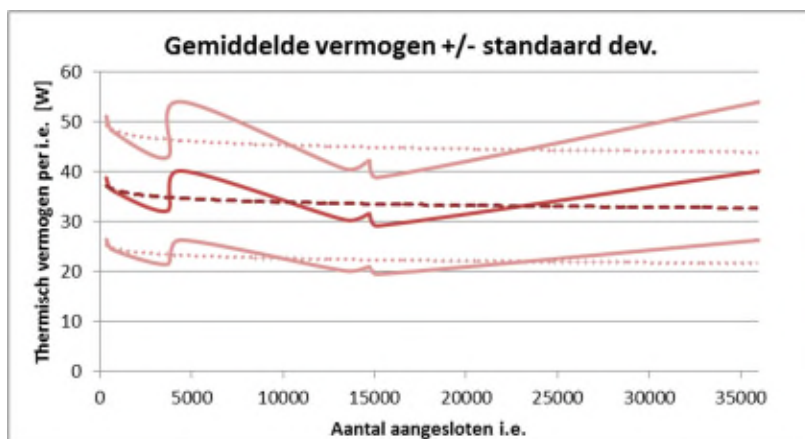
Figuur 37 Riolering; relatie aangesloten woningen en winbare energie.

TABEL 12. UITDRUKKINGEN POTENTIE RIOLERING

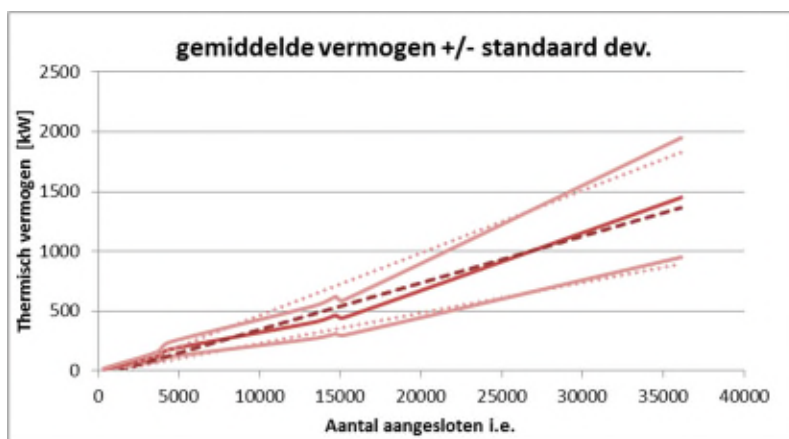
Symbolen	
P = Vermogen [kW]	
E = Energie [MWh/jaar]	
n = aangesloten inwoner aantal [i.e.]	
a = aansluitingen [aantal woningen]	
subscripts:	
gem = gemiddelde	
+ = gemiddelde + standaard afwijking	
- = gemiddelde - standaard afwijking	
prak = praktisch winbaar	
pot = potentieel winbaar	
Vermogen	$P_{gem} = 6,1645 \ln(n) - 27,196$ $P_{+} = 8,4242 \ln(n) - 35,72$ $P_{-} = 3,9047 \ln(n) - 18,67$ $P_{gem} = 6,1645 \ln(a) - 21,548$ $P_{+} = 8,4242 \ln(a) - 27,999$ $P_{-} = 3,9047 \ln(a) - 15,096$
Energie	$E_{pot} = 53,913 \ln(n) - 238,13$ $E_{prak} = 24,832 \ln(n) - 111,26$ $E_{pot} = 53,913 \ln(a) - 188,74$ $E_{prak} = 24,832 \ln(a) - 88,51$

5.2 Verbanden Drinkwater

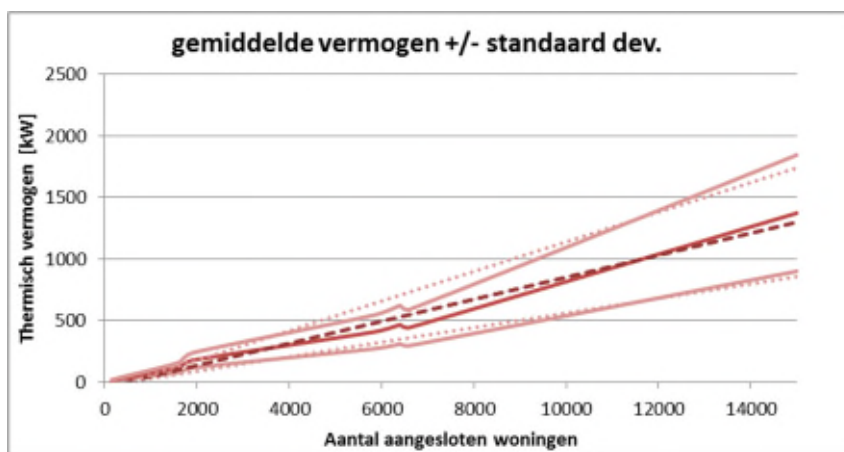
De winbare vermogens zijn te benutten zowel ten behoeve van koeling als verwarming. Zoals uit Tabel 8 en Tabel 10 blijkt zijn de winbare vermogens voor koeling en verwarming nagenoeg gelijk, waarbij het koelvermogen in de winter gelijk is aan het verwarmingsvermogen in de zomer. Bij de energielevering geldt dat de potentiële waarde geldt voor het hele jaar door energie winnen, zowel warmte als koude. Praktisch winbaar geldt alleen voor één seizoen koude of warmte winnen. Als beide worden toegepast, wordt het dubbele aan energie gewonnen.



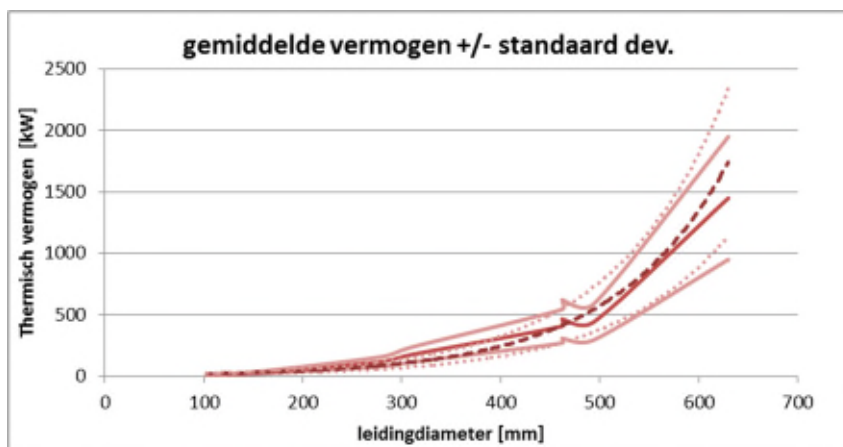
Figuur 38. Drinkwater; relatie aangesloten i.e. en winbaar vermogen/ i.e.



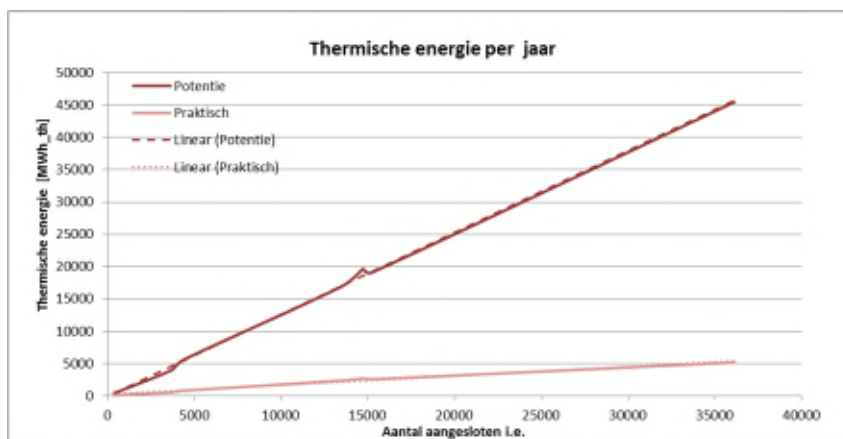
Figuur 39. Drinkwater; relatie aangesloten i.e. en winbaar vermogen



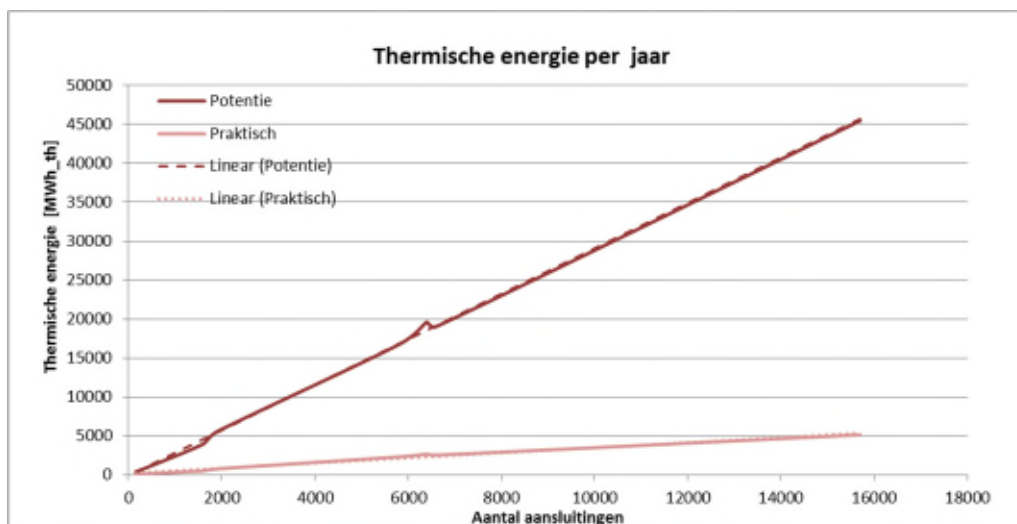
Figuur 40. Drinkwater; relatie aangesloten woningen en winbaar vermogen



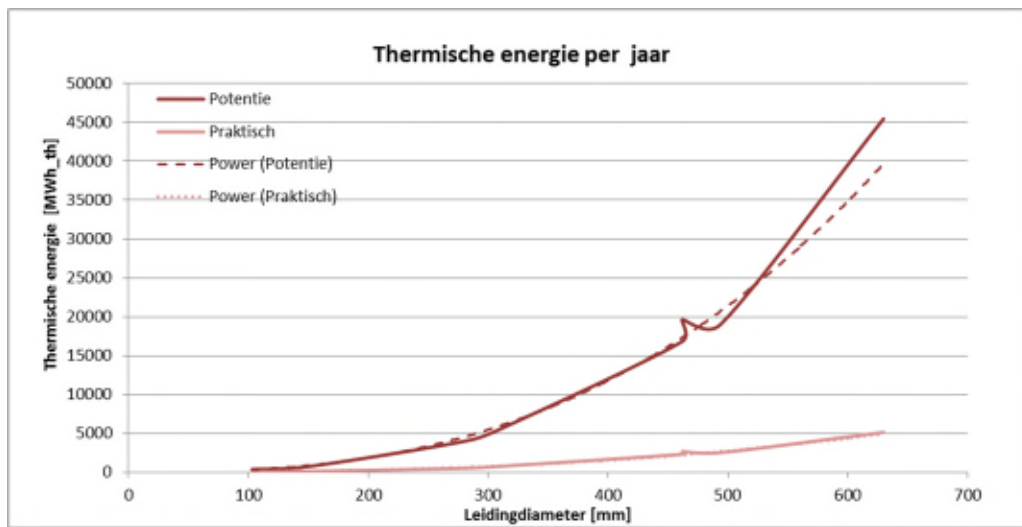
Figuur 41. Drinkwater; relatie leidingdiameter en winbaar vermogen



Figuur 42. Drinkwater; relatie aangesloten i.e. en winbare energie.



Figuur 43. Drinkwater; relatie aangesloten woningen en winbare energie.



Figuur 44. Drinkwater; relatieve leidingdiameter en winbare energie.

TABEL 13. UITDRUKKINGEN POTENTIE DRINKWATER

<u>Symbolen</u>	
P = Vermogen [kW]	
E = Energie [MWh/jaar]	
n = aangesloten inwoner aantal [i.e.]	
a = aansluitingen [aantal woningen]	
d = leidingdiameter [mm]	
<u>subscripts:</u>	
gem = gemiddelde	
+ = gemiddelde + standaard afwijking	
- = gemiddelde - standaard afwijking	
prak = praktisch winbaar	
pot = potentieel winbaar	
Vermogen	$P_{gem} = 0,0389 n + 43,768$ $P_{+} = 0,0523 n + 60,465$ $P_{-} = 0,0255 n + 27,071$ $P_{gem} = 0,0896 a - 43,768$ $P_{+} = 0,1204 a - 60,465$ $P_{-} = 0,0587 a - 27,071$ $P_{gem} = 7,9471 e^{0,086d}$ $P_{+} = 10,5 e^{0,086d}$ $P_{-} = 5,3943 e^{0,086d}$
Energie	$E_{pot} = 1,2695 n - 101,07$ $E_{prak} = 0,1457 n + 150,71$ $E_{pot} = 2,9198 a - 101,07$ $E_{prak} = 0,3351 a + 150,71$ $E_{pot} = 0,0013 d^{2,672}$ $E_{prak} = 0,0004 d^{2,5493}$

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

Het doel van de casestudie was tweeledig:

1. Het verkrijgen van inzicht in de variatie van de winbare thermische energie of beschikbare koelcapaciteit tijdens verschillende jaargetijden en op verschillende locaties in de stad
2. Het inventariseren van de mogelijkheden om een tool te ontwikkelen waarmee de variatie van de winbare thermische energie en beschikbare koelcapaciteit in de stad geografisch gevisualiseerd kan worden.

Het onderzoek heeft het inzicht in de dynamiek voor het winnen van thermische energie of voor de beschikbare koelcapaciteit vergroot. Het is gebleken dat de potentie voor het winnen van energie uit drinkwater minder varieert dan voor rioolwater. Dichtbij de afnemers is de grootte van het vermogen en de hoeveelheid energie die kan worden gewonnen ongeveer even groot. Nabij de RWZI kan er echter veel minder energie worden gewonnen dan nabij een reinwaterkelder. Door de waterkwaliteit is het praktisch gezien ook gemakkelijker om energie te winnen uit drinkwater (gebruik van platenwisselaars). Beleidsmatig / bacteriologisch is er echter onzekerheid en daardoor nog beperking in welke mate de temperatuur van het drinkwater mag worden veranderd.

De potentie voor energiewinning met riothermie blijkt heel locatiespecifiek. Uit riolen met veel aansluitingen kan energie worden gewonnen, maar de meeste energie gaat alsnog verloren door de hoge stroomsnelheden. De resultaten laten heel duidelijk zien dat de ambitie om de thermische energie die tijdens het gebruik aan het water wordt toegevoegd weer terug te winnen, het beste zo dicht mogelijk bij het gebruik wordt gerealiseerd.

Het onderzoek heeft ook een aantal kentallen opgeleverd waarmee een tool kan worden gemaakt om de beschikbare warmte of koelcapaciteit als geografische informatie zichtbaar kan worden gemaakt.

6.1.1 Conclusies warmte uit riool

De belangrijkste conclusies ten aanzien van warmtewinning uit het riool zijn behandeld in hoofdstuk 4 en hier puntsgewijs en beknopt weergegeven.

- Het beschikbare vermogen en daarmee de winbare energie fluctueert sterk over de dag.
- Bij lange stukken leiding (> 100m) zonder aansluitingen is de rioolwatertemperatuur gevoeliger voor de temperatuurcondities van de omliggende bodem.
- Vanaf circa 5.000 aangesloten inwonerequivalenten lijkt het zinvol om energiewinning uit afvalwater te overwegen (vanuit energetisch/technisch perspectief, financieel is niet beschouwd).
- De combinatie met WKO lijkt een logische keuze, qua temperatuur niveau en seizoencyclus sluit dat ook goed aan.

6.1.2 Conclusies warmte en koude uit drinkwaterleidingen

De temperatuur van het drinkwater fluctueert nauwelijks over de dag. Het potentieel vermogen wordt daarom voornamelijk bepaald door de (zeer variabele) volumestroom van

het drinkwater en de locatie van de TSA (afstand tot pompstation). Hoewel er theoretisch in zomer en winter beide warmte en koude gewonnen kan worden uit het drinkwater ligt het, met het oog op waterkwaliteit, voor de hand om warmte te winnen in de zomer (drinkwater koelt af) en koude te winnen in de winter (drinkwater warmt op). De combinatie met bijvoorbeeld een WKO ligt hierbij voor de hand. Ook omdat opgeslagen koude en warmte hierbij gebruikt kunnen worden voor lokale warmte- en koudevragen.

Voor het koelen en verwarmen van drinkwater kunnen platenwisselaars ingezet worden waarmee een zeer hoge effectiviteit (>80%) gehaald kan worden wanneer het oppervlak van de wisselaar en de totale warmteoverdrachtscoëfficiënt voldoende groot zijn.

Wanneer een platenwisselaar gebruikt wordt met voldoende groot oppervlak en voldoende kleine interne weerstand, de drinkwatertemperatuur nauwelijks varieert en de tegenstroom uit water bestaat met een constante temperatuur is de grootte van de tegenstroom bepalend voor het vermogen wat geleverd kan worden. Wanneer de volumestroom van het drinkwater kleiner wordt dan de tegenstroom neemt het geleverde vermogen sterk af. Een kleine verhouding tussen tegenstroom en drinkwater levert een constant, maar laag vermogen. Een grote verhouding tussen tegenstroom en drinkwater levert een groot, maar tevens sterk wisselend vermogen.

Doordat niet duidelijk is welk temperatuurverschil tussen drinkwater en tegenstroom acceptabel is blijft er in de toekomst mogelijk potentie liggen (te laag temperatuurverschil) of ontstaan er juist risico's met betrekking tot de waterkwaliteit (te hoog temperatuurverschil).

6.2 Aanbevelingen voor vervolg onderzoek

6.2.1 Mogelijkheden voor aanvulling/uitbreiding

Almere heeft een gescheiden rioolstelsel. Hemelwater is vaak koud en daarom kan het interessant zijn om te onderzoeken in hoeverre ook daaruit energie of koelcapaciteit kan worden verkregen. Dit is voor zover bekend niet eerder gedaan en vormt daarmee een kennishiaat. Gezien de verwachting dat bij rioolvervanging veelal gescheiden stelsels worden aangelegd is het beter om ook hemelwaterrioleringen apart te beschouwen op hun energiepotentie.

6.2.2 Verbetering temperatuur berekeningen

De berekeningen en afgeleide relaties in dit rapport zijn gebaseerd op een enkelvoudige casestudie in Almere. Om beter gevoel te hebben voor de grootte van potentie en variatie is het van belang om de studie uit te breiden naar andere steden en typen systemen. Om robuustere relaties af te kunnen leiden en voor meer verschillende situaties relaties beschikbaar te hebben, worden volgende acties aanbevolen:

- Langere simulaties en/of betere beginwaarde temperatuur rondom riool. (beginwaarden in bodem rond buis is bewerkelijk door opbouw van SOBEK, dus beter om langere simulaties te nemen)
- Representatieve eigenschappen TSA in buiswand nader onderzoeken
- Beter inzicht in potentie warmte winning i.r.t. aangesloten aantal i.e.
 - verder benedenstrooms kijken
 - meer punten in de wijk bestuderen
 - Andere wijken / steden berekenen
- De potentie is bepaald voor vrij verval rioleringen en persleidingen. Ondanks het verschil in type leiding en berekeningswijze zit er weinig verschil tussen de berekende potenties

en volgt de persleiding berekening goed de verwachte trend o.b.v. de berekeningen van de vrij verval riolering. Hier was een verschil verwacht. Om meer grip te krijgen op de potentie en berekeningswijze van verschillende type leidingen zijn daarom gedetailleerde studies t.a.v. rioolpersleidingen nodig.

6.2.3 Effect op potentie benedenstrooms van winning

Rekening houden met het feit dat als op één plek energie wordt onttrekken, dat de potentie benedenstrooms verandert. Dit effect is beperkt inzichtelijk gemaakt in de berekeningen voor riolering en moet beter worden uitgewerkt. Dit is ook nog niet meegenomen in de verbanden benodigd om de potentie uit te rekenen.

6.2.4 Inpassing TSA's bij energiewinning uit drinkwaterleidingen

Voor dit onderzoek is op een aantal locaties de praktisch winbare hoeveelheid energie berekend. Hierbij zijn aannamen gedaan over de grootte en andere eigenschappen van de tegenstroom. De vraag blijft welke keuzes in de praktijk het beste zijn om een warmtewisselaar zo in te zetten dat de potentie uit drinkwater maximaal wordt benut. Het gaat dan om keuzes op het gebied van:

- grootte tegenstroom;
- thermische eigenschappen tegenstroom;
- financiële haalbaarheid van installaties.

Vooral het laatste punt is sterk afhankelijk van de locatie van de wisselaar en de warmte- en koudevragen ter plaatse. Om duurzame energie uit drinkwater maximaal financieel te benutten is meer kennis nodig van de optimale locatie van een warmtewisselaar:

- aanbod optimum: dit is de locatie van de wisselaar waarbij de bodemenergie maximaal benut kan worden;
- vraag optimum: dit is de locatie waar de warmte- en/of koudevraag maximaal is.

Beide optima dienen verder onderzocht te worden om uit te vinden op welke plekken het beste geïnvesteerd kan worden om de baten uit duurzame energie te maximaliseren.

6.2.5 Welke energievraag past goed bij aanbod patroon uit riolering en drinkwaterleidingen

Er is nog veel onduidelijkheid over kentallen van warmte- en koude vragen. Voor een optimaal beeld waar drinkwater ingezet kan worden voor koeling (zomer) of verwarming (winter).

6.2.6 Definities voor temperatuurgrenzen nodig

Juridisch gezien bestaat er alleen een temperatuurgrens bij het leveringspunt (25°C). Daarnaast wordt een praktische grens gehanteerd voor de minimumtemperatuur: het drinkwater mag niet bevriezen. Verder onderzoek is nodig naar de effecten van temperatuurfluctuaties op de kwaliteit van het drinkwater op verschillende locaties benedenstrooms van het pompstation.

7 Literatuur

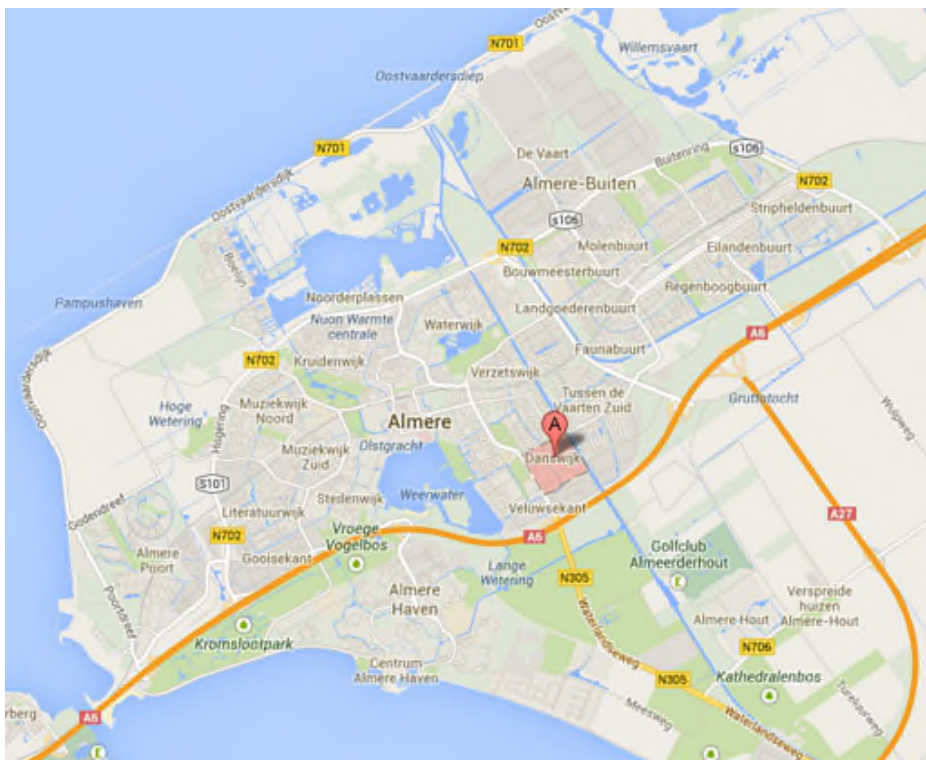
- Blokker, E.J.M. (2010). Stochastic water demand modelling for a better understanding of hydraulics in water distribution. PhD thesis.
- Blokker, E.J.M. (2011). Temperatuur drinkwater Almere. KWR 2011.026. Nieuwegein: KWR.
- Blokker, E.J.M., Vreeburg, J.H.G., van Dijk, J.C. 2010. Simulating residential water demand with a stochastic end-use model. Journal of Water Resources Planning and Management, 136(1), 19-26.
- Buckman PERFORMANCE CHEMICALS Biofilms, Buckman Laboratories International, Inc. All rights reserved. 2010
- CBS (2013). <http://www.cbs.nl/> geraadpleegd; December 2013.
- Çengel, Y.A. (2003). Heat transfer: a practical approach. New York, McGraw Hill Higher Education.
- Funke. Plate heat exchangers (brochure, 2014).
- Hofman, J., Wols, B., Elias-Maxil, J. en Boderie, P. (2014). Warmte uit het riool. BTO 2014.004, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.
- Meer met Bodemenergie (MMB), hoofdstuk 8; autonome opwarming van de bodem, 2012
- Versteegh, A. (2014). Gebruik van drinkwater voor levering van warmte en duurzame koeling. Persoonlijke communicatie.
- Wärmerückgewinnung aus Abwasser, Oskar Wanner, Eawag/Empa Bibliothek, Dübendorf, 2009
- Tauw, Workshop en kansenkaart Riothermie Flevoland, 2013
- TNO, Dinoloket geraadpleegd; December 2013.

Bijlage I

Aanvullende informatie bij modellering

Gebiedsbeschrijving

In de Danswijk (Figuur) staan voornamelijk woningen, er wonen circa 6.000 mensen in de Danswijk. Er ligt een gescheiden rioolstelsel, zodat er alleen rekening gehouden moet worden met droogweerafvoer in de riolen.



Figuur Ligging van de Danswijk

Resultaten 2 weekenddagen

De resultaten van de 2 weekenddagen vertonen grote overeenkomsten met die van de 5 weekdays. Het temperatuurniveau en grootte van de winbare potentie gedurende het weekend is van gelijke grootte als door de week. Daarom worden de resultaten verder niet behandeld

Belangrijkste verschil met de 5 weekdays is dat het verloop tussen de ochtend en avondpiek minder sterk terugloopt. In Tabel 1 zijn de algemene kentallen voor het potentieel winbare vermogen weergegeven (gemiddelde van 'P1' en 'P2').

TABEL 1. RESULTATEN WINBAAR VERMOGEN IN RIOOLWATER, GEMIDDELTE VAN P1 EN P2, 2 WEEKENDDAGEN

	Locatie	1	2	3	4	eenheid
winter	gemiddelde temperatuur	22,1	16,7	20,0	20,0	C
	gemiddeld vermogen	0,7	3	20	24	kW
	st.dev. / gemiddeld	0,91	0,56	0,49	0,59	-
	vermogen/inwoner	16	5	8	4	W
Voorjaar/herfst	gemiddelde temperatuur	23,4	19,5	22,0	21,5	C
	gemiddeld vermogen	0,8	4	26	29	kW
	st.dev. / gemiddeld	0,92	0,50	0,49	0,50	-
	vermogen/inwoner	18	8	10	5	W
zomer	gemiddelde temperatuur	24,7	22,3	24,1	24,0	C
	gemiddeld vermogen	0,9	6	31	36	kW
	st.dev. / gemiddeld	0,92	0,51	0,50	0,47	-
	vermogen/inwoner	20	11	12	6	W

Energie voor bereiding warmtapwater bij maximale benutting koude en warmte

Bij het onttrekken van warmte aan de leiding wordt mogelijk de temperatuur van het drinkwater bij de aansluitingen van eindgebruikers beïnvloed. Dit hangt voornamelijk af van de leidinglengte tussen warmtewisselaar en aansluitingen, de verblijftijd in deze leidingen en de verandering van temperatuur ter plaatse van de warmtewisselaar. De hoeveelheid energie per aansluiting per eenheid van volume benodigd voor de bereiding van warmtapwater bij toepassing van warmtewisselaars op de locaties 1-2 en 3-4 is vergeleken met de uitgangssituatie (geen warmtewisselaar). Hiermee kan beoordeeld worden in hoeverre de warmtewisselaars de temperatuur van het drinkwater ter plaatse van de aansluiting beïnvloeden.

De energie die per aansluiting nodig is voor de bereiding van warm tapwater wordt berekend middels de volgende vergelijking:

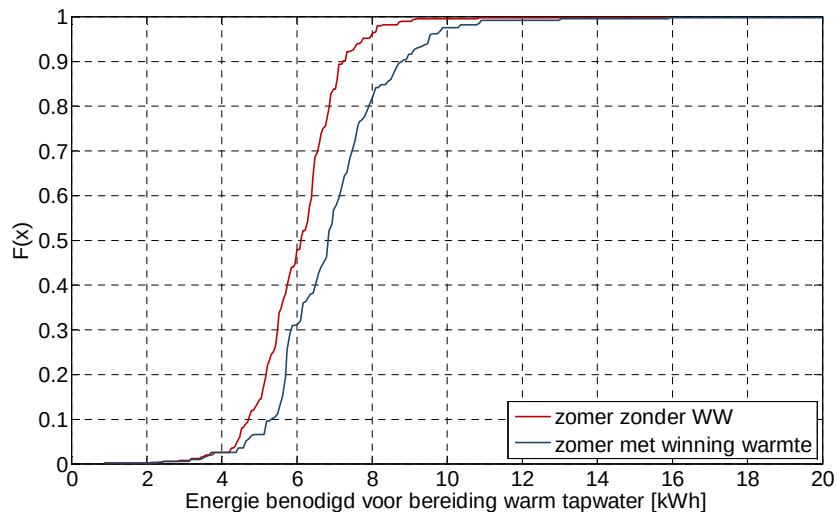
$$E_t = \frac{\frac{1}{\eta} Q (T_{\text{warm}} - T) c_p \rho j}{3,6 \cdot 10^6 N} \quad \text{Vergelijking 8}$$

E_t	=	energie benodigd voor bereiding warmtapwater per volume eenheid [kWh]
Q	=	volumestroom waterverbruik op knoop ⁶ [m ³ /s]
η	=	rendement warmtapwaterbereiding [-]
T_{warm}	=	temperatuur van warm water [°C]
T	=	temperatuur water in distributienet [°C]
j	=	fractie van volumestroom dat verwarmd wordt [-]
N	=	aantal aansluitingen per knoop [-]

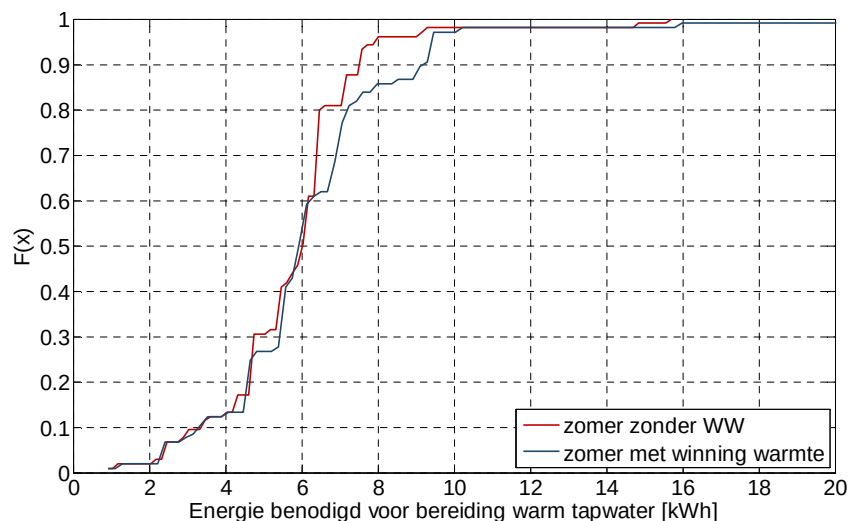
Uitgegaan wordt van $T_{\text{warm}} = 40^\circ\text{C}$, een volumestroompercentage (j) van 60% en een rendement (η) van 80% [Blokker, 2011]. In de T_{warm} van 40°C zijn de verschillende

⁶ Eén knoop kan meerdere aansluitingen bevatten.

warmtevragen in de huishoudens verdisconteerd. De specifieke warmte van water bedraagt 4185 J/(kg.K) en de dichtheid 1000 kg/m^3 . In Figuur 45 en Figuur 46 is het energieverbruik per aansluiting weergegeven voor de locaties 1 en 2 en de locaties 3 en 4 wanneer warmte gewonnen wordt in de zomer.



Figuur 45. Cumulatieve frequentie energieverbruik alle aansluitingen in Danswijk voor bereiding warm tapwater in zomer (inzet warmtewisselaars voor warmtewinning op locaties 1 en 2 uitgaande van maximale vermogenspotentie (P1b)).



Figuur 46. Cumulatieve frequentie energieverbruik alle aansluitingen in Danswijk voor bereiding warm tapwater in zomer (inzet warmtewisselaars op locaties 3 en 4 uitgaande van maximale vermogenspotentie (P1b)).

Bijlage II

Lozingen naar het riool

Om de lozingen naar het riool te bepalen, wordt SIMSEM (SIMulation of SEwerage production Model) gebruikt (rapport in voorbereiding). Er wordt een conversie van de watervraag, berekend met SIMDEUM, gedaan om de volumestroom te bepalen. Bovendien wordt de temperatuur per tappunt meegenomen om de temperatuur van de volumestroom te bepalen. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen doordeweekse en weekenddagen.

Het simulatiemodel SIMDEUM gebruikt informatie per tappunt (aanwezigheid in huishouden, volumestroom, duur, frequentie van gebruik en verbruik over de dag) en informatie over de gebruikers (leeftijd, geslacht en verwacht waterverbruik over de dag) (Blokker, 2010).

Het lozen naar het riool is berekend voor Danswijk in Almere. Voor de simulaties met SIMDEUM is er geen specifieke informatie over het watergebruik thuis bekend. Daarom is de informatie voor een gemiddeld huishouden gebruikt. De gemiddelde grootte, voor de simulaties, is 2.6 (CBS, 2013). Er zijn 6001 inwoners in het gebied, met een huisgrootte van 2.6 komt dat neer op ca. 2300 huishoudens. Tabel 1 laat de statistische informatie over de samenstelling van huishoudens in Danswijk zien.

TABEL 1. SAMENSTELLING VAN HUISHOUDENS IN DANSWIJK.

		One person households	Two person households	Families with children
Number of people per household		1	2	3.3 (on average)
Number of households (%)		51	30	19
Gender division: Male / Female (%)		49 / 51	50 / 50*	50 / 50*
Age division (%)	Children (0-12 years old)	0	3	20
	Teens (13 – 18 years old)	0	2	18
	Adults (19 – 64 years old)	72	65	61
	Subdivision: % of adults with out-of-home job		Both persons: 39	Both parents: 59
		Male: 56	Only male: 12	Only father: 21
		Female: 44	Only female: 8	Only mother: 2
			Neither person: 41	Neither parent: 18
Seniors (> 65 years old)		28	30	1

SIMDEUM berekent de dagelijkse patronen per connectie per seconde en de SIMSEM lozingpatronen zijn dus ook per seconde gegenereerd. Voor deze studie met zeven dagen analyse is besloten om een 5 minuten interval te gebruiken. De koud watertemperatuur is vastgesteld op 12.5°C. Voor elk tappunt is de lozing temperatuur bepaald, zie Tabel 2.

Voor het toilet is aangenomen dat de duur van de lozing vergelijkbaar is met de vulling, in werkelijkheid is de lozing korter. Dit heeft geen invloed op de volumestromen per 5 minuut interval. Bovendien wordt door de samenvoeging van de lozing van meerdere huizen de vertraging minder relevant omwille van de stochastische aard van de individuele patronen.

TABEL 2. GEMIDDELD WATERGEBRUIK EN LOZINGTEMPERATUUR PER TAPPUNT

Tappunt	Gemiddeld Water gebruik (l/p d)	Lozing temperatuur (°C)
Bad	4,1	36
Wastafel	4,0	40 / IT**
Vaatwasser	1,7	35
Keukenkraan	13,0	40 / IT**
Douche	43,9	35
WC	21,4	20
Wasmachine	14,2	35-45
Buiten kraan	13,4*	n.v.t.
Total waterverbruik	115,7	
Totaal water lozing	102,3	

* Geen lozing naar het riool

** Voor wastafel en keukenkraan worden zowel de koud als warmwater volumestroom gesimuleerd met SIMDEUM. Voor het koudwater gebruik wordt de ingangstemperatuur (IT) meegenomen als lozingtemperatuur.

***De wasmachine heeft typisch een wasprogramma op 40 °C en 60 °C. De afvoertemperatuur is gemeten als 35 °C en 45 °C respectievelijk voor de eerste afvoer, de 2e en 3e afvoer hebben de temperatuur van het koude water. De ratio 40°C/60°C is 70%/25%.

Een post-processing stap was nodig om de inputbestanden voor SOBEK te genereren. Ten eerste, worden de patronen voor de zeven dagen per connectie gesimuleerd met SIMDEUM. Voor elk SIMDEUM patroon wordt één SIMSEM patroon gegenereerd. Met informatie van connecties per knoop worden de individuele patronen samengevoegd per knoop en per tappunt. Ten tweede, de eindtemperatuur wordt bepaald, gebaseerd op de energiebalans. De energie (E) in het watervolume is: $E = \text{mass} \cdot \Delta t \cdot C_p$, waarin, $C_p = 4.1855 \text{ [J/(g} \cdot \text{K)]}$. Door twee volumestromen te mengen, is de energieafname van een volumestroom hetzelfde als de energietoename van de andere stroom. Dus $\text{mass}_1 \cdot \Delta t_1 \cdot C_p = \text{mass}_2 \cdot \Delta t_2 \cdot C_p$.

Twee series zijn gegenereerd: één voor de weekdays (5 dagen achter elkaar) en één voor de weekenddagen (2 dagen achter elkaar). De output van de simulaties, voor de 171 knopen, wordt in twee bestanden opgeslagen. Twee bestanden worden gegenereerd, één met volumestroom info: "LATERAL1.DAT" in m³/sec, en één met de temperatuurinfo: "BOUNDWQ1.DAT" in °C. SOBEK vereist een datum in de dataserie: voor deze studie is de week van 04 t/m 10 november 2013 gesimuleerd. Hierbij voorbeelden van het format van de twee bestanden.

LATERAL.DAT

```

FLNO id '0-26D0002' sc 0 lt 0 dc lt 1 0 0 PDIN 0 0 " pdin TBLE
'2013/11/04;00:00:00' 0.00013311 <
'2013/11/04;00:05:00' 0.00010642 <
...
...
...
'2013/11/08;23:45:00' 0.00011358 <
'2013/11/08;23:50:00' 3.9315e-05 <
'2013/11/08;23:55:00' 3.36e-05 <
tble flno
FLNO id '0-26D0004' sc 0 lt 0 dc lt 1 0 0 PDIN 0 0 " pdin TBLE
'2013/11/04;00:00:00' 1.5885e-06 <
'2013/11/04;00:05:00' 1.6873e-07 <
...
...
...

```

BOUNDWQ.DAT

```

ITEM
USEFOR 'n0-26D0002' 'n0-26D0002'
ABSOLUTE TIME
CONCENTRATION
USEFOR 'ModTemp' 'ModTemp'
USEFOR 'Check' 'Check'
USEFOR 'Check2' 'Check2'
DATA      'ModTemp'  'Check'  'Check2'
'2013/11/04-00:00:00' 33.8054      1      2
'2013/11/04-00:05:00' 33.0989      1      2
'2013/11/04-00:10:00' 34.0266      1      2
...
...
...
'2013/11/08-23:45:00' 34.8284      1      2
'2013/11/08-23:50:00' 21.3593      1      2
'2013/11/08-23:55:00' 19.5625      1      2
ITEM
USEFOR 'n0-26D0004' 'n0-26D0004'
ABSOLUTE TIME
CONCENTRATION
USEFOR 'ModTemp' 'ModTemp'
USEFOR 'Check' 'Check'
USEFOR 'Check2' 'Check2'
DATA      'ModTemp'  'Check'  'Check2'
'2013/11/04-00:00:00' 27.9      1      2
'2013/11/04-00:05:00' 12.5      1      2
'2013/11/04-00:10:00' 35      1      2
...
...
...

```

Bijlage III

Bepalen aantal aansluitingen drinkwater

Het drinkwater distributienet in het pilotgebied Almere is een vermaasd net. Daardoor is het lastig om exact te bepalen hoeveel aansluitingen zich achter een bepaald punt in het hydraulisch model bevinden. Door het meegeven van een tracer in het hydraulisch model kan onderzocht worden welke knopen in het model water ontvangen van de knoop waar de tracer toegevoegd wordt. Omdat er sprake is van menging van water uit verschillende richtingen komt het water vaak niet voor 100% bij de gekozen tracerknoop vandaan. Er is gekozen om knopen met minder dan 25% water uit de tracernode niet mee te nemen, knopen met 25-75% voor 50% mee te nemen en knopen met meer dan 75% water uit de tracernode voor 100% mee te nemen. Deze analyse is uitgevoerd tijdens het piekmoment van de dag (~8 uur). Deze informatie is gecombineerd met informatie over het aantal aansluitingen per knoop.

Het geschatte aantal aansluitingen achter de 4 locaties in de Danswijk en de locatie af pompstation in Almere Buiten zijn weergegeven in de onderstaande tabel.

TABEL 1. GEGEVENS OVER DE LOCATIES GEBRUIKT IN DE CASESTUDIE.

	Locatie 1	Locatie 2	Locatie 3	Locatie 4	Locatie 5 (Af pompstation Almere Buiten)
>25% < 75%	1725	1701	130	72	13469
> 75%	836	565	216	95	8966
weegfactoren					
	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	1	1	1	1	1
Aantal aansluitingen na weging					
>25% < 75%	863	851	65	36	6735
> 75%	836	565	216	95	8966
Totaal aantal aansluitingen	1699	1416	281	131	15701