



**Eindrapportage TKI Watertechnologie project  
Thermal Energy Recovery from Drinking Water  
(TERDW)**

**TKI Watertechnologie project 2015TUD003**



<b>Penvoerder:</b>	<b>TU Delft</b>
<b>Auteur:</b>	<b>Jan Peter van der Hoek</b>
<b>Projectpartners:</b>	<b>Waternet</b>
<b>Projecttitel:</b>	<b>Thermal Energy Recovery from Drinking Water (TERDW)</b>
<b>Topsector:</b>	<b>Water &amp; Maritiem</b>
<b>TKI:</b>	<b>Watertechnologie</b>
<b>Startdatum project:</b>	<b>01-11-2015</b>
<b>Einddatum project:</b>	<b>31-12-2019</b>



## Inhoudsopgave

Inhoudsopgave .....	2
Inleiding .....	3
Opzet van het onderzoek .....	4
WP1: literatuurstudie en ontwerp/bouw pilotplant met meetstrategie en –programma .....	4
WP2: pilotplant onderzoek.....	4
WP3: full-scale metingen en analyse .....	4
Leeswijzer .....	5
Resultaten WP1: literatuurstudie en ontwerp/bouw pilotplant met meetstrategie en –programma...	6
Resultaten WP2: pilotplant onderzoek .....	9
Effect koude onttrekking op niet gechlloreerd water .....	9
Effect koude onttrekking op gechlloreerd water .....	9
Resultaten WP3: full-scale metingen en analyse .....	11
Energiebesparing en reductie CO <sub>2</sub> emissie .....	11
Full-scale metingen bij Sanquin.....	14
Temperatuurmetingen .....	14
Waterkwaliteitsmetingen.....	16
Conclusies.....	21
Literatuur.....	22

## Inleiding

Drinkwaterbedrijven streven naar verlaging van hun klimaat voetafdruk. Dat doen de drinkwaterbedrijven door reductie van energieverbruik en/of het gebruik van duurzame energie (Van der Hoek 2012; Frijns et al 2008). Ook worden maatregelen genomen om het gebruik van grond- en hulpstoffen te beperken, om over te stappen naar grond- en hulpstoffen met een geringere CO<sub>2</sub> uitstoot en om grondstoffen terug te winnen en opnieuw te gebruiken (Van der Hoek et al 2016).

Een mogelijkheid die voor drinkwaterbedrijven aantrekkelijk kan zijn is het winnen van thermische energie uit drinkwaterleidingen, waarbij de teruggewonnen energie ingezet kan worden als alternatief voor fossiele brandstof. Door klimaatverandering neemt de maximum- en minimumtemperatuur van gedistribueerd water toe respectievelijk af. Dit speelt vooral bij het gebruik van oppervlaktewater als bron voor drinkwater. Deze ontwikkeling vergroot de potentie van thermische energiewinning uit drinkwater.

### *Probleemstelling*

Door thermische energie uit drinkwaterleidingen te winnen verandert de temperatuur van het water: bij koude-onttrekking stijgt de temperatuur, bij warmte-onttrekking daalt de temperatuur. Onbekend is of deze temperatuursprong een effect heeft op de drinkwaterkwaliteit. In Nederland geldt in ieder geval een maximumtemperatuur van drinkwater aan de tap van 25 °C (Drinkwaterbesluit 2011).

Het project heeft zich gericht op het verwerven van kennis over:

- De mate waarin thermische energiewinning effect heeft op de (microbiologische) drinkwaterkwaliteit;
- De maximale temperatuursprong waarbij geen onaanvaardbare (microbiologische) kwaliteitsveranderingen optreden.

Om deze doelen te bereiken stonden de volgende vragen centraal in het onderzoek:

- Welke parameters dragen bij thermische energiewinning bij aan de verandering van microbiologische kwaliteit en biologische stabiliteit van het drinkwater?
- Hoe verandert de microbiologische samenstelling van het drinkwater door thermische energiewinning? Is er een verschil in effect tussen bulkwater en biofilm op de leidingwand?
- In welke mate beïnvloedt thermische energiewinning de aanwezigheid en/of groei van (opportunistische) pathogene bacteriën?

In Nederland wordt, in tegenstelling tot veel andere landen, drinkwater gedistribueerd zonder chloor (Van der Kooij et al 1995). Dat heeft een effect op de microbiologische samenstelling en de biologische stabiliteit van drinkwater. De onderzoeksresultaten voor de Nederlandse situatie zijn daarom waarschijnlijk niet direct te vertalen naar omstandigheden waarin wel gebruik gemaakt wordt van een rest chloorgehalte tijdens transport en distributie. Daarom is ook onderzocht in welke mate gechloord drinkwater zich anders gedraagt dan niet gechloord water tijdens thermische energiewinning.

## Opzet van het onderzoek

Het onderzoek is uitgevoerd in drie werkpakketten (WP):

- WP1: literatuurstudie en ontwerp/bouw pilotplant met meetstrategie en –programma
- WP2: pilotplant onderzoek
- WP3: full-scale metingen en analyse

### WP1: literatuurstudie en ontwerp/bouw pilotplant met meetstrategie en –programma

In dit WP1 is gestart met een literatuurverkenning om bestaande kennis over de relatie tussen drinkwaterkwaliteit en temperatuur te inventariseren en te gebruiken voor het ontwerp van een pilotplant en het opzetten van een meetstrategie en -programma. In deze fase is tevens de pilotplant gebouwd.

### WP2: pilotplant onderzoek

Het pilotplant onderzoek is uitgevoerd op twee lokaties. Het eerste deel van het pilotplant onderzoek is uitgevoerd in het laboratorium van de sectie Gezondheidstechniek van de afdeling Watermanagement van de faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen van de Technische Universiteit Delft. Het tweede deel van het pilotplant onderzoek is uitgevoerd in het technologisch laboratorium Leiduin van Waternet op de productielokatie Leiduin te Vogelenzang. In de pilotplantopstellingen is zowel de kwaliteit van het water gevolgd, alsook de ontwikkeling van biofilm op de leidingwand.

### WP3: full-scale metingen en analyse

Waternet en Sanquin (de bloedbank in Amsterdam) beheren en bedrijven gezamenlijk een installatie voor thermische energiewinning uit drinkwater. Er wordt koude uit een drinkwatertransportleiding van Waternet gewonnen, deels voor direct gebruik bij Sanquin (koeling) en deels voor opslag in een WKO (warmte koude opslag). In de zomer wordt deze opgeslagen koude gewonnen en gebruikt door Sanquin voor koeling.

De installatie is gedurende een periode van drie opeenvolgende winters gevolgd door de microbiologische kwaliteit van het drinkwater te meten in het ingaande en uitgaande drinkwater van de warmtewisselaar, het centrale deel van de installatie. Tevens is er een eerste analyse gemaakt hoeveel energie bespaard wordt en hoeveel CO<sub>2</sub>-uitstoot wordt vermeden met dit systeem als alternatief voor conventionele koelmachines.

## Leeswijzer

Het onderzoek is gerapporteerd in een aantal publicaties en één rapport:

- Hoek J.P. van der, Mol S., Giorgi S., Imtiaz Ahmad J., Liu G., Medema G. (2018). Energy recovery from the water cycle: Thermal energy from drinking water. *Energy* 162, 977-987 (doi:10.1016/j.energy.2018.08.097).
- Imtiaz Achmad J., Liu G., Wielen P.W.J.J. van der, Medema G., Hoek J.P. van der (2020a). Effects of cold recovery technology on the microbial drinking water quality in unchlorinated distribution systems. *Environmental Research* 183, 109175, 1-9 (doi: 10.1016/j.envres.2020.109175).
- Zhou X., Ahmad J.I., Hoek J.P. van der, Zhang K. (2020). Thermal energy recovery from chlorinated drinking water distribution systems: Effect on chlorine and microbial water and biofilm characteristics. *Environmental Research* 187, 109655, 1-10 (doi: 10.1016/j.envres.2020.109655).
- Imtiaz Ahmad J., Dignum M., Liu G., Medema G., Hoek J.P. van der (2020b). Changes in biofilm composition and microbial water quality in drinking water distribution systems by temperature increase induced by thermal energy recovery (under review).
- Imtiaz Ahmad J., Liu G., Wielen P.W.J.J. van der, Medema G., Hoek J.P. van der. Assessing the influence of temperature on succession of bacterial communities within biofilm of unchlorinated drinking water distribution systems (submitted).
- Imtiaz Ahmad J., Giorgi S., Zlatanovic L., Liu G., Medema G., Hoek J.P. van der. Drinking water distribution networks: an emerging resource for thermal energy recovery (submitted).
- Votel M., Dignum M. (2020). Thermische energie uit drinkwater – Temperatuurmetingen koudelevering Sanquin. Rapport Waternet, nr. 20.022797, 12 augustus 2020, Amsterdam.

In de volgende hoofdstukken worden deze documenten gebruikt om per werkpakket de resultaten kort te presenteren. De gedetailleerde achtergrondinformatie is te raadplegen in de achterliggende documenten.

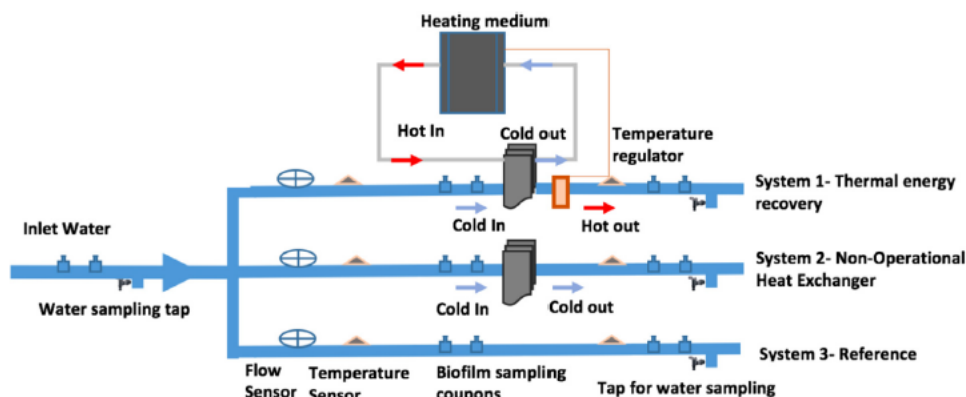
In het laatste hoofdstuk worden de eindconclusies van het onderzoek gepresenteerd.

## Resultaten WP1: literatuurstudie en ontwerp/bouw pilotplant met meetstrategie en –programma

In (Imtiaz Ahmad et al 2020a) en (Imtiaz Ahmad et al 2020b) is een uitgebreid literatuuronderzoek opgenomen naar de invloed van temperatuur op de microbiologische waterkwaliteit en biofilm ontwikkeling in drinkwater distributiesystemen (DWDS). Drinkwatermicrobiologie en biofilm ontwikkeling in DWDS is uitgebreid beschreven in de literatuur. Het effect van temperatuur op drinkwatermicrobiologie en vooral biofilm ontwikkeling in DWDS is niet uitgebreid beschreven. Studies met rivierwater als onderwerp laten een versnelde microbiologische ontwikkeling zien bij verhoogde temperatuur. Recent is een rapport uitgebracht door KWR Water Research Institute naar de invloed van temperatuur op groei van opportunistische ziekteverwekkers in drinkwater (Van der Wielen 2020).

Bij koude onttrekking uit drinkwater stijgt de temperatuur van het drinkwater. De beperkte kennis over het effect van zo'n instantane temperatuursprong op de microbiologische waterkwaliteit en biofilm vorming vereist pilotplant onderzoek.

De pilotplant die is gebruikt in het onderzoek is schematisch weergegeven in Figuur 1.



Figuur 1. Pilotplant opstelling voor het meten van het effect van koudewinning uit drinkwater op de microbiologische waterkwaliteit en biofilm ontwikkeling.

Parallel zijn drie systemen bedreven. Systeem 1 simuleert een DWDS met een operationele warmtewisselaar: het drinkwater stroomt door een PVC-leiding en via een warmtewisselaar wordt een temperatuurverhoging gecreëerd. In systeem 2 is ook een warmtewisselaar gemonteerd, maar deze is niet operationeel en resulteert niet in een temperatuurverhoging. Met systeem 2 kan het effect van het additionele contactoppervlak nagegaan worden dat gecreëerd wordt met een warmtewisselaar. Systeem 3 is als referentie gebruikt: geen temperatuurverhoging, en ook geen additioneel contactoppervlak via de warmtewisselaar. Als toevoerwater is water uit het openbare drinkwaternet gebruikt: dat is Evides water voor de pilotopstelling in Delft, en Waternet water voor de opstelling in Leiden. Via de warmtewisselaar is de temperatuur van het water verhoogd naar 25 °C en naar 30 °C.

De opstellingen in Delft en in Leiden zijn weergegeven in Figuur 2 en Figuur 3.



Figuur 2. Pilotplant opstelling in Delft.



Figuur 3. Pilotopstelling in Leiduin.



Zowel de waterfase als de biofilm is uitgebreid gemonitord op microbiologische parameters. De waterfase is geanalyseerd op Heterotrophic Plate Count 22 °C (koloniegetal), *Aeromonas* spp., *Legionella* spp., adenosine triphosphate (ATP), en total cell count (TCC). De microbiologische samenstelling is geanalyseerd via DNA extractie en 16S rRNA gene sequencing. De waterfase is bemonsterd aan de influentzijde van de pilotplant en aan de effluentzijde van de pilotplant voor alle drie de systemen. Daarnaast werd de waterfase geanalyseerd op standaard parameters zoals DOC (dissolved organic carbon) en pH. In de experimenten met gechloord water werd het vrij chloor geanalyseerd.

Met sensoren werd temperatuur en flow continu gemonitord.

De biofilm is bemonsterd door coupons in te bouwen in elk systeem: leidingelementen die verwijderd kunnen worden uit het systeem ten behoeve van analyse van de biofilm. De biofilm is geanalyseerd op Heterotrophic Plate Count, *Aeromonas* spp., *Legionella* spp., adenosine triphosphate (ATP), total cell count (TCC). De microbiologische samenstelling is geanalyseerd via DNA extractie en 16S rRNA gene sequencing.

Alpha diversity en beta diversity werden gebruikt om de microbiologische samenstelling nader te beschrijven. qPCR werd toegepast om specifieke bacteriën te identificeren (*Legionella anisa*, *Mycobacterium kansasii*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Stenotrophomonas maltophilia* Chit A) en protozoa (*Vermamoeba vermiformis*). Source tracking is toegepast om microbiologische samenstelling in influent (waterfase), biofilm en effluent (waterfase) te relateren.

De duur van alle experimenten was 21 weken of langer om biofilm vorming goed te kunnen monitoren.

## Resultaten WP2: pilotplant onderzoek

### Effect koude onttrekking op niet gechlloreerd water

Het effect van koude onttrekking uit niet gechlloreerd water op microbiologische waterkwaliteit en biofilm ontwikkeling is beschreven in:

- Imtiaz Achmad J., Liu G., Wielen P.W.J.J. van der, Medema G., Hoek J.P. van der (2020a). Effects of cold recovery technology on the microbial drinking water quality in unchlorinated distribution systems. *Environmental Research* 183, 109175, 1-9 (doi: 10.1016/j.envres.2020.109175).
- Imtiaz Ahmad J., Dignum M., Liu G., Medema G., Hoek J.P. van der (2020b). Changes in biofilm composition and microbial water quality in drinking water distribution systems by temperature increase induced by thermal energy recovery (under review).

In het pilotplant onderzoek in Delft (Imtiaz Achmad et al 2020a) is gebruik gemaakt van Evides water en is de temperatuur van het water via de warmtewisselaar verhoogd naar 25 °C. De experimentele periode betrof een duur van 38 weken. In dit onderzoek werden slechts minimale effecten in de waterfase waargenomen. De aanwezigheid van *Pseudomonas* spp. en *Chryseobacterium* spp. toonde een lichte stijging van 0,4% naar 2,4% en van 0,1% naar 2,1% respectievelijk. Van de met qPCR gevolgde micro-organismen vertoonde alleen *S. maltophilia* een zeer geringe stijging (van  $2 \times 10^2$  naar  $1.5 \times 10^3$  gene copies/l). Er werd geen effect waargenomen op opportunistische pathogenen. Wel werden verschillende ontwikkelingen in de biofilm waargenomen: de hogere temperatuur resulteerde in een hogere biomassa-hoeveelheid, een lagere diversiteit en een andere bacteriële samenstelling. Dit had echter geen effect op de waterkwaliteit.

In het pilotplant onderzoek in Leiduin (Imtiaz Achmed et al 2020b) is gebruik gemaakt van Waternet water en is de temperatuur via de warmtewisselaar verhoogd naar 25 °C en 30 °C. De experimentele periode betrof een duur van 33 weken. Uit dit onderzoek is gebleken dat een verhoogde temperatuur met name effect heeft op de snelheid van biofilm vorming. Koude onttrekking had geen negatief effect op de microbiologische waterkwaliteit.

### Effect koude onttrekking op gechlloreerd water

Het effect van koude onttrekking uit gechlloreerd water op microbiologische waterkwaliteit en biofilm ontwikkeling is beschreven in:

- Zhou X., Ahmad J.I., Hoek J.P. van der, Zhang K. (2020). Thermal energy recovery from chlorinated drinking water distribution systems: Effect on chlorine and microbial water and biofilm characteristics. *Environmental Research* 187, 109655, 1-10 (doi: 10.1016/j.envres.2020.109655).

Dit pilotplant onderzoek is uitgevoerd in Delft. Gebruik is gemaakt van Evides water waaraan chloor (0,1 mg/l Cl<sub>2</sub>) en AOC (assimileerbare organische koolstof, 50 µg/l Ac-C) is toegevoegd om gechlloreerd water te simuleren. De temperatuur van het water werd verhoogd naar 25 °C. De experimentele periode besloeg een periode van 21 weken. Ook in dit onderzoek resulteerde een verhoogde temperatuur in versnelde biofilm ontwikkeling, maar vergeleken met de niet gechlorde experimenten was de biofilm vorming veel lager, waarschijnlijk door de aanwezigheid van chloor. Chloor resulteerde echter in een hogere relatieve aanwezigheid van de chloor-resistente genera

*Pseudomonas* en *phingomonas* ten opzicht van de niet gechlorde systemen. De verhoogde temperatuur bevorderde de groei van *Pseudomonas* spp. en *Legionella* spp. in de biofilm.

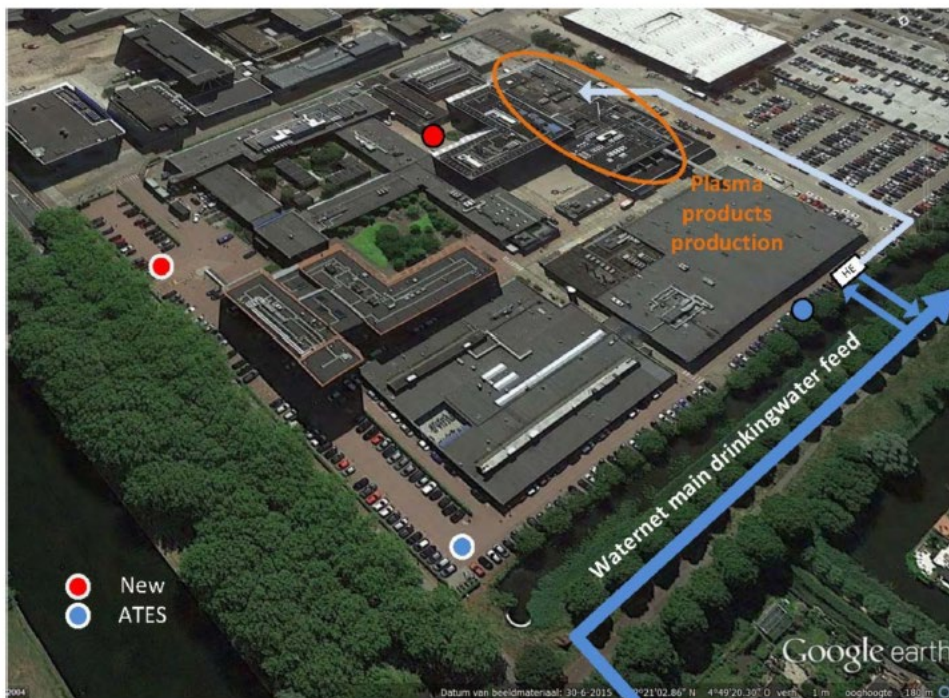
## Resultaten WP3: full-scale metingen en analyse

### Energiebesparing en reductie CO<sub>2</sub> emissie

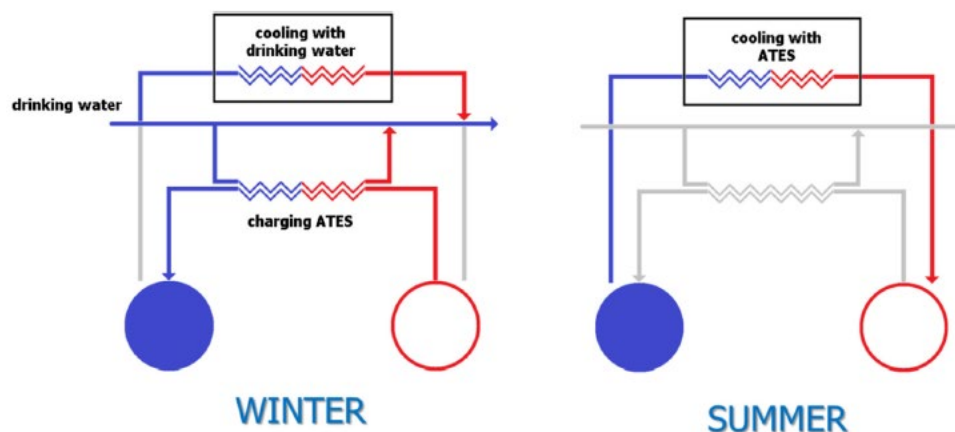
De energiebesparing en reductie in CO<sub>2</sub> emissie die bereikt kan worden in een specifieke praktijktoepassing is beschreven in:

- Hoek J.P. van der, Mol S., Giorgi S., Imtiaz Ahmad J., Liu G., Medema G. (2018). Energy recovery from the water cycle: Thermal energy from drinking water. Energy 162, 977-987 (doi:10.1016/j.energy.2018.08.097).
- Imtiaz Ahmad J., Giorgi S., Zlatanovic L., Liu G., Medema G., Hoek J.P. van der. Drinking water distribution networks: an emerging resource for thermal energy recovery (submitted).

De full-scale toepassing betreft koude levering door Waternet aan de bloedbank Sanquin in Amsterdam. De koude wordt gebruikt voor het koelen van bloedplasma producten en vervangt traditionele koelmachines. Door combinatie met een WKO systeem kan koude in de winter worden opgeslagen en in de zomer worden gebruikt. Figuur 4 toont de situatie bij Sanquin en Figuur 5 het principe van de koudelevering gedurende het hele jaar.



Figuur 4. Levering van koude door Waternet aan Sanquin via drinkwater.



Figuur 5. Principe van koudelevering gedurende winter en zomer met gebruik van koude-warmte opslag (WKO).

Uitgaande van de actuele temperatuur van het inkomende drinkwater in de warmtewisselaar, en een maximale temperatuur van het drinkwater na koudelevering van 15 °C, is de reductie in energieverbruik en CO<sub>2</sub> emissie bepaald. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 1.

Tabel 1. Reductie in energieverbruik en CO<sub>2</sub> emissie door toepassing van koude uit drinkwater bij Sanquin.

	Elektriciteitsverbruik (MWh/jaar)	CO <sub>2</sub> emissie (Ton CO <sub>2</sub> -eq/jaar)
Traditionele koelmachines	1725	966
Koelen met drinkwater	172,5	97

De besparing in kosten die bereikt wordt, berekend volgen de methode Total Cost of Ownership, is weergegeven in Tabel 2.

Tabel 2. Total Cost of Ownership (TCO) van twee koelsystemen bij Sanquin.

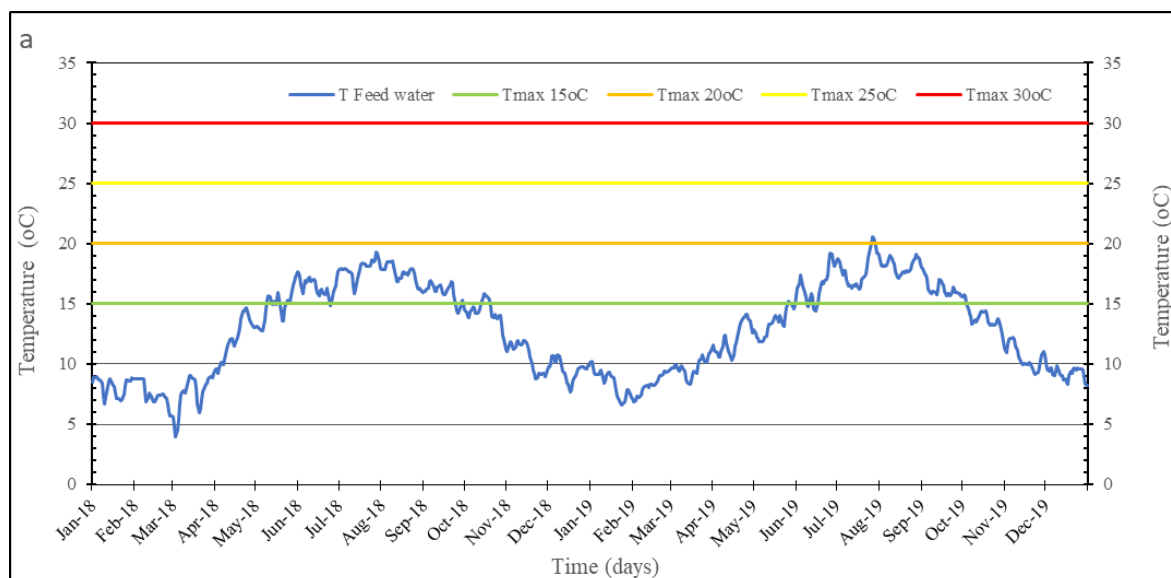
	Traditionele koelmachines	Koelen met drinkwater
Vorbereidingskosten (€)	80.000	222.191
Kapitaalkosten (€)	3.670.717	6.223.697
Onderhoudskosten (€)	3.330.025	2.575.355
Operationele kosten (€)	4.137.944	196.635
Totale kosten (€)	11.218.686	9.217.875
TCO (miljoen €)	8,2	6,8

Koelen met drinkwater levert in deze specifieke case een substantiële besparing in elektriciteitsverbruik, resulteert in een aanzienlijke reductie van CO<sub>2</sub> emissie, en is goedkoper dan koelen met gebruik van traditionele koelmachines.

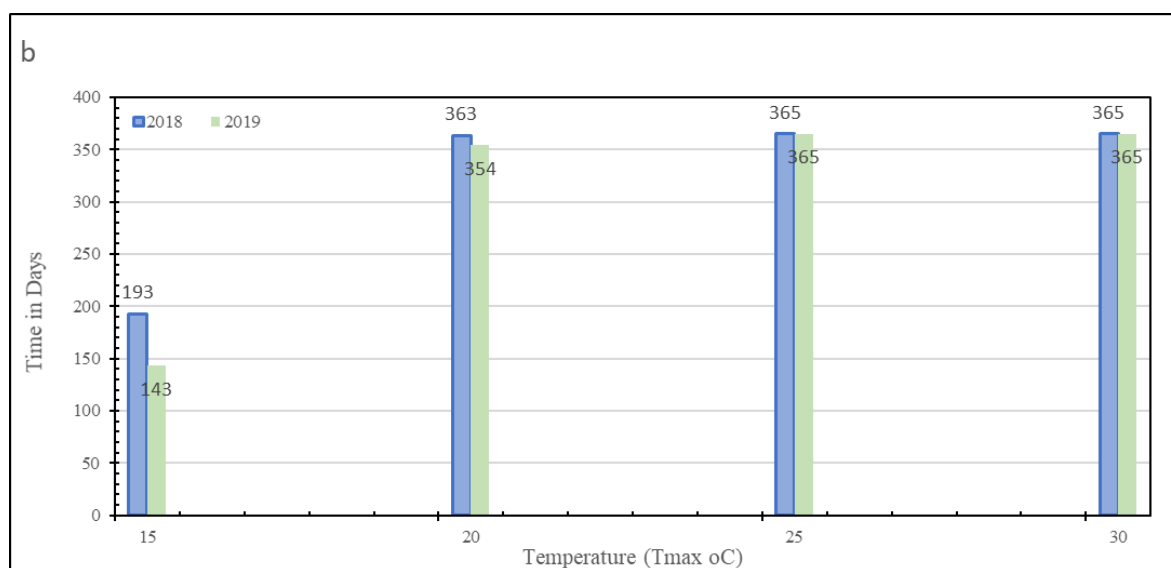
De koudelevering aan Sanquin werd gelimiteerd door een begrenzing van de temperatuur van het drinkwater na koudelevering op 15 °C. Deze grens is gesteld om eventuele problemen met de microbiologische waterkwaliteit te voorkomen. Gebruik wordt gemaakt van drinkwater bereid uit oppervlaktewater, waarvan de temperatuur varieert van < 5 °C (winter) tot > 20 °C (zomer). Dit betekent dat een deel van het jaar, wanneer het inkomende water warmer is dan 15 °C, het systeem uit bedrijf genomen moet worden. Inmiddels is bekend uit het pilotplant onderzoek dat hogere temperaturen mogelijk zijn zonder negatief effect op de waterkwaliteit. Er is theoretisch berekend

wat de bedrijfsduur over het gehele jaar is als de maximaal toelaatbare temperatuur hoger wordt gelegd, en hoeveel meer energie er dan gewonnen kan worden uit het systeem.

Figuur 6 toont de temperatuur van het drinkwater en laat zien dat als de maximale temperatuur na koudelevering 20 °C of hoger mag zijn, koudelevering het gehele jaar plaats kan vinden. In Figuur 7 is het aantal operationele dagen per jaar vermeld indien de toelaatbare temperatuur gesteld wordt op 15, 20, 25 en 30 °C.



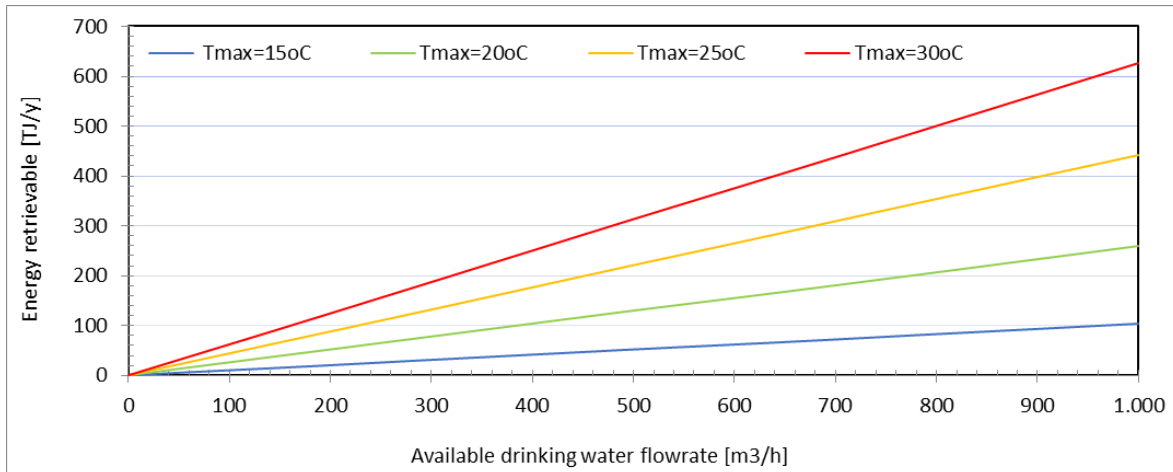
Figuur 7. Temperatuurprofiel drinkwater in 2018 en 2019.



Figuur 8. Aantal operationele dagen voor koudelevering bij verschillende maximaal toelaatbare drinkwatertemperaturen na koudelevering in 2018 en 2019.

Behalve de maximaal toelaatbare drinkwatertemperatuur na koudelevering is ook het debiet door de warmtewisselaar een belangrijke factor die het rendement van het systeem bepaald. In Figuur 9 is de winbare energie weergegeven als functie van het debiet door de warmtewisselaar en de maximaal toelaatbare temperatuur na koudelevering.

Geconcludeerd kan worden dat de bedrijfsvoering van het systeem bij Sanquin geoptimaliseerd kan worden en dat een grotere besparing in elektriciteitsverbruik en reductie van CO<sub>2</sub> emissie mogelijk is.



Figuur 9. Winbare hoeveelheid koude als functie van het waterdebiet door de warmtewisselaar en maximaal toelaatbare watertemperatuur na koudelevering.

## Full-scale metingen bij Sanquin

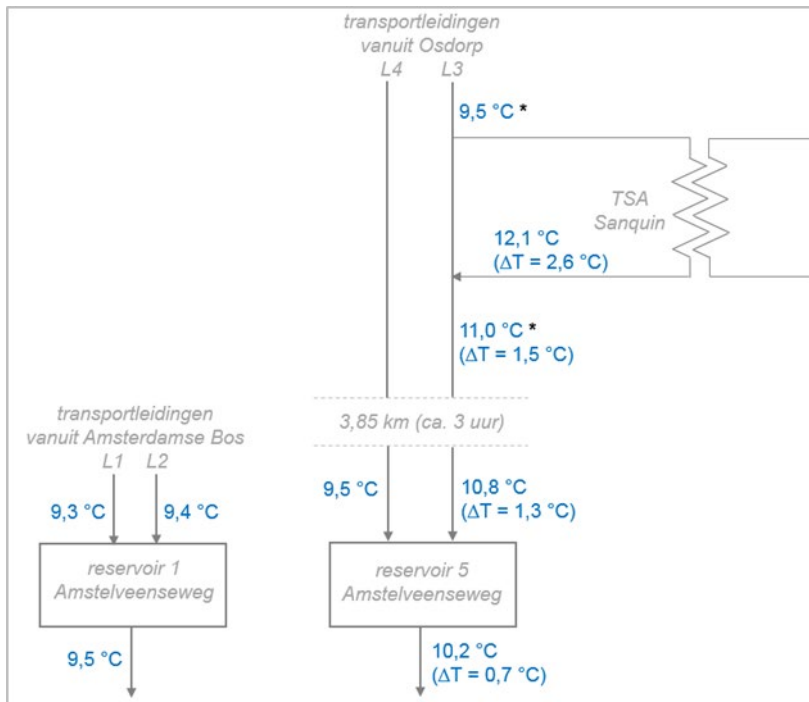
### Temperatuurmetingen

De temperatuurveranderingen in het leidingnet die optreden door koudelevering aan Sanquin zijn door Waternet gemeten en gerapporteerd in:

- Votel M., Dignum M. (2020). Thermische energie uit drinkwater – Temperatuurmetingen koudelevering Sanquin. Rapport Waternet, nr. 20.022797, 12 augustus 2020, Amsterdam.

Doel van dit onderzoek was na te gaan in welke mate de koudelevering invloed heeft op de temperatuur in het drinkwaternet na de koudelevering.

In de wintermaanden is de koudelevering actief, voor de analyse van de temperatuurverschillen werd een periode geselecteerd bij stabiele bedrijfsvoering van de warmtewisselaar en relatief groot temperatuurverschil (07 januari 2019 t/m 12 januari 2019). De maximale temperatuur van het drinkwater direct na de warmtewisselaar (voordat het water weer in de transportleiding wordt gebracht) was 15 °C. In deze periode ging gemiddeld 55% van het debiet van de transportleiding die langs Sanquin loopt door de warmtewisselaar. Figuur 10 geeft een schematische voorstelling van het drinkwaternet nabij Sanquin en de gemeten temperaturen.



Figuur 10. Temperatuurmetingen in het leidingnet nabij Sanquin.

Drinkwater geproduceerd op drinkwaterproductiebedrijf Leidiuin wordt getransporteerd naar reservoirs op de Amstelveenseweg. Leidingen L1 en L2 bereiken via het Amsterdams Bos het reservoir aan de Amstelveenseweg. Twee transportleidingen, L3 en L4, passeren Sanquin waarbij leiding L3 wordt gebruikt voor koudewinning. Leiding L4 loopt parallel aan L3 en is een referentie.

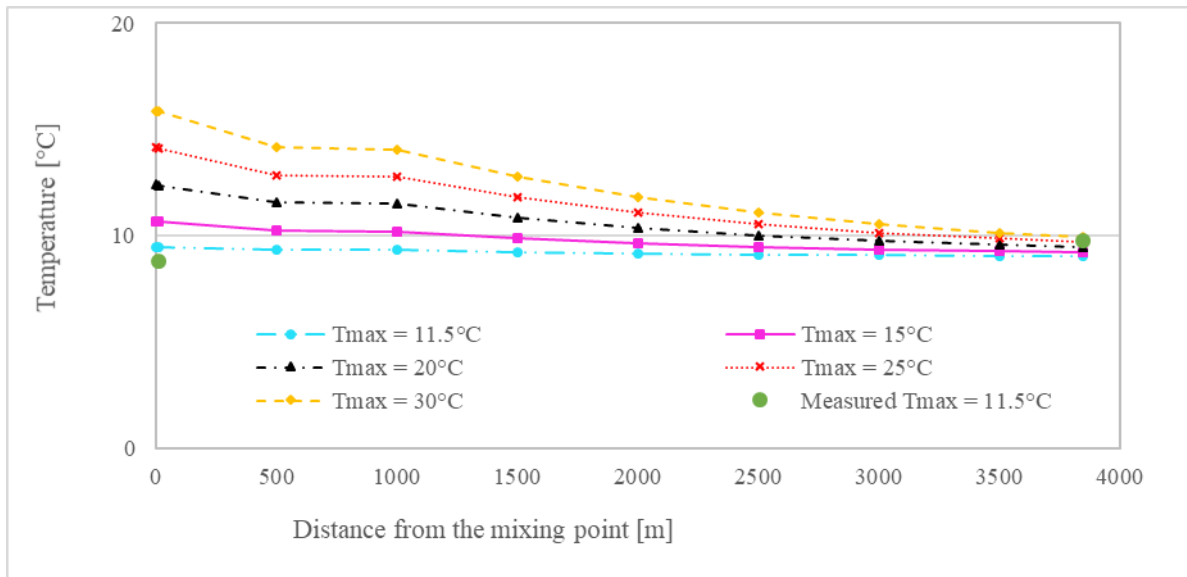
De koudelevering zorgde voor een gemiddelde opwarming van het drinkwater van 9,5 naar 12,1 °C ( $\Delta T = 2,6 \text{ °C}$ ). Dit resulteerde in een temperatuurverhoging gemeten in de transportleiding direct voor en na Sanquin van 9,5 naar 11 °C ( $\Delta T =$  gemiddeld 1,5 °C). Tijdens het transport naar pompstation Amstelveenseweg met een verblijftijd van 3 uur koelde het water vervolgens af met gemiddeld 0,2 °C. Na menging met een vergelijkbaar debiet uit de parallel liggende transportleiding L4 was de uitgaande temperatuur van reservoir 5 gemiddeld 0,7 °C hoger dan reservoir 1, dat niet beïnvloed wordt door de koudelevering.

De veranderingen die optreden wanneer een hogere temperatuur dan 15 °C wordt toegelaten als maximale temperatuur na koudelevering is gemodelleerd in het leidingnetprogramma EPANET en zijn beschreven in:

- Imtiaz Ahmad J., Giorgi S., Zlatanovic L., Liu G., Medema G., Hoek J.P. van der. Drinking water distribution networks: an emerging resource for thermal energy recovery (submitted).

Uit de modellering bleek dat ook bij een hogere maximale toelaatbare temperatuur na koudelevering de temperatuur in het drinkwater snel terugloopt naar de oorspronkelijke temperatuur, zoals weergegeven in Figuur 11. Distance 0 is het punt waar het debiet uit de warmtewisselaar, met verhoogde temperatuur, weer terugkomt in de transportleiding (mixing point). Distance 4000 is het punt waar de transportleiding (L3) het reservoir op de Amstelveenseweg bereikt. De temperatuur van de ondergrond blijkt bepalend te zijn voor de temperatuur in het drinkwaternetwerk.





Figuur 11. Temperatuurprofiel tussen het punt waar het debiet uit de warmtewisselaar mengt met water uit de transportleiding (distance 0) en het punt waar de transportleiding het reservoir bereikt (distance 4000).

## Waterkwaliteitsmetingen

In de winters 2017-2018, 2018-2019 en 2019-2020, gedurende de koudelevering aan Sanquin, is de microbiologische waterkwaliteit gemeten in het aanvoerwater van de warmtewisselaar en in het afvoerwater van de warmtewisselaar na koudelevering, voordat het water wordt gemengd met het water in de hoofdtransportleiding (L3 in Figuur 10). De microbiologische waterkwaliteit is bepaald met de parameters Coliformen, Enterococci, Legionella, Aeromonas, HPC 22°C (Heterotrophic Plate Count, Koloniegetal), ATP (Adenosine Tri Phosphate) en directe celtellingen.

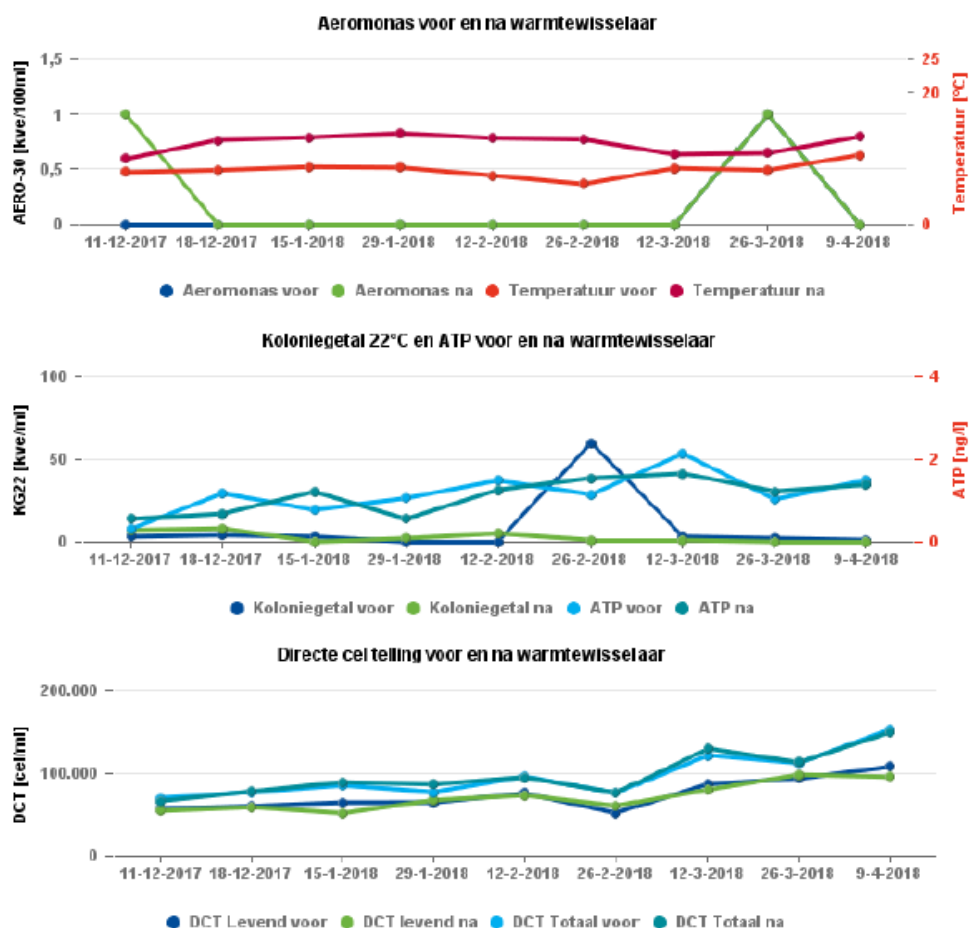
### *Microbiologische waterkwaliteit winter 2017-2018*

Tabel 3 toont de concentraties Coliformen, Enterococci en Legionella vóór en na de warmtewisselaar. Figuur 12 toont de concentraties Aeromonas, HPC 22 °C, ATP en de directe celtellingen vóór en na de warmtewisselaar. De metingen tonen aan dat er geen microbiologische verontreiniging van het drinkwater optreedt.

Tabel 3. Coliformen, Enterococcon en Legionella in het drinkwater vóór en na de warmtewisselaar bij Sanquin, winter 2017-2018.

Datum	Coliformen (KVE*/100 ml)		Enterococcon (KVE/100 ml)		Legionella (KVE/l)	
	vóór WW*	na WW	voor WW	na WW	voor WW	na WW
11-12-2017	0	0	0	0	0	0
18-12-2017	0	0	0	0	0	0
15-01-2018	0	0	0	0	0	0
29-01-2018	0	0	0	0	0	0
12-02-2018	0	0	0	0	0	0
26-02-2018	0	0	0	0	0	0
12-03-2018	0	0	0	0	0	0
26-03-2018	0	0	0	0	0	0
09-04-2018	0	0	0	0	0	0

\*KVE Kolonie Vormende Eenheden; WW warmtewisselaar



Figuur 12. Aeromonas, HPC 22 °C, ATP en de directe celtellingen in het drinkwater vóór en na de warmtewisselaar bij Sanquin, winter 2017-2018.

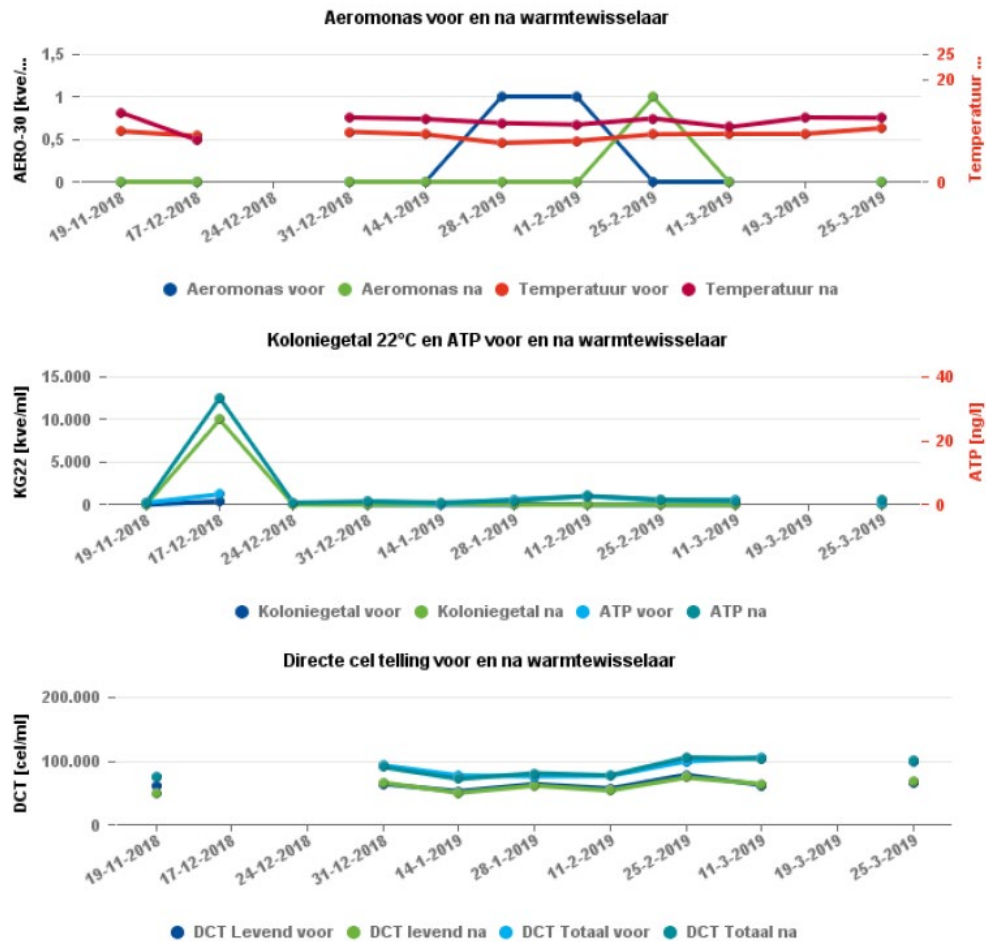
*Microbiologische waterkwaliteit winter 2018-2019*

Tabel 4 toont de concentraties Coliformen, Enterococcen en Legionella vóór en na de warmtewisselaar. Figuur 13 toont de concentraties Aeromonas. HPC 22 °C, ATP en de directe celltellingen vóór en na de warmtewisselaar. De metingen tonen aan dat er geen microbiologische verontreiniging van het drinkwater optreedt.

Tabel 4. Coliformen, Enterococcen en Legionella in het drinkwater vóór en na de warmtewisselaar bij Sanquin, winter 2018-2019.

Datum	Coliformen (KVE*/100 ml)		Enterococcen (KVE/100 ml)		Legionella (KVE/l)	
	voor WW*	na WW	voor WW	na WW	voor WW	na WW
19-11-2018	0	0	0	0	0	0
17-12-2018	0	0	0	0	0	0
24-12-2018	-*	-	-	-	-	-
31-12-2018	0	0	0	0	0	0
14-01-2019	0	0	0	0	-	-
28-01-2019	0	0	0	0	-	-
11-02-2019	0	0	0	0	-	-
25-02-2019	0	0	0	0	-	-
11-03-2019	0	0	0	0	-	-
25-03-2019	0	0	0	0	-	-

\*KVE Kolonie Vormende Eenheden; WW warmtewisselaar; - niet gemeten



Figuur 13. Aeromonas, HPC 22 °C, ATP en de directe celtellingen in het drinkwater vóór en na de warmtewisselaar bij Sanquin, winter 2018-2019.

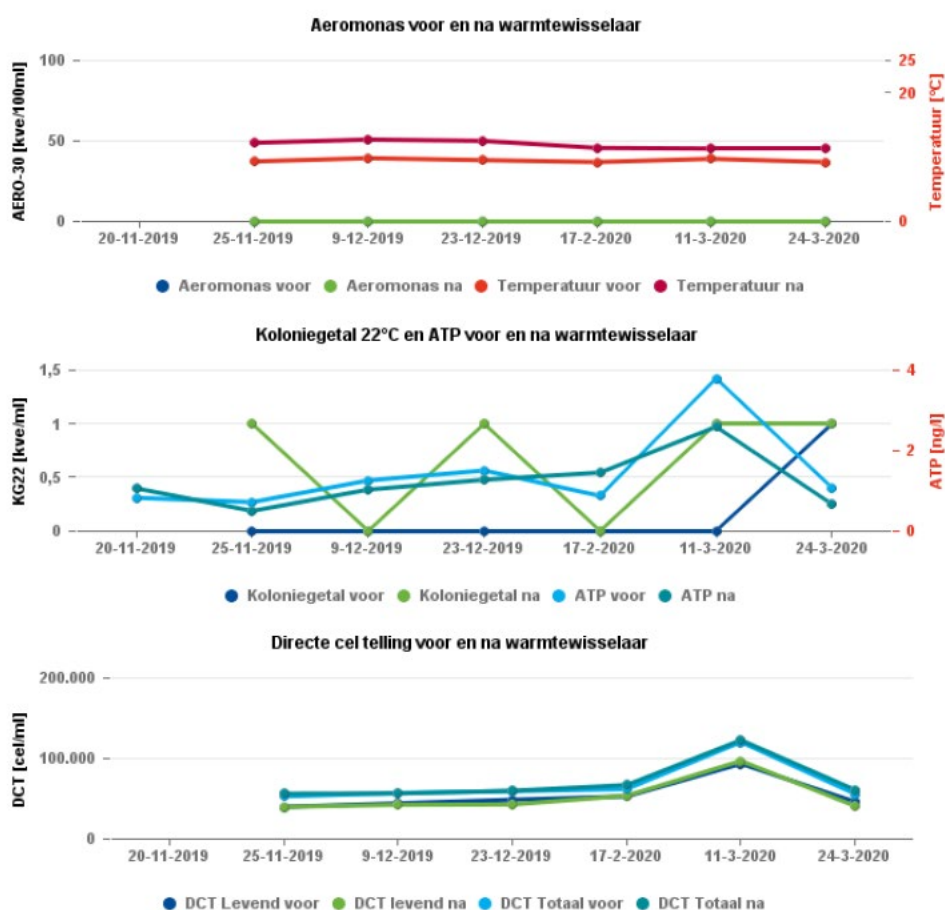
#### *Microbiologische waterkwaliteit winter 2019-2020*

Tabel 5 toont de concentraties Coliformen, Enterococcen en Legionella vóór en na de warmtewisselaar. Figuur 14 toont de concentraties Aeromonas, HPC 22 °C, ATP en de directe celtellingen vóór en na de warmtewisselaar. De metingen tonen aan dat er geen microbiologische verontreiniging van het drinkwater optreedt.

Tabel 5. Coliformen, Enterococcen en Legionella in het drinkwater vóór en na de warmtewisselaar bij Sanquin, winter 2019-2020.

Datum	Coliformen (KVE*/100 ml)		Enterococcen (KVE/100 ml)		Legionella (KVE/l)	
	voor WW	na WW	voor WW	na WW	voor WW	na WW
25-11-2019	0	0	0	0	_*	-
09-12-2019	0	0	0	0	-	-
23-12-2019	0	0	0	0	-	-
17-02-2020	0	0	0	0	-	-
11-03-2020	0	0	0	0	-	-
24-03-2020	0	0	0	0	-	-

\*KVE Kolonie Vormende Eenheden, WW warmtewisselaar; - niet gemeten



Figuur 14. Aeromonas, HPC 22 °C, ATP en de directe celtellingen in het drinkwater vóór en na de warmtewisselaar bij Sanquin, winter 2019-2020.

## Conclusies

- Koude onttrekking uit drinkwater via warmtewisselaars is een eenvoudige methode om thermische energie te winnen uit drinkwater. Door die koude onttrekking treedt een instantane stijging van de drinkwatertemperatuur op.
- Toepassing van koude onttrekking op niet gechloord water heeft geen negatief effect op de microbiologische kwaliteit van het drinkwater. Wel treedt een snellere biofilm ontwikkeling op de leidingwand op bij verhoogde temperatuur.
- Toepassing van koude onttrekking op gechloreerd water heeft geen negatief effect op de microbiologische kwaliteit van het water. Ook in geval van gechloreerd water treedt een snellere biofilm ontwikkeling op op de leidingwand, maar deze is aanmerkelijk geringer dan bij niet gechloord water.
- Aandachtspunten zijn de aanwezigheid van *Pseudomonas* spp. en *Legionella* spp. in de biofilm. Hoewel dit in het onderzoek geen negatief effect had op de drinkwaterkwaliteit, vraagt dit wel om een adequate monitoring.
- Gebruik van koude uit drinkwater voor koelingsdoeleinden resulteert in een aanzienlijke besparing in energieverbruik, een reductie in CO<sub>2</sub> emissie, en is economisch aantrekkelijk.
- Omdat ook bij een hogere temperatuur tot 30 °C geen effecten optreden op de waterkwaliteit is het aantrekkelijk koude onttrekking te bedrijven met een hoge maximaal toelaatbare temperatuur na de warmtewisselaar. De winbare hoeveelheid thermische energie neemt toe naarmate deze toelaatbare temperatuur hoger is.
- Temperatuurverhogingen van het drinkwater na koude levering worden over een zeer korte afstand in een transportleiding afgevlakt waardoor drinkwaterklanten vrijwel geen temperatuureffect zullen ervaren van koude levering.

## Literatuur

Drinkwaterbesluit (2012). Besluit van 23 mei 2011, houdende bepalingen inzake de productie en distributie van drinkwater en de organisatie van de openbare drinkwatervoorziening. Staatsblad van het Koninkrijk der Nederlanden 2001 (293), 1-90.

Frijns J., Mulder M., Roorda J. (2008). Op weg naar een klimaatneutrale waterketen. Rapport KWR/Stowa nr. 2008-17, Utrecht, Nederland.

Imtiaz Achmad J., Liu G., Wielen P.W.J.J. van der, Medema G., Hoek J.P. van der (2020a). Effects of cold recovery technology on the microbial drinking water quality in unchlorinated distribution systems. *Environmental Research* 183, 109175, 1-9 (doi: 10.1016/j.envres.2020.109175).

Imtiaz Ahmad J., Dignum M., Liu G., Medema G., Hoek J.P. van der (2020b). Changes in biofilm composition and microbial water quality in drinking water distribution systems by temperature increase induced by thermal energy recovery (under review).

Imtiaz Ahmad J., Giorgi S., Zlatanovic L., Liu G., Medema G., Hoek J.P. van der. Drinking water distribution networks: an emerging resource for thermal energy recovery (submitted).

Van der Hoek (2012). Towards a climate neutral water cycle. *Journal of Water and Climate Change* 3(3), 163-170.

Van der Hoek J.P., Mol S., Janse T., Klaversma E., Kappelhof J. (2016). Selection and prioritization of mitigation measures to realize climate neutral operation of a water cycle company. *Journal of Water and Climate Change* 7(1), 29-38 (doi: 10.2166/wcc.2015.026).

Van der Hoek J.P., Mol S., Giorgi S., Imtiaz Ahmad J., Liu G., Medema G. (2018). Energy recovery from the water cycle: Thermal energy from drinking water. *Energy* 162, 977-987 (doi:10.1016/j.energy.2018.08.097).

Van der Kooij D., Drost Y.C., Hijnen W.A.M., Willemsen-Zwaagstra J., Nobel P., Schellart J.A. (1995). Multiple barriers against micro-organisms in water treatment and distribution in The Netherlands. *Water Supply* 13(2), 13-23.

Van der Wielen P. (2020). Invloed van temperatuur op groei van opportunistische ziekteverwekkers in drinkwater. Rapport Bedrijfstakonderzoek BTO 2020.036, KWR Water Research Institute, Nieuwegein, juli 2020.

Votel M., Dignum M. (2020). Thermische energie uit drinkwater – Temperatuurmetingen koudelevering Sanquin. Rapport Waternet, nr. 20.022797, 12 augustus 2020, Amsterdam.

Zhou X., Ahmad J.I., Hoek J.P. van der, Zhang K. (2020). Thermal energy recovery from chlorinated drinking water distribution systems: Effect on chlorine and microbial water and biofilm characteristics. *Environmental Research* 187, 109655, 1-10 (doi: 10.1016/j.envres.2020.109655).