

KWR 2014.057 | Juni 2014

Haalbaarheid van maatregelen tegen ongewenste opwarming van drinkwater in het leidingnet

TKI Project Calorics

Haalbaarheid van maatregelen tegen ongewenste opwarming van drinkwater in het leidingnet

TKI Project Calorics

KWR 2014.057 | Juni 2014

Opdrachtnummer

400526/001

Projectmanager

Nellie Slaats

Opdrachtgever

TKI Water

Kwaliteitsborger(s)

Mirjam Blokker

Auteur(s)

Mirjam Blokker (KWR), Peter Horst (PWN), Andreas Moerman (KWR), Stefan Mol (Waternet) en Ronald Wennekes (IF Technology)

Verzonden aan

Dit rapport is verzonden aan de deelnemende partijen en is openbaar.

Jaar van publicatie
2014

Meer informatie

ir. A. Moerman
T (030) 60 69 605
E andreas.moerman@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



KWR 2014.057 | Juni 2014 © 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.

Voorwoord

Dit project is uitgevoerd binnen de topsector water (cluster Watertechnologie). Binnen de verschillende topsectoren werken overheid, ondernemers en wetenschappers samen in zogenaamde Topconsortia voor Kennis en Innovatie (TKI). Het project Calorics is mede gefinancierd uit de Toeslag voor Topconsortia voor Kennis en Innovatie (TKI's) van het ministerie van Economische Zaken. Binnen het TKI project Calorics is een business case gemaakt van drie maatregelen om ongewenste opwarming van het drinkwater in het distributienet te voorkomen. Het project is uitgevoerd door een consortium bestaande uit Waternet, PWN, IF Technology en KWR Watercycle Research Institute. Waternet en PWN hebben aan het project bijgedragen door informatie over het casusgebied te leveren en ervaringen te delen. IF Technology heeft in het project geïnvesteerd door de berekeningen voor de WKO uit te voeren. KWR Watercycle Research Institute was verantwoordelijk voor de berekening van de temperatuur van het drinkwater in het leidingnetmodel en de rapportage.

Samenvatting

De temperatuur van water in het leidingnet wordt beïnvloed door de bodemtemperatuur die op zijn beurt beïnvloed wordt door het weer, de omgeving en bodemsoort.

Klimaatveranderingen en verstedelijking kunnen in de toekomst leiden tot overmatige opwarming van het drinkwater en een overschrijding van de wettelijke norm van 25°C. Met de te verwachten opwarming van het drinkwater in het leidingnet is het gewenst om inzicht te hebben in de kosten en effecten van mogelijke manieren om deze opwarming tegen te gaan.

In deze studie is voor drie maatregelen onderzocht in hoeverre deze in staat zijn om in het KNMI klimaatscenario 2050 W+ de drinkwatertemperaturen boven de grens van 25°C bij de woningaansluiting te voorkomen. Deze maatregelen zijn: (1) het vergroten van het verbruik in het distributienet, (2) het dieper leggen van leidingen (43% leidinglengte op 1,5 m i.p.v. 1 m onder maaiveld) en (3) de inzet van een WKO (Warmte-Koude Opslag) met warmtewisselaar aan het einde van de transportleiding waarbij in de zomer koude toegevoegd wordt die in de winter aan het water onttrokken wordt. Naast temperatuur is ook gekeken naar de combinatie verblijftijd-temperatuur middels een surrogaatparameter voor groei van fictieve micro-organismen en de mogelijke gevolgen voor het energieverbruik van huishoudens voor de bereiding van warm tapwater. De prestaties van de maatregelen voor de hierboven genoemde criteria zijn samen met de kosten (investering en operationeel) van de maatregelen verwerkt in een business case over het analysegebied Volendam west. De kosten zijn geëvalueerd voor een periode van 35 jaar (2015-2050).

De maatregel om verbruik te vergroten heeft geen significant positief effect het op verlagen van de drinkwatertemperatuur bij de aansluiting tijdens verbruik. Deze maatregel heeft een klein positief effect op de surrogaatparameter voor fictieve groei van micro-organismen. Het blijkt dat het dieper leggen in het analysegebied een klein effect heeft op de temperatuuroverschrijding en geen effect op de surrogaatparameter voor groei van fictieve micro-organismen. De totale meerkosten voor het dieper leggen van leidingen in het analysegebied tijdens de evaluatieperiode bedragen € 1.234.000. In combinatie met andere maatregelen (zoals het aanleggen van vegetatie op het maaiveld) is dieper leggen mogelijk wel effectief. Het blijft echter een kostbare maatregel. Van de onderzochte maatregelen heeft het plaatsen van een WKO het meeste effect op de temperatuuroverschrijding maar ook bij deze maatregel zijn de effecten beperkt. Het effect op de surrogaatparameter voor groei van fictieve micro-organismen is positief, maar klein. Daarnaast blijkt dat mogelijke negatieve gevolgen voor het energieverbruik van huishoudens voor de bereiding van warm tapwater niet significant zijn. Een mogelijke toename in groei van fictieve micro-organismen in de winter is niet significant. Dit betekent dat het drinkwater in de winter enkele graden opgewarmd kan worden zonder dat dit negatieve gevolgen heeft voor de waterkwaliteit. Dit is interessant voor mogelijke koudeleveringen aan gebruikers in de omgeving. De totale kosten tijdens de evaluatieperiode bedragen € 629.000. Dit bedrag is lager wanneer op een later moment in de evaluatieperiode geïnvesteerd wordt.

Er wordt aanbevolen om verder onderzoek te doen naar de optimale locatie van een WKO in het transportnet en de modellering van groei van micro-organismen in het distributienet om beter de effecten op de waterkwaliteit in kaart te kunnen brengen.

Inhoud

Voorwoord	2
Samenvatting	3
1 Inleiding	6
1.1 Aanleiding en doel	6
1.2 Aanpak	7
1.3 Leeswijzer	7
2 Pilotgebied en scenario's	8
2.1 Hydraulisch model	8
2.2 Scenario's	11
3 Berekening temperatuur drinkwater en uitgangspunten	16
3.1 Gebruikt model	16
3.2 Randvoorwaarden temperatuurmodel in de scenario's	20
3.3 Samenvatting uitgangspunten per scenario	25
3.4 Beoordelingscriteria	26
4 Kwantificeren kosten	27
4.1 Contant maken kosten	27
4.2 Kosten voor WKO	27
4.3 Kosten voor dieper leggen van leidingen	29
5 Resultaten	31
5.1 Temperatuur: overschrijding 25 graden norm	31
5.2 Temperatuur: duur van overschrijding 25 graden norm	31
5.3 Surrogaatparameter voor groei fictieve micro-organismen	34
5.4 Energieverbruik huishoudens voor bereiding warm tapwater	35
5.5 Kosten na contant maken en correcties	37
5.6 Samenvatting uitkomsten business case	38
6 Discussie	39
6.1 Onderzochte maatregelen	39
6.2 Overige oplossingen en overwegingen	40
7 Conclusies en aanbevelingen	42
7.1 Samenvatting	42
7.2 Conclusies per maatregel	42
7.3 Praktische aanbevelingen: maatregelen in de praktijk	42

7.4	Aanbevelingen voor verder onderzoek	43
8	Literatuur	44
	Bijlage I Leidingmaterialen in distributienet Volendam	45
	Bijlage II Beschrijving uitbreiding KWR model	48
	Bijlage III Gevoeligheid WKO en dieper leggen voor temperatuur water uit transportnet	52
	Bijlage IV Validatie temperatuurmodel in 2013	59

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en doel

De temperatuur van water in het leidingnet wordt beïnvloed door de bodemtemperatuur die op zijn beurt beïnvloed wordt door het weer, de omgeving en bodemsoort. Klimaatveranderingen en verstedelijking kunnen in de toekomst leiden tot overmatige opwarming van het drinkwater. Volgens het Drinkwaterbesluit mag de temperatuur van het drinkwater op het leveringspunt niet hoger zijn dan 25°C (Drinkwaterbesluit, art. 13 lid 1). Bij hogere temperaturen kunnen verschillende typen micro-organismen (algen, bacteriën, protozoa, schimmels) tot groei komen in het drinkwater of in de biofilm aan de binnenkant van de leiding. Met de te verwachten opwarming van het drinkwater in het leidingnet is het gewenst om inzicht te hebben in de kosten en effecten van mogelijke manieren om deze opwarming tegen te gaan.

In recent onderzoek van KWR is een aantal mogelijke oplossingen onderzocht om de opwarming van het drinkwater tegen te gaan of om de nagroei te voorkomen, namelijk (Blokker and Pieterse-Quirijns, 2012):

1. veranderen van aanlegseisen, zoals leidingen dieper aanleggen of het aanleggen van begroeiing boven de leidingen zodat de bodem minder opwarmt;
2. veranderen van leidingmateriaal, zoals isolerend materiaal;
3. verkorten van de verblijftijd in het distributienet door het aanleggen van kleinere diameters of het verhogen van de drinkwatervraag (bijv. door spuien);
4. het lokaal actief koelen van het drinkwater.

Uit dit onderzoek blijkt dat niet alle maatregelen effectief zijn om de toename van de drinkwatertemperatuur in het distributienet te beperken. De grootste effectiviteit is gevonden in het koelen middels de bodem in het hele net. Dit kan bereikt worden door vegetatie aan te brengen langs het leidingtracé, leidingen dieper te leggen en zandgrond te vermijden. Het isoleren van leidingen en het verkorten van de verblijftijd (door hoger verbruik: maxdag) zijn veel minder effectief. Voor het beperken van de groei van micro-organismen in het distributienet is voornamelijk het beperken van de verblijftijd bij hogere temperaturen van belang. Dit kan gedaan worden door kleinere diameters te leggen (zoals in zelfreinigende leidingnetten) of het verbruik te vergroten. Omdat leidingmaterialen met een lagere warmtegeleidingscoëfficiënt een grotere warmteweerstand vormen tegen het opwarmen van het drinkwater zullen bepaalde maatregelen in nieuwe distributienetten met veel PVC beter scoren dan in oudere distributienetten met veel (grijs) gietijzer. Het gebruik van warmte isolerende materialen is in onderzoek voor Brabant Water bestudeerd. Uit dat onderzoek blijkt dat extreme hoeveelheden isolatie nodig zijn om te voldoen aan de eis van 25°C wanneer drinkwaterleidingen op een diepte van 0,6 m onder het maaiveld gelegd worden (Blokker *et al.*, 2014).

Het doel van het project TKI Calorics is het onderzoeken van de technische en financiële haalbaarheid van maatregelen die een drinkwaterbedrijf kan nemen voor een klimaatbestendig leidingnet. Deze oplossingen moeten ongewenste opwarming – en daarmee nagroei – als gevolg van klimaatveranderingen zo veel mogelijk voorkomen. Binnen de business cases die in dit onderzoek behandeld worden komen drie maatregelen uit de

hierboven genoemde oplossingsperspectieven aan de orde; het dieper aanleggen van leidingen (1), het actief koelen middels warmte-koudeopslag (WKO)(4) en het verhogen van de drinkwatervraag (3).

1.2 Aanpak

Binnen het onderzoek zijn middels een business case de technische effectiviteit en de financiële consequenties van de drie genoemde oplossingen in kaart gebracht. Hiervoor werd onderzocht of het vergroten van verbruik, de toepassing van WKO met warmtewisselaar en het dieper leggen van drinkwaterleidingen ook daadwerkelijk zorgt voor een distributienet dat bestand is tegen de toekomstige klimaatverandering en of de maatregelen geen negatieve invloed hebben op de drinkwaterkwaliteit of het energieverbruik van huishoudens voor de bereiding van warm tapwater. Met informatie van PWN, Waternet en IF Technology zijn schattingen gemaakt van de investeringskosten en operationele kosten die verbonden zijn aan de verschillende maatregelen.

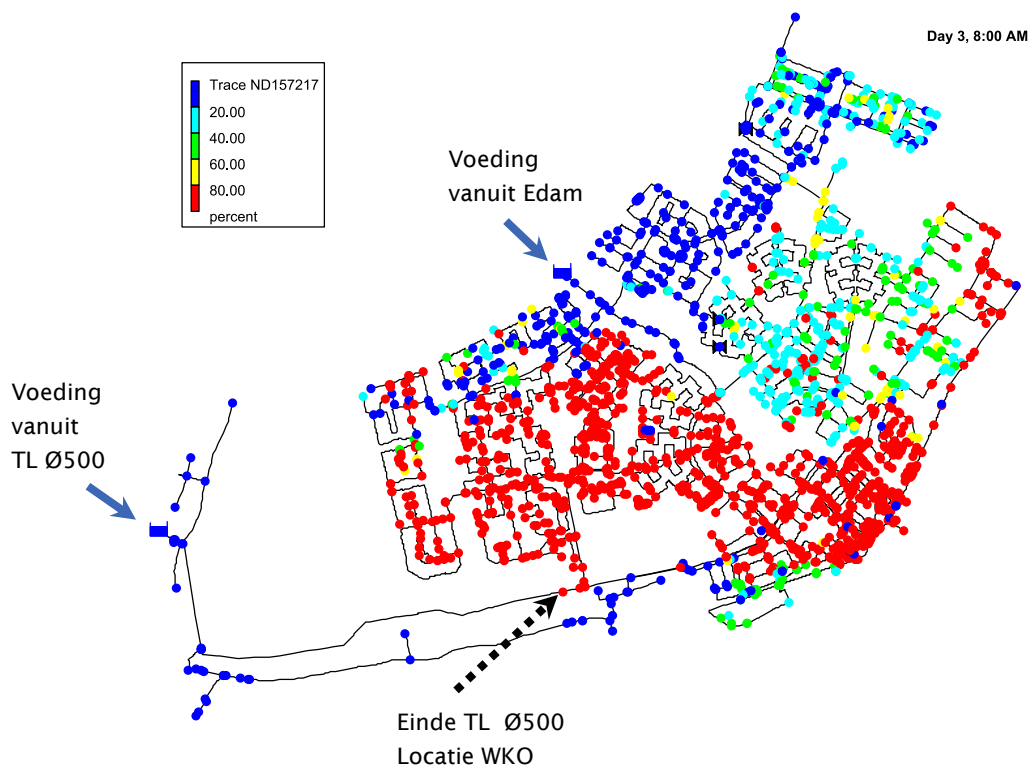
1.3 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 is een beschrijving gegeven van het analysegebied. Tevens worden hier de verschillende oplossingen voor het ongewenst opwarmen van het drinkwater in het leidingnet kwalitatief beschreven. In hoofdstuk 3 wordt de methode beschreven die gebruikt is om de analyse uit te voeren. In dit hoofdstuk wordt het temperatuurmodel uitgelegd. Daarnaast worden de randvoorwaarden en uitgangspunten van het model verantwoord. Als laatste worden de beoordelingscriteria beschreven. Hoofdstuk 4 geeft de methode weer waarmee de kosten van de verschillende oplossingen gekwantificeerd worden. In hoofdstuk 5 worden de resultaten weergegeven conform de in hoofdstuk 3 genoemde beoordelingscriteria. Verder worden in dit hoofdstuk de kosten van de verschillende oplossingen berekend volgens de methode uit hoofdstuk 4. Aan het einde van dit hoofdstuk is een samenvatting gegeven van de resultaten van de drie business cases. Hoofdstuk 6 geeft een discussie over de uitkomsten en beschrijft andere mogelijke maatregelen om de temperatuur in het distributienet te verlagen. Tenslotte worden in hoofdstuk 7 de conclusies van het onderzoek beschreven en worden aanbevelingen gedaan voor implementatie en vervolgonderzoek. In de bijlagen is achtergrondinformatie te vinden over het distributienet van Volendam, de uitbreiding van het KWR temperatuurmodel voor transportleidingen en de gevoeligheid van het temperatuurmodel voor verschillende instroomtemperaturen.

2 Pilotgebied en scenario's

2.1 Hydraulisch model

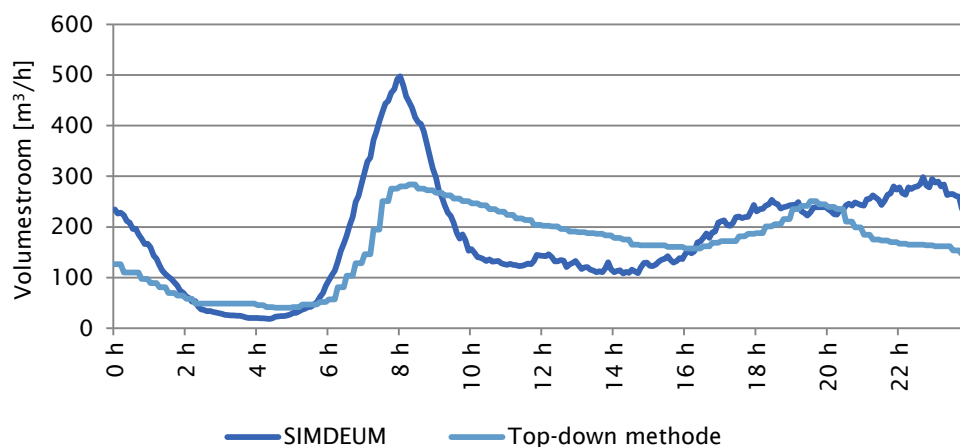
Als gebied voor de casestudie is Volendam genomen. Het leidingnet van Volendam wordt vanaf twee kanten gevoed; vanuit het westen middels een transportleiding (Ø500 transportleiding) en vanuit het noorden middels een secundaire leiding vanuit Edam (zie Figuur 2.1). In Figuur 2.2 zijn de totale volumestromen in het systeem voor een gemiddelde dag weergegeven bij gebruik van SIMDEUM® en de top-down methode (pompstationkromme). Dit zijn twee rekenmethodes om verbruik toe te kennen aan afzonderlijke punten in het hydraulisch model. Deze berekening is van belang omdat de verbruikspatronen op de afzonderlijke punten de hydraulische condities van het leidingnetmodel bepalen. SIMDEUM® is een stochastisch model waarmee nauwkeurig de watervraag op elke aansluiting gemodelleerd kan worden (Blokke, 2010). Bij gebruik van de top-down methode wordt het totale volume dat een distributienet instroomt verdeeld over het aantal punten in het model. In het hydraulisch model van Volendam wordt aangenomen dat alle aansluitingen woningaansluitingen zijn.



Figuur 2.1. EPANET leidingnetmodel met indicatie van herkomst water (uitgedrukt in percentage water dat afkomstig is van einde transportleiding/locatie WKO) bij gemiddeld verbruik.

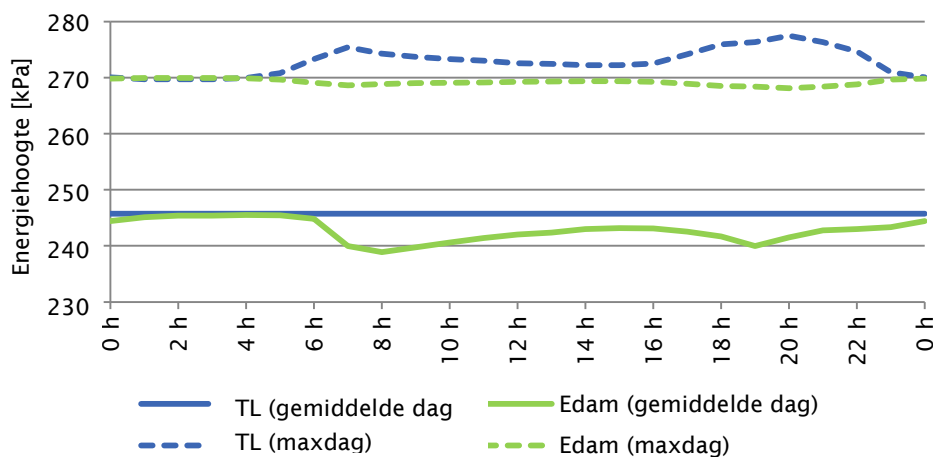
In Figuur 2.2. is het verschil te zien tussen SIMDEUM® en de top-down methode. Te zien is dat SIMDEUM® meer de maxima in het dagpatroon simuleert dan dat de top-down methode dit doet. De top down methode geeft een meer constant verbruik over de dag. In eerder onderzoek is de meerwaarde van SIMDEUM® in een waterkwaliteitsmodel voor het leidingnet

aangetoond (Blokker *et al.*, 2010). In de analyses zal daarom gebruik gemaakt worden van SIMDEUM® om de volumestromen in het hydraulisch model te bepalen.



Figuur 2.2. Totale volumestroom in hydraulisch model bij watervraag bepaald middels top-down (TD) en SIMDEUM® benadering. Uitgangspunt is dat alle aansluitingen woningaansluitingen zijn.

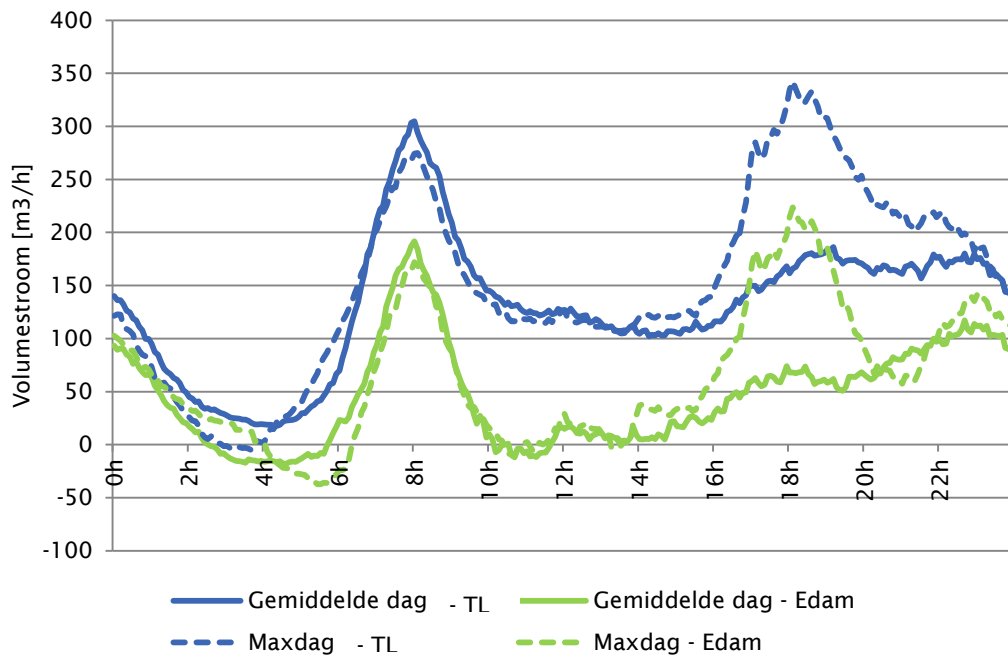
Naast het gebruik van SIMDEUM® om de watervraag te modelleren heeft het hydraulisch model twee randvoorwaarden. Dit zijn de energiehogtes ter plaatste waar het distributienet gevoed wordt: de Ø500 transportleiding (vanuit het westen) en vanuit Edam. Wanneer waterdruk en plaatshoogte bekend zijn kan de energiehogte berekend worden volgens de som $\text{energiehoogte} = \text{plaatshoogte} + \text{drukhoogte}$. De waterdruk op beide voedingslocaties is bepaald met het SynerGEE pakket van PWN bij berekeningen met top-down verbruiken. Het voedingspunt Ø500 transportleiding bevindt zich op -4 m t.o.v. NAP en het voedingspunt Edam bevindt zich op -1.1 m t.o.v. NAP. De energiehogtes zijn weergegeven in Figuur 2.3.



Figuur 2.3. Energiehogten op beide voedingspunten in het hydraulisch model voor gemiddelde dag en maxdag (bron: PWN).

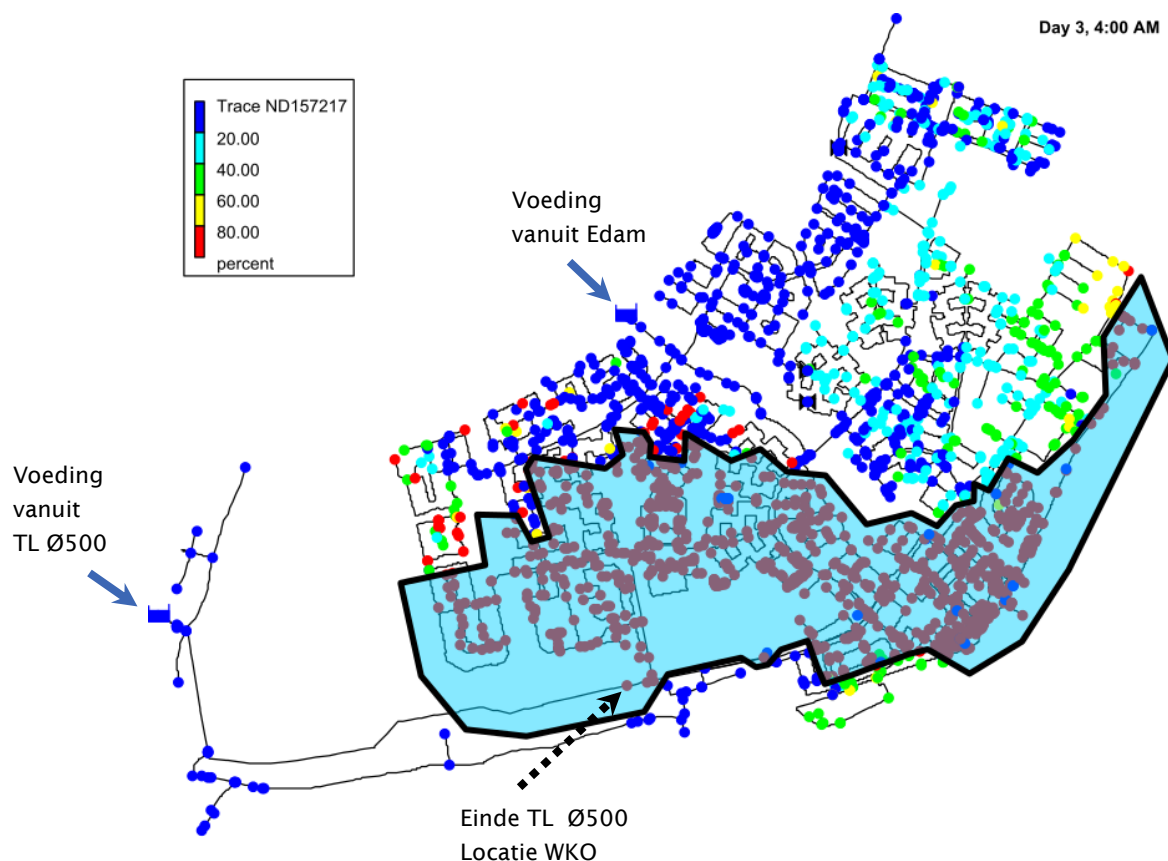
Uit hydraulische analyses blijkt dat een substantieel deel van Volendam gevoed wordt vanuit Edam. Wanneer de WKO gesimuleerd wordt zal deze aan het einde van de Ø500 transportleiding (voeding west) gemodelleerd worden (Figuur 2.1). De WKO beïnvloedt

daarmee alleen het water dat uit de transportleiding komt. Water dat uit Edam komt vertroebelt de uitkomsten van de business case. Daarom is het analysegebied beperkt tot het gebied dat rood gekleurd is in Figuur 2.1. Van dit gebied is berekend dat het water in het leidingnet voor minimaal 80% uit water bestaat dat uit de transportleiding komt (locatie WKO, zie Figuur 2.1). Om zeker te zijn dat dit 80% leveringsfront consistent is zijn ook hydraulische analyses uitgevoerd bij de maximale dag. In Figuur 2.4 zijn de volumestromen uit de transportleiding en vanuit Edam te zien bij gemiddelde en maximale dag.



Figuur 2.4. Voeding vanuit transportleiding en Edam naar distributienet Volendam voor gemiddelde en maximale dag met SIMDEUM patronen.

Te zien is dat vooral rond 18.00 uur grote verschillen optreden tussen verbruik op gemiddelde en maximale dag. Dit wil echter niet zeggen dat op dit moment ook het 80% front het meeste verandert ten opzicht van de gemiddelde dag. Uit hydraulische simulaties blijkt het grootste verschil tussen gemiddelde dag en maxdag op te treden tussen 2.00 en 5.00 uur 's nachts. In Figuur 2.5 is de herkomst van het water weergegeven op het moment dat het 80% front het meest verschuift (4.00 uur 's nachts). Op basis van deze situatie is in Figuur 2.5 de definitieve systeemgrens van het analysegebied aangegeven. Van dit gebied is berekend dat minimaal 80% van het water afkomstig is van de Ø500 transportleiding waarvan de locatie aangegeven is in Figuur 2.1 en Figuur 2.5.



Figuur 2.5. Herkomst water (uitgedrukt in percentage water dat afkomstig is van einde transportleiding/locatie WKO) bij maximale dag om 4.00 uur. Op dit moment is de verplaatsing van het 80% front tussen gemiddelde dag en maxdag het grootst. Het definitieve analysegebied wordt gevormd door de zwarte lijn met transparante inkleuring.

2.2 Scenario's

2.2.1 Referentiescenario's

Om de verschillende oplossingen te kunnen vergelijken is eerst een 0-scenario of referentiescenario gedefinieerd. In dit scenario wordt uitgegaan van het KNMI 2050 W+ scenario waarbij er geen maatregelen genomen worden om ongewenste opwarming in het distributienet te voorkomen. Om de gevolgen van de verschillende oplossingen te kunnen vergelijken in verschillende seizoenen is er zowel een 2050 W+ zomer- als een 2050 W+ winterscenario doorgerekend. Het zomer klimaatscenario is een maximum, het winter klimaatscenario een minimum. In de berekeningen zijn dus extremen gebruikt om te onderzoeken hoe de temperatuur van het drinkwater in het leidingnet zich gedraagt tijdens de maximale temperatuursituatie die verwacht wordt voor 2050. Daarnaast is er in de zomer een simulatie uitgevoerd met maxdag patronen om de mogelijke invloed hiervan op de temperatuur in 2050 te kunnen beoordelen. Er zijn dus drie 0-scenario's:

- 0-zomer: 2050 W+ zomer met gemiddeld verbruik;
- 0-winter: 2050 W+ winter met gemiddeld verbruik;
- 0-maxdag: 2050 W+ zomer met maxdag verbruik.

2.2.2 Scenario 1: Handhaving huidige situatie met operationeel ingrijpen

Wanneer er geen maatregelen getroffen worden om de temperatuur in het leidingnet in de zomer actief te verlagen – bijvoorbeeld door een WKO, koelen af pompstation of het dieper leggen van leidingen) – kunnen mogelijk operationele maatregelen genomen worden om de temperatuur in het leidingnet te verlagen. Dit kan gedaan worden door het verbruik in het distributiegebied te verhogen. Er zijn twee modelscenario's doorgerekend om verschillende mogelijkheden van verbruikstoename te onderzoeken.

- 1-spuien: In dit scenario wordt een verbruik gezet op knopen zonder SIMDEUM® verbruikspatronen. Daarmee wordt verbruik toegekend aan knopen in het netwerk die in de uitgangssituatie geen verbruik hebben. Hierdoor kan over het hele hydraulisch model extra verbruik gegenereerd worden zonder dat de SIMDEUM® patronen op de knopen met verbruik aangepast worden. Elke knoop waarop in scenario "1-spuien" extra verbruik gegenereerd wordt heeft een verbruik van 0,9 m³/h tussen 7.00 en 19.00 uur. De volumestroom van 0,9 m³/h is gebaseerd op de maximale volumestroom die geleverd kan worden door het systeem. Boven deze waarde ontstaan negatieve drukken in het hydraulisch model.
- 1-extra Q: In dit scenario wordt het verbruik op de knopen mét SIMDEUM® verbruikspatronen aangepast. Daarmee wordt gesimuleerd dat de gebruikers meer water gaan verbruiken. Deze methode komt tot stand door de SIMDEUM® verbruikspatronen te vermenigvuldigen met een factor 1.5.

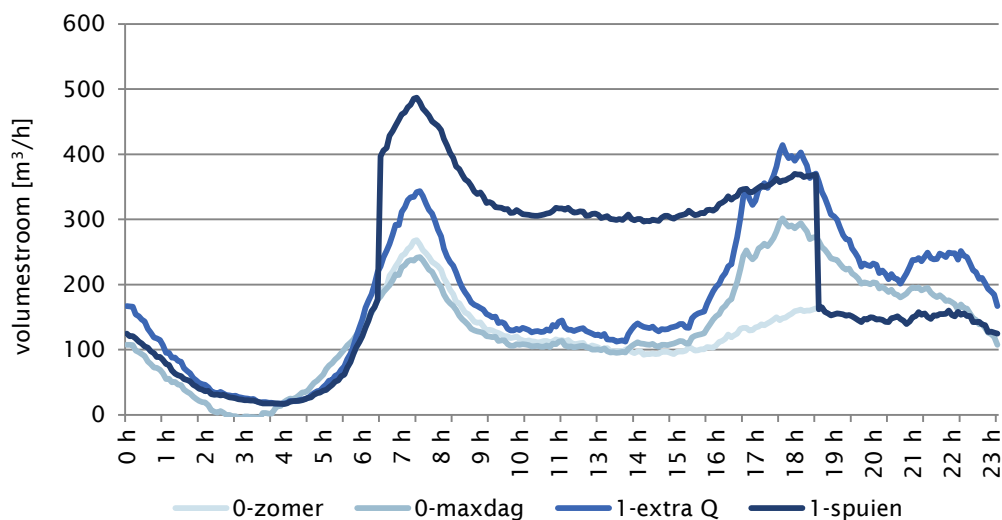
Figuur 2.7 laat zien welk effect de aanpassingen in de scenario's "1-spuien" en "1-extra Q" hebben op de totale volumestroom in het hydraulisch model. Deze scenario's zijn alleen gesimuleerd in het 2050 W+ zomerklimaat. In Figuur 2.6 zijn de knopen gemarkeerd waarop tijdens scenario 1-spui (boven) en scenario "1-extra Q" (onder) extra verbruik gegenereerd wordt.





Figuur 2.6. Overzicht van knopen zonder SIMDEUM® verbruikspatronen (links) waar in scenario "1-spuien" gebruik van wordt gemaakt en knopen met SIMDEUM® verbruikspatronen (rechts) waar in scenario "1-extra Q" gebruik van wordt gemaakt.

In Figuur 2.6 is duidelijk te zien dat er bij het scenario "1-extra Q" meer knopen gebruikt worden om extra verbruik te genereren. Dit komt overeen met de werkelijkheid: er zijn meer huisaansluitingen dan brandkranen. De grote volumestroom en de gelijktijdigheid van de watervraag in scenario "1-spuien" zijn extreem zoals te zien is in Figuur 2.7. Hiervoor is gekozen om te kunnen beoordelen of spuien significant effect heeft op de temperatuur in het leidingnet. Er is gecontroleerd of er geen negatieve drukken optreden in het leidingnet.



Figuur 2.7. Volumestromen in de Ø500 transportleiding bij verhogen verbruik in scenario's 4 en 5 t.o.v. 0-maxdag en 0-zomer.

2.2.3 Scenario 2: Gebruik van WKO

De locatie waar een WKO kan worden ingepast in de drinkwaterleiding is gelegen nabij de Heideweg in Volendam (zie Figuur 2.5). Dit is het einde van de Ø500 transportleiding. Op deze locatie zijn de bodemopbouw en de kwaliteit van het grondwater beide geschikt voor de toepassing van WKO. De diepte van het watervoerend pakket waaruit het grondwater kan worden onttrokken en kan worden geïnfilterd ligt tussen 120 tot 280 m onder maaiveld. Het maximale grondwaterdebiet per bron bedraagt hierbij 250 m³/h. De temperatuur van het

grondwater bedraagt op deze diepte 13°C en de kwaliteit van het grondwater is zout met een chloride-gehalte van 5.000 tot 10.000 mg/l.

Voor het onttrekken en infiltreren van grondwater ten behoeve van WKO, is een onttrekkingsvergunning Waterwet benodigd. Deze dient bij de provincie Noord-Holland te worden aangevraagd. Het lozen van thermische warmte in de bodem is niet toegestaan. Er dient dus minimaal eenzelfde hoeveelheid koude die in de zomer wordt geleverd, in de winter aan koude in de bodem te worden geladen (energiebalans eis).

Het maximum debiet door de drinkwaterleiding bedraagt circa 300 m³/h. Om dit drinkwater altijd met 4°C in temperatuur te kunnen verlagen, is een WKO installatie nodig die bestaat uit één koude en één warme bron met elk een grondwaterdebiet van 150 m³/h. De bronnen met een diepte van 175 m kennen een onderlinge afstand van circa 125 m. De bronnen worden afgewerkt in putbehuizingen, die in de groenstroken aan de oostzijde van de Heideweg, waar zich ook de drinkwaterleiding bevindt, worden geplaatst.

Het grondwater wordt in de putbehuizing van de koude bron middels een dubbelwandige platenwarmtewisselaar (KIWA-ATA keurmerk) hydraulisch gescheiden van het drinkwater. De maximale druk in het grondwatercircuit voor de warmtewisselaar bedraagt circa 135 kPa. Dit houdt in dat de druk drinkwaterzijdig hoger moet zijn dan 135 kPa om aan de eis van overdruk te kunnen voldoen. In Figuur 2.3 is te zien dat aan deze eis voldaan wordt. Daarnaast vinden er lekdetectie en drinkwaterzijdig een geleidsbaarheidsmeting plaats.

De tijdsduur dat de WKO in de zomer in bedrijf is om de temperatuur van het drinkwater te verlagen bedraagt naar verwachting 45 dagen (Pieterse-Quirijns *et al.*, 2011). De hoeveelheid aan koude die met de WKO wordt geleverd, bedraagt bij een gemiddelde volumestroom van 3.160 m³/dag circa 660 MWh_t. Deze hoeveelheid koude van circa 660 MWh_t moet ook in de winter weer in de bodem worden geladen. Dit is mogelijk door in de winter koude aan het drinkwater te onttrekken en deze in de koude bron te laden.

Er zijn twee modelscenario's doorerekend om verschillende mogelijkheden van verbruikstoename te onderzoeken:

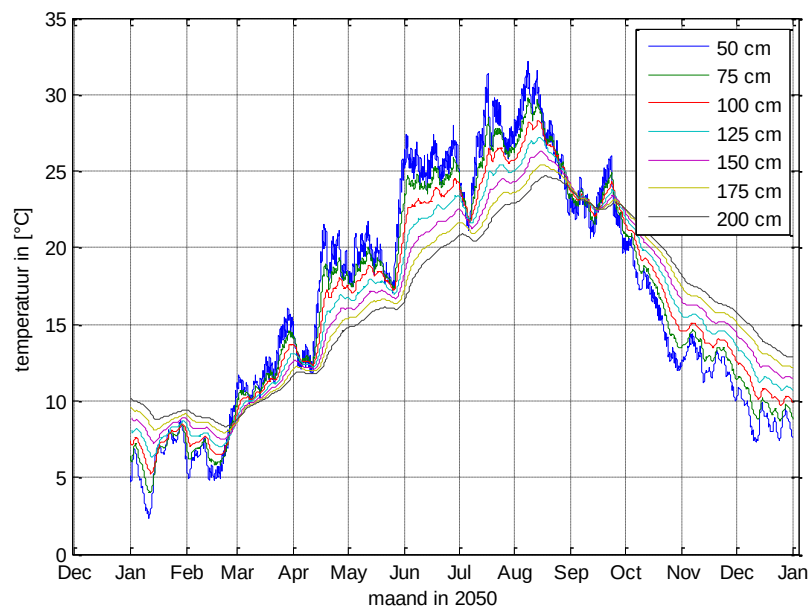
- 2-WKO zomer: in dit scenario wordt de WKO 's zomers ingezet om het drinkwater te koelen voordat het vanuit de transportleiding het distributienet binnen komt. Er wordt uitgegaan van een temperatuurverlaging van 4°C.
- 2-WKO winter: in dit scenario wordt er 's winters koude geladen in de WKO. Hiervoor wordt warmte uit de bodem toegevoegd aan het drinkwater. Vanwege de energiebalans over het jaar wordt uitgegaan van een temperatuurverhoging van 4°C.

2.2.4 Scenario 3: Dieper leggen van leidingen

Bij het dieper leggen van leidingen worden leidingen niet op de gebruikelijke diepte van 1.00 m onder het maaiveld geïnstalleerd, maar op 1.50 meter onder het maaiveld. In Figuur 2.8 is te zien hoe de bodemtemperatuur (in het 2050 W+ scenario) fluctueert over het jaar op verschillende dieptes. Bij deze berekeningen is uitgegaan van de meest ongunstige situatie bij ongewenste opwarming: een zandbodem met bestrating (trottoir) aan het oppervlak. Dit is in de woonwijk Volendam ook het geval. Omdat de bodemtemperatuur in de zomer op een grotere diepte lager is zal het water in het leidingnet minder warm worden. Uit Figuur 2.8 is af te leiden dat de temperatuurreductie op 1.50 meter onder het maaiveld t.o.v. 1 meter onder het maaiveld in de zomer 2°C bedraagt. Uit Figuur 2.8 is tevens af te leiden dat de bodemtemperatuur in de winter 2,5°C hoger is op een diepte van 1,50 meter onder het maaiveld. Er zijn dus twee scenario's voor dieper leggen:

- 3-dieper-zomer: dieper leggen met bodemtemperaturen in 2050 W+ zomer (-2°C) ;
- 3-dieper-winter: dieper leggen met bodemtemperaturen in 2050 W+ winter (+2,5°C).

In deze scenario's wordt aangenomen dat in 2050 43% van de leidinglengte vervangen is. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat alle gesaneerde leidingen van PVC zijn. De gesaneerde leidingen zijn willekeurig verdeeld over het hydraulisch model. Hiervoor zijn 992 leidingnummers uit de totale verzameling van 2307 leidingnummers getrokken¹. Dit proces is herhaald totdat de totale lengte van de getrokken verzameling leidingnummers nagenoeg gelijk was aan 43% van de totale leidinglengte met een maximale relatieve afwijking van 0,1%. Het gemodelleerde saneringspercentage ligt daarmee tussen 42,96% en 43,04%. Het vervangingspercentage van de gebruikte random dataset bedraagt 43,01%.



Figuur 2.8. Gemodelleerde bodemtemperatuur voor het 2050 W+ scenario op verschillende dieptes bij een zandbodem en bestrating als bodembedekking.

¹ De leidingnummers zijn getrokken *zonder terugleggen*. Dat wil zeggen dat in de verzameling met getrokken leidingnummers (992) alleen unieke leidingnummers voorkomen. Dit zorgt ervoor dat bij het modelleren van dieper leggen daadwerkelijk 43% van de leidingen dieper ligt dan de overige leidingen. De transportleidingen die zich in het hydraulisch model bevinden zijn uitgesloten van de willekeurige trekking.

3 Berekening temperatuur drinkwater en uitgangspunten

3.1 Gebruikt model

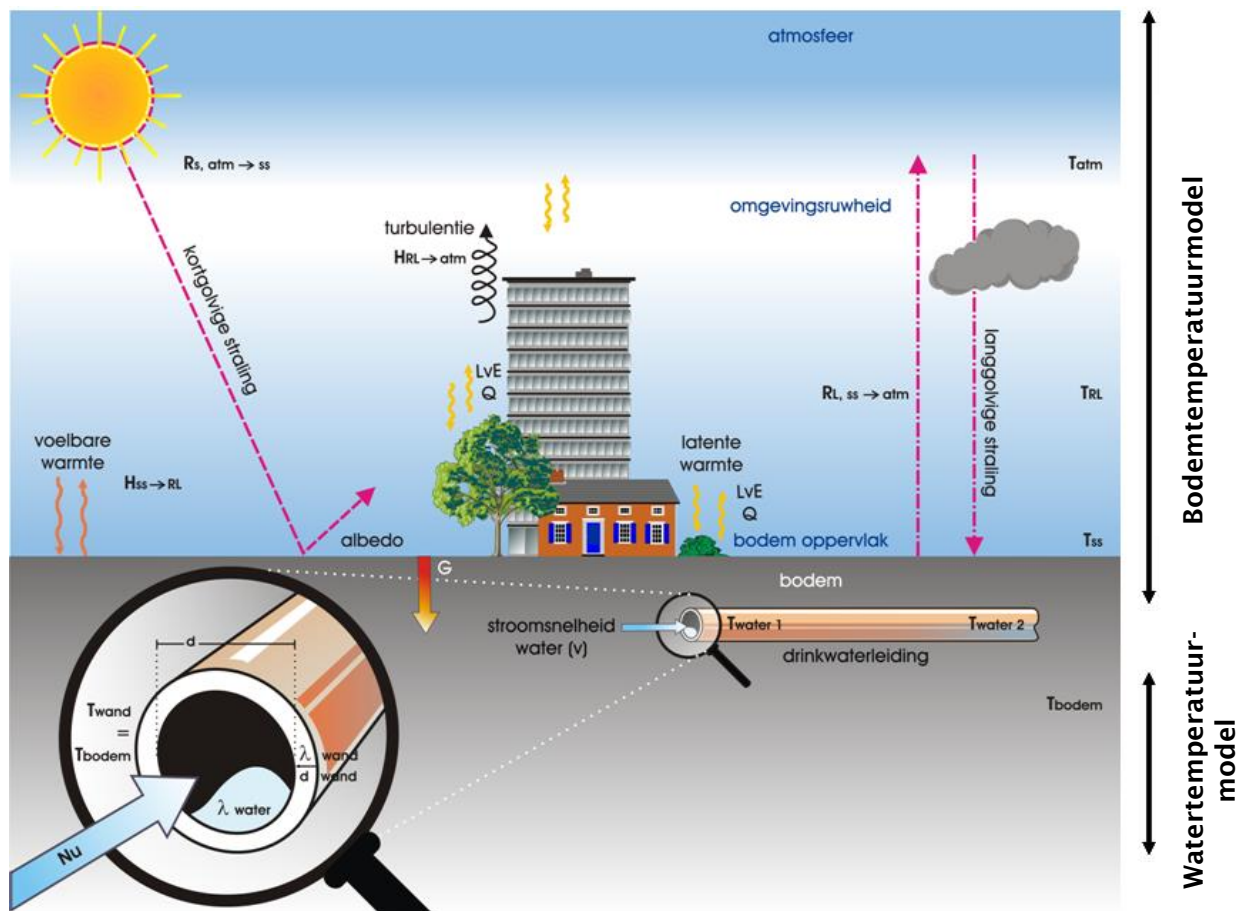
3.1.1 Drinkwatertemperatuurmodel

Voor het doorrekenen van de scenario's is gebruik gemaakt van het temperatuurmodel dat binnen KWR is ontwikkeld (Blokker and Pieterse-Quirijns, 2012; Blokker and Pieterse-Quirijns, 2013; Blokker and Pieterse-Quirijns, 2010). Met dit model kan de temperatuur van het drinkwater in het distributienet berekend worden als functie van de bodemtemperatuur.

In Figuur 3.1 is het temperatuurmodel schematisch weergegeven. Het drinkwater dat door een leiding in de grond stroomt wordt 's zomers opgewarmd doordat de omringende bodem door hoge temperaturen in de atmosfeer en zonnestraling warmer is geworden. Zonnestraling en hoge temperaturen in de atmosfeer zorgen voor de opwarming van de grondbedekking. Wanneer begroeiing aanwezig is, zal door verdamping en beschaduwing de bodem minder opwarmen. Vervolgens wordt door geleiding de warmte doorgegeven naar diepere delen in de bodem. Als de warmte door de bodem is doorgedrongen tot aan de buitenwand van de waterleiding wordt eerst de warmte via geleiding door de leidingwand getransporteerd. De leidingwand geeft de warmte af aan het drinkwater. Hierdoor stijgt de temperatuur van het drinkwater. Het model dat de opwarming van het drinkwater onder invloed van weersomstandigheden, bodemeigenschappen en leiding- en stromingseigenschappen beschrijft, kan worden onderverdeeld in een bodemtemperatuurmodel en een watertemperatuurmodel:

- Het bodemtemperatuurmodel beschrijft de temperatuur van de bodem dat de drinkwaterleiding omringt, afhankelijk van weersomstandigheden en bodemeigenschappen (in Matlab®).
- Het watertemperatuurmodel beschrijft de temperatuur van het water op verschillende locaties in het distributienet afhankelijk van de temperatuur van de buitenwand van de leiding, de leidingeigenschappen, zoals leidingmateriaal en wanddikte en stromingseigenschappen van het water (in EPANET MSX).

Het model veronderstelt geen beïnvloeding van de temperatuur van de bodem door de temperatuur van het drinkwater. Voor het transportnet is deze aanname niet volledig houdbaar. Zie hiervoor bijlage II.



Figuur 3.1. Schematische weergave van de opwarming van het water in een leiding onder invloed van weersomstandigheden en omgeving (kortgolvlige en langgolvlige straling, turbulentie door wind en omgevingsruwheid, verdamping door vegetatie), bodemeigenschappen (warmtegeleiding en warmteoverdracht) en leiding- en stromingseigenschappen (warmtegeleiding en -overdracht van leidingmateriaal en stroomsnelheid).

In de twee modellen is een groot aantal variabelen en parameters aanwezig:

1. Instroomtemperatuur (bijv. temperatuur af pompstation of einde transportleiding);
2. temperatuur op de leidingwand (door beïnvloeding van de bodemtemperatuur);
3. warmteoverdrachtscoëfficiënt van de leidingwand (afhankelijk van het leidingmateriaal en wanddikte);
4. stroomsnelheid (afhankelijk van diameter en volumestroom);
5. contacttijd (verblijftijd), dit is een afgeleide parameter, te beïnvloeden door aanpassen leidingdiameter en watervraag;
6. de leidingdiameter, deze beïnvloedt zowel direct de temperatuuroverdracht door het volume van het water, als ook indirect door de invloed op wanddikte, stroomsnelheid en contacttijd.
7. albedo van de bodembedekking;
8. type bodembedekking (bijv. straatwerk of vegetatie);
9. warmtegeleidingscoëfficiënt, warmtecapaciteit en dichtheid van de grond (afhankelijk van de grondsoort);
10. diepteligging van de leidingen.

Het bodemtemperatuurmodel is binnen dit project beperkt ingezet. De temperatuur op verschillende dieptes onder het maaiveld is berekend voor het 2050 W+ scenario voor zandgrond met vegetatie of straatwerk als bodembedekking. Dit omvat de parameters 7, 8 en 9. Voor de scenario's (paragraaf 3.2) blijven de overige parameters over om mee te variëren.

Het drinkwatertemperatuurmodel is verder ontwikkeld en geschikt gemaakt voor verschillende typen stroming (stilstaand, laminair en turbulent). De warmteoverdrachtscoëfficiënt is een maat voor het vermogen dat per eenheid van oppervlak en per graad temperatuurverschil overgedragen wordt van de bodem naar het drinkwater. Deze coëfficiënt hangt af van de stromingscondities, de thermische eigenschappen van het leidingmateriaal, de wanddikte, de diameter en thermische eigenschappen van het water. De relatie voor het combineren van warmteoverdracht via de leidingwand aan het drinkwater is weergegeven in Vergelijking 1 (Blokker and Pieterse-Quirijns, 2013). De wanddikte wordt hier uitgedrukt als percentage van de diameter.

$$h = \frac{1}{D \left(\frac{\lambda_w}{\lambda_p \cdot WDR} + \frac{1}{Nu} \right)} \quad \text{Vergelijking 1}$$

h	=	gecombineerde warmteoverdrachtscoëfficiënt [W/(m ² .K)]
D	=	leidingdiameter [m]
λ_p	=	warmtegeleidingscoëfficiënt van leidingmateriaal [W/(m.K)]
λ_w	=	warmtegeleidingscoëfficiënt van water [W/(m.K)]
WDR	=	wand-diameter ratio: reciproque waarde van wanddikte gedeeld door leidingdiameter (1/(w/D)). Wanneer de wanddikte bijvoorbeeld 10% is van de leidingdiameter is de WDR gelijk aan 10.
Nu	=	Nusselt getal [-]

De warmtegeleidingscoëfficiënt van water is gelijk aan 0.6 W/(m.K). De warmtegeleidingscoëfficiënt van het leidingmateriaal is in EPANET MSX toegepast op basis van de wandruwheid² middels de volgende relatie (Blokker and Pieterse-Quirijns, 2012):

$$\lambda_p = \left\{ \begin{array}{lll} k < 0.1 & \lambda_p = 0.16 & \text{PVC} \\ 0.1 \leq k < 0.4 & \lambda_p = 0.43 & \text{AC} \\ k \geq 0.4 & \lambda_p = 8.9 & \text{gecementeerd gietijzer} \end{array} \right\} \quad \text{Vergelijking 2}$$

k	=	wandruwheid [mm]
-----	---	------------------

Het Nusselt getal representeert de verhouding tussen convectief en conductief warmtetransport in het water en hangt af van het getal van Prandtl en het getal van Reynolds. Voor water is het getal van Prandtl gelijk aan 7 voor temperaturen tussen 5 en 30°C. Het getal van Reynolds hangt van de stroomsnelheid, diameter en kinematische viscositeit. Het Reynoldsgetal wordt berekend in EPANET. Omdat we hier met SIMDEUM patronen werken is het belangrijk om de warmteoverdracht op het water bij zowel stilstaand water, laminaire stromingscondities als turbulente stromingscondities te modelleren wordt het Nusseltgetal bepaald door (Moerman, 2013):

² Dit als surrogaat voor het leidingmateriaal omdat dit gegeven niet beschikbaar is in het hydraulisch model.

$$Nu = \begin{cases} Re < 10 & 5.8 \\ 10 \leq Re < 2300 & 3.66 \\ Re \geq 2300 & 0.023 Re^{0.8} Pr^{1/3} \end{cases} \quad \text{Vergelijking 3}$$

Om de temperatuur in het distributienet te bepalen moet bekend zijn met welke temperatuur het drinkwater de Ø500 transportleiding verlaat. Voor het modelleren van de temperatuuroename in het transportnet is gebruik gemaakt van het temperatuurmodel dat ontwikkeld is binnen KWR. Uit modelberekeningen van TU Delft/Waternet blijkt dat wanneer er sprake is van grote diameters (Ø800-900 mm) en een constante water- en luchttemperatuur er na enkele maanden een evenwichtssituatie kan ontstaan (Olsthoorn, 2012). Hierbij ontstaat rond de leiding een zone waar de temperatuur mede bepaald wordt door de temperatuur van het drinkwater in de leiding. Wanneer deze evenwichtssituatie bereikt is wordt er minder warmte aan het drinkwater afgedragen door de bodem dan daarvoor (of andersom). Om het KWR model meer geschikt te maken voor het transportnet is het uitgebreid met een extra warmteweerstand. Deze weerstand bestaat uit een grondlaag rondom de buis met dikte d_g (zie bijlage II).

$$h = \frac{2\lambda_g}{D_g \ln(D_g/D_p)} \quad \text{Vergelijking 4}$$

λ_g	=	thermische geleidbaarheid van de grond
D_p	=	diameter inclusief leidingwand [m]
D_g	=	diameter inclusief grondlaag [m]

Waarmee Vergelijking 1 wordt omgezet in:

$$h = \left(\frac{\lambda_w Nu}{D} + \frac{D}{WDR\lambda_p} + \frac{D_g \ln(D_g/D_p)}{2\lambda_g} \right) \quad \text{Vergelijking 5}$$

Voor het transportnet wordt de aanname gedaan dat volumestromen nauwelijks temporele variaties vertonen en diameters groot zijn.

3.1.2 Model voor groei van fictieve micro-organismen

Omdat de effecten van een hogere drinkwatertemperatuur op de drinkwaterkwaliteit sterk samenhangen met de verblijftijd is het belangrijk om beide aspecten – temperatuur en verblijftijd – mee te nemen in de analyses. Om de verblijftijd mee te nemen in de scenario's is een model nodig dat kwantitatieve informatie geeft over de kwaliteit van het drinkwater als functie van de verblijftijd. Een dergelijk model is ontwikkeld binnen KWR en beschrijft de ontwikkeling van *fictieve* micro-organismen als functie van temperatuur. Het gebruik van dit model is niet zozeer bedoeld om de groei van micro-organismen te berekenen maar meer om een kwantitatieve analyse te maken van de drinkwaterkwaliteit bij een bepaalde temperatuur en verblijftijd. Deze parameter moet dus gezien worden als een surrogaatparameter waarvan de uitkomsten in kwantitatieve zin geen absolute betekenis hebben. De beschrijving van het model is hieronder weergegeven (Blokker and Pieterse-Quirijns, 2012).

$$\frac{dN}{dt} = \mu(T) \cdot N \quad \text{met} \quad \mu(T) = \mu_{opt} \cdot e^{-\frac{(T-T_{opt})^2}{0.2(T_{min}-T_{opt})^2}} \quad \text{Vergelijking 6}$$

N	=	aantal micro-organismen [-]
t	=	tijd [s]
$\mu(T)$	=	de groeisnelheid bij een bepaalde temperatuur T_{in} [s^{-1}]
μ_{opt}	=	de optimale groeisnelheid bij de optimale temperatuur T_{opt} in [s^{-1}]

T_{min}	=	de minimale groeitemperatuur [°C]
T_{opt}	=	de optimale groeitemperatuur [°C]
T	=	de heersende temperatuur [°C]

De parameterwaarden die binnen dit onderzoek gebruikt zijn om fictieve micro-organismen te modelleren zijn weergegeven in Tabel 3.1. De optimale groei van $4 \cdot 10^{-5}$ is gebaseerd op een toename van 1 naar 1000 micro-organismen in 48 uur, wat een meetbare waarde oplevert in een typisch drinkwaterleidingnet.

Tabel 3.1 Groeifsnellheid, optimale groeitemperatuur en minimale groeitemperatuur voor fictieve micro-organismen.

Waarde parameters in groeimodel		
μ_{opt} [s ⁻¹]	T_{min} [°C]	T_{opt} [°C]
$4 \cdot 10^{-5}$	5	25

3.1.3 Energieverbruik

Wanneer de temperatuur van het drinkwater verlaagd wordt heeft dit consequenties voor de energiebehoefte van huishoudens voor de bereiding van warm tapwater. Het energieverbruik voor het bereiden van warm tapwater in huishoudens kan berekend worden middels Vergelijking 7.

$$E_i = \frac{1}{\eta} (T_{warm} - T) c_p Q \rho j \frac{t}{3600} \quad \text{Vergelijking 7}$$

E_i	=	energie benodigd voor opwarmen water in huishoudens voor tijdstap i [J]
η	=	rendement tijdens opwarming [-]
T_{warm}	=	temperatuur van warm water [°C]
T	=	temperatuur water in distributienet [°C]
c_p	=	specifieke warmte water [J/(kg.K)]
ρ	=	dichtheid van water [kg/m ³]
j	=	percentage van volumestroom dat verwarmd wordt [-]
Q	=	volumestroom [m ³ /h]
t	=	duur één tijdstap [s]

Uitgegaan wordt van $T_{warm} = 40^\circ\text{C}$, een volumestroompercentage (j) van 60% en een rendement (η) van 80% (Blokker *et al.*, 2013; Blokker, 2011)³. De specifieke warmte van water bedraagt 4185 J/(kg.K), de dichtheid 1000 kg/m³ en de tijdsduur van 1 tijdstap is gelijk aan 5 minuten (300 s).

3.1.4 Simulatietijd

Om de invloed van gekozen startcondities te vermijden bedraagt de simulatieperiode drie dagen. Alleen de resultaten van de derde dag worden meegenomen in de analyse.

3.2 Randvoorwaarden temperatuurmodel in de scenario's

3.2.1 Inleiding

Om de temperatuur in het hydraulisch model (Figuur 2.5) te kunnen berekenen moet bekend zijn met welke temperatuur het drinkwater de transportleiding verlaat en het

³ In de T_{warm} van 40°C zijn de verschillende warmtevragen in de huishoudens verdisconteerd.

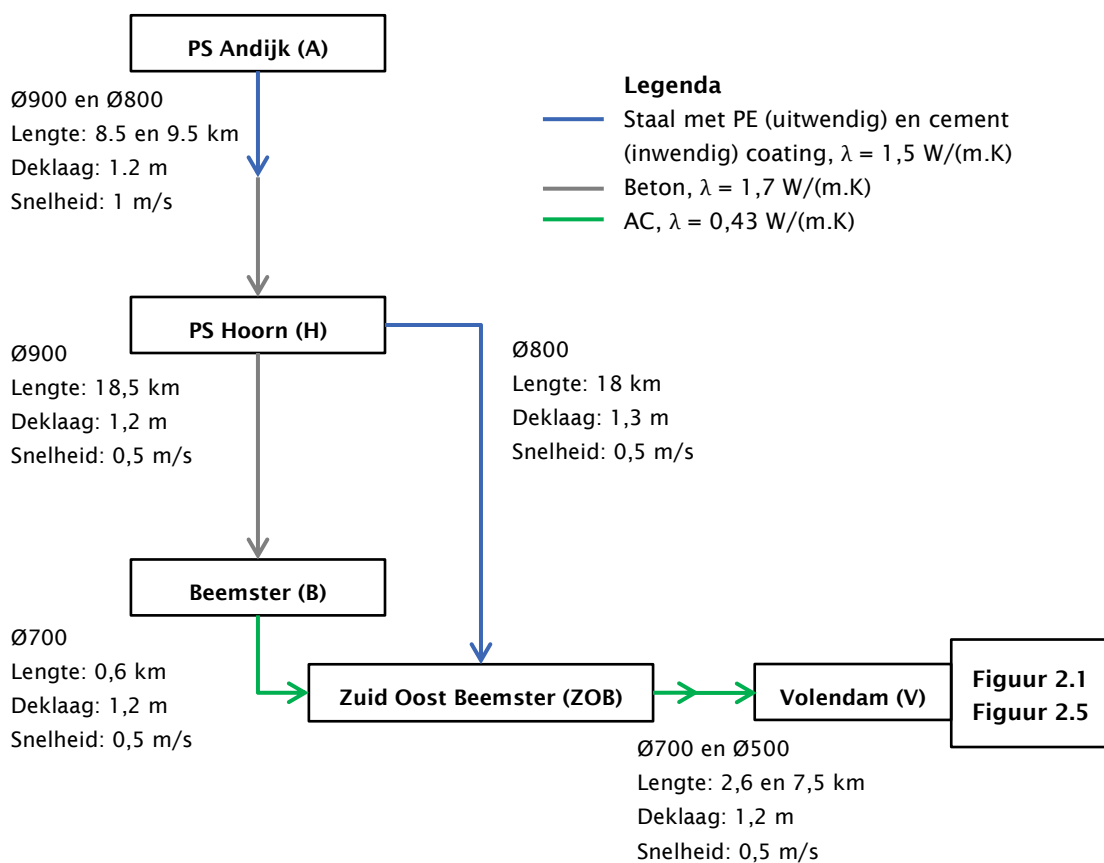
distributiegebied instroomt. Er zijn geen coatings toegepast, behalve bij de stalen leiding. De stalen leidingdelen zijn van binnen gecoat met een cementcoating van 10 mm dikte. Uitgegaan is van een 3 mm PE coating. De wanddikte van de stalen leidingdelen bedraagt 8 mm. Middels Vergelijking 8 kan een gemiddelde thermische geleidbaarheid voor de stalen leidingdelen berekend worden. De thermische geleidbaarheid van PE, staal en cement zijn respectievelijk 0,4, 43 en 1,7 W/(m.K).

$$\lambda_{tot} = \frac{d_{w,tot}}{\frac{d_{w,1}}{\lambda_1} + \frac{d_{w,2}}{\lambda_2} + \frac{d_{w,3}}{\lambda_3}}$$

Vergelijking 8

Invullen van waarden voor wanddikten en thermische geleidbaarheden zoals hierboven genoemd geeft een gemiddelde geleidbaarheid van 1,5 W/(m.K) voor gecoate stalen leidingdelen.

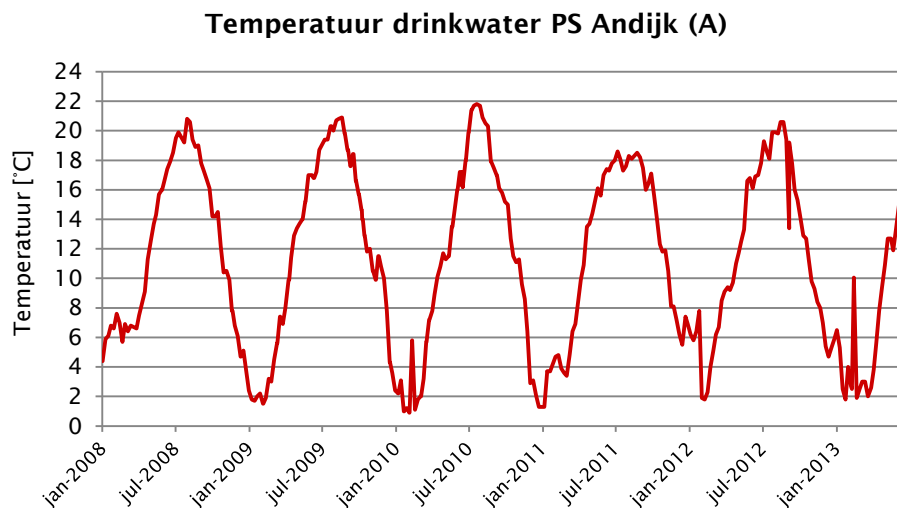
In Figuur 3.2 is schematisch het transportnet van pompstation Andijk naar het distributienet Volendam weergegeven. De locatie-indicaties (A) (Andijk), (H) (Hoorn), (B) (Beemster), (ZOB) (Zuidoost Beemster) en (V) (Volendam) worden verderop in de tekst gebruikt om te verwijzen naar locaties in dit schema.



Figuur 3.2. Schema traject drinkwatertransport van pompstation Andijk tot Volendam met de relevante informatie per leiding. Bron: (Blokker and Pieterse-Quirijns, 2012) en PWN.

3.2.2 Ingaande temperatuur af pompstation (A)

Figuur 3.3 toont de temperatuur van het drinkwater bij pompstation Andijk gedurende enkele jaren.



Figuur 3.3. Temperatuur drinkwater bij PS Andijk van januari 2008 tot halverwege 2013.

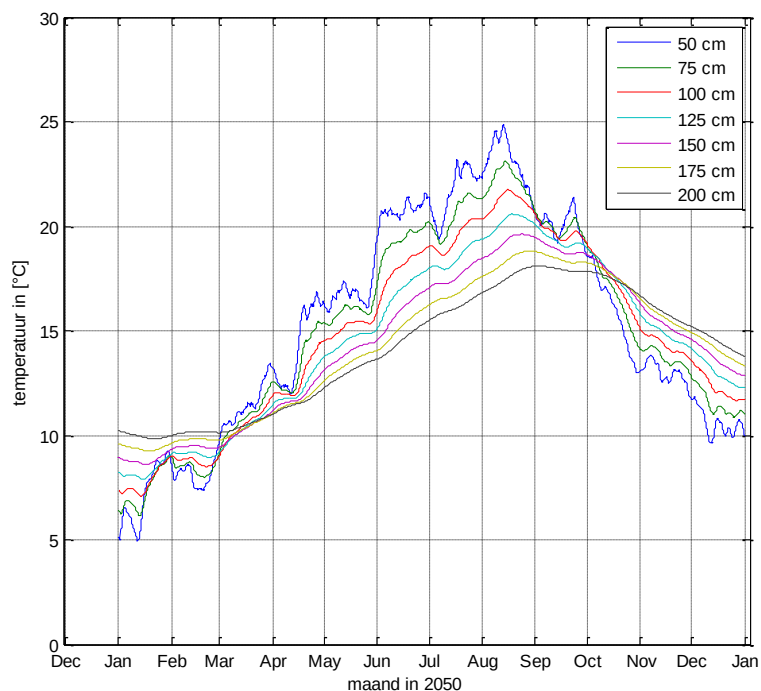
Het maximum en minimum uit deze grafiek zijn gebruikt als randvoorwaarden voor de ingaande temperatuur voor het transportleidingmodel om de temperatuur van het drinkwater aan het einde van de transportleiding (V) te kunnen berekenen voor het KNMI 2050 W+ scenario zomer en winter. De minimum- en maximumtemperatuur in de dataset weergegeven in Figuur 3.3 zijn respectievelijk 22°C en 1°C. Uit literatuur volgt dat de temperatuurstijging van het oppervlaktewater bij Andijk in het 2050 W+ scenario tot 2050 stijgt met 2,5°C in de zomer en 1°C in de winter (Burgos and van den Beld, 2009). Op basis van deze informatie is een maximum (zomer) temperatuur berekend van $22 + 2,5 = 24,5^{\circ}\text{C}$ en een minimum (winter) temperatuur van $1 + 1 = 2^{\circ}\text{C}$.

Tabel 3.2. Temperatuur ingenomen water Andijk (A) in het 2050 W+ scenario en in de huidige situatie (winter).

Situatie	Temperatuur (A) [°C]	bron
2050 W+ scenario, zomer	24,5	metingen PWN (zie Figuur 3.3) en literatuur (Burgos and van den Beld, 2009)
2050 W+ scenario, winter	2	metingen PWN (zie Figuur 3.3) en literatuur (Burgos and van den Beld, 2009)

3.2.3 Ingaande temperatuur Volendam

Met het bodemtemperatuurmodel is de bodemtemperatuur in het 2050 W+ scenario berekend voor een kleibodem met vegetatie als bodembedekking. Hierbij is aangenomen dat de transportleidingen in een kleibodem liggen in ruraal gebied waarbij de bodem bedekt is door bijvoorbeeld gras. De resultaten van deze modellering zijn weergegeven in Figuur 3.4.



Figuur 3.4. Gemodelleerde bodemtemperatuur voor het 2050 W+ scenario op verschillende dieptes bij een kleibodem en vegetatie als bodembedekking.

De maximale (zomer) en minimale (winter) bodemtemperatuur die optreden in het 2050 W+ scenario op een diepte van voor transportleidingen in kleigrond met vegetatieve bodembedekking zijn weergegeven in Tabel 3.3.

Tabel 3.3. Bodemtemperatuur in 2050 W+ scenario op 1,6 m onder het maaiveld bij zandgrond met vegetatieve bodembedekking voor zomer en winter.

Situatie	Temperatuur bodem transportleiding [°C]	bron
2050 W+ scenario, zomer	19	Modelberekeningen (zie Figuur 3.4)
2050 W+ scenario, winter	9	Modelberekeningen (zie Figuur 3.4)

Met het temperatuurmodel is vervolgens de temperatuur van het drinkwater aan het einde van de transportleiding (V) berekend. Er zijn twee routes die het water af kan leggen van pompstation Hoorn (H) naar Volendam (V). Voor de temperatuur van het water aan het einde van de transportleiding (V) maakt het geen significant verschil langs welke route het water stroomt. In beide situaties geldt dat het water voor 48% de bodemtemperatuur aangenomen heeft⁴. De temperaturen aan het einde van de transportleiding (V) zijn voor beide weersscenario's weergegeven in Tabel 3.4.

⁴ Dat wil zeggen dat het verschil tussen de temperatuur in (A) en de bodemtemperatuur en ter plaatse van (V) voor 48% overbrugd is. Kortom: $T_{(V)} = (T_{\text{bodem}} - T_{(A)}) \cdot 0,48 + T_{(A)}$.

Tabel 3.4. *Temperatuur drinkwater bij uitstroming Ø500 transportleiding (V).*

Situatie	Temperatuur einde TL (V) [°C]
2050 W+ scenario, zomer	22
2050 W+ scenario, winter	5

Met het model voor de groei van fictieve micro-organismen is op basis van de temperatuur de groei van fictieve m.o. berekend gedurende de verblijftijd in het transportnet. De beginconditie (bij (A)) voor het aantal fictieve m.o. is in elke situatie gelijk aan 1.

Tabel 3.5. *Aantal fictieve micro-organismen bij einde transportleiding (V) voor verschillende situaties.*

Situatie	Aantal fictieve m.o.
2050 W+ scenario, zomer	10
2050 W+ scenario, winter	1

Er wordt gerekend met een relatieve surrogaatparameter omdat deze parameter geen absolute waarde heeft. Daarom wordt het aantal fictieve m.o. gedeeld wordt door het beginaantal fictieve m.o. Omdat de beginconditie van het aantal fictieve m.o. (N_0) gelijkgesteld is aan 1 is de relatieve groei (N/N_0) bij het einde van de transportleiding gelijk aan het aantal fictieve m.o. aan het einde van de transportleiding ($N/N_0 = N$).

3.2.4 Ingaande temperatuur Volendam na WKO

Zoals aangegeven in paragraaf 2.2.3 wordt uitgegaan van een temperatuurverandering van - 4 graden in de zomer (scenario "2-WKO zomer") en +4 graden in de winter (scenario "2-WKO winter"). De uitgaande temperaturen met gebruik van WKO zijn weergegeven in Tabel 3.6.

Tabel 3.6. *Temperatuur drinkwater bij uitstroming Ø500 transportleiding (V) bij inzet WKO.*

Situatie	Temperatuur einde TL (V) [°C]
2050 W+ scenario, zomer	18
2050 W+ scenario, winter	9

3.2.5 Bodemtemperatuur distributienet

In bebouwde omgeving liggen de meeste distributieleidingen onder een verhard oppervlak (meestal trottoir). In het bodemmodel is daarom uitgegaan van een verhard oppervlak in de vorm van staatwerk (tegels). Omdat de leidingen op een diepte van 1 meter liggen wordt er van uitgegaan dat de bodem uit zand bestaat omdat in woonwijken voor de bouw meestal grondverbetering wordt toegepast. Op een diepte van 1 meter onder het maaiveld is de dagelijkse fluctuatie van de bodemtemperatuur te verwaarlozen (Molen *et al.*, 2008). Er wordt daarom uitgegaan van een constante bodemtemperatuur gedurende de simulatietijd. De bodemtemperatuur in het distributienet voor beide weerscenario's (2050 W+ zomer en winter) kunnen vervolgens afgelezen worden uit het in paragraaf 3.2.3 weergegeven Figuur 2.8. de bodemtemperaturen voor beide weerscenario's zijn weergegeven in de onderstaande tabel.

Tabel 3.7. Bodemtemperaturen in 2050 W+ scenario op 1 meter onder het maaiveld bij verhard oppervlak (straatwerk) en zandgrond in zomer en winter.

Situatie	Temperatuur		bron
	bodem distributienet [°C]		
2050 W+ scenario, zomer	28		Literatuur (zie Figuur 2.8)
2050 W+ scenario, winter	5		Literatuur (zie Figuur 2.8)

3.2.6 Materiaaleigenschappen

Omdat wanddiktes in het hydraulisch model niet bekend zijn wordt voor de verschillende leidingmaterialen de wanddikte aangenomen als percentage van de diameter (zie Tabel 3.8). Deze verhoudingen zijn gebaseerd op gemiddelden uit producttabellen van leidingproducenten.

Tabel 3.8. Wanddiktes als percentage van diameter en warmtegeleidingscoëfficiënten voor verschillende materialen (Blokker and Pieterse-Quirijns, 2012; Eternit, ~1980).

Materiaal	Percentage wanddikte/ binnendiameter	Wand-diameter ratio (WDR)	Warmtegeleidings- coëfficiënt [W/(m.K)]
AC	10%	10	0,43
PVC	3%	35	0,16
Gecementeerd gietijzer	7%	15	8,9
PE	15%	6,7	0,4

In het distributiegebied van Volendam liggen voornamelijk PVC (60%) en AC (17%) leidingen. Omdat er ook PE leidingen liggen is onderzocht in hoeverre deze de resultaten beïnvloeden. Een meer uitgebreide beschrijving hiervan is te vinden in bijlage I. Geconcludeerd is dat PE niet expliciet meegenomen hoeft te worden.

3.3 Samenvatting uitgangspunten per scenario

In Tabel 3.9 zijn de uitgangspunten van de temperatuur bij pompstation Andijk (A), het einde van de transportleiding (V) en temperatuur op de wand (in het distributienet) gegeven voor de verschillende scenario's.

Tabel 3.9. Uitgangspunten voor doorgerekende scenario's.

naam	Temp. (A)	Temp. (V)	Temp. bodem	Verbruik	Bijzonderheden
0-zomer	24,5	22	28	Gemiddeld	
0-winter	2	5	5	Gemiddeld	
0-maxdag	24,5	22	28	Maxdag	
1-spuien	24,5	22	28	Gemiddeld	Spuien op knopen zonder verbruik van 7.00 tot 19.00 uur
1-extra Q	24,5	22	28	Gemiddeld	Verbruik op knopen met verbruik factor 1,5 groter
2-WKO zomer	24,5	22 - 4	28	Gemiddeld	
2-WKO winter	2	5 + 4	5	Gemiddeld	

3-dieper zomer	24,5	22	26	Gemiddeld	43% vervangen ⁵
3-dieper winter	2	5	7,5	Gemiddeld	43% vervangen ³

3.4 Beoordelingscriteria

Voor de beoordeling van de verschillende scenario's en het vergelijken van business cases zijn beoordelingscriteria nodig. Het drinkwater dat geleverd wordt aan de consument moet op het leveringspunt voldoen aan de eisen van het drinkwaterbesluit. Dit houdt in dat de drinkwatertemperatuur niet boven de 25°C mag komen. Hoewel het onderzoek focust op temperatuur moet ook de verblijftijd in beschouwing genomen worden wanneer de waterkwaliteit in beschouwing wordt genomen. Als surrogaatparameter voor de combinatie temperatuur-verblijftijd is het fictieve m.o. model gebruikt (paragraaf 3.1). Ook heeft een eventuele verlaging van de temperatuur gevolgen voor het energiegebruik van huishoudens. Bij een lagere drinkwatertemperatuur is meer energie nodig voor de bereiding van warm tapwater. De verschillende criteria die gebruikt worden zijn hieronder in volgorde van afnemende prioriteit weergegeven:

- Aantal aansluitingen met een temperatuur >25°C ergens op de dag als percentage van totaal aantal aansluitingen in analysegebied.
- Totale tijd per aansluiting per dag waarbij de temperatuur hoger is dan 25°C *tijdens waterverbruik*.
- Som relatief aantal fictieve m.o. per aansluiting ($\Sigma(N/N_0 * Q)$) per dag vermenigvuldigd met de volumestroom. Een percentage hiervan wordt daadwerkelijk ingenomen middels het drinken van ongekookt water of via aerosolen tijdens het douchen.
- Energieverbruik per aansluiting voor bereiding van warm tapwater per dag.

⁵ Elke set leidingen in de twee scenario's voor dieper leggen maakt gebruik van dezelfde willekeurig bepaalde leidingen (43%) die dieper gemodelleerd zijn.

4 Kwantificeren kosten

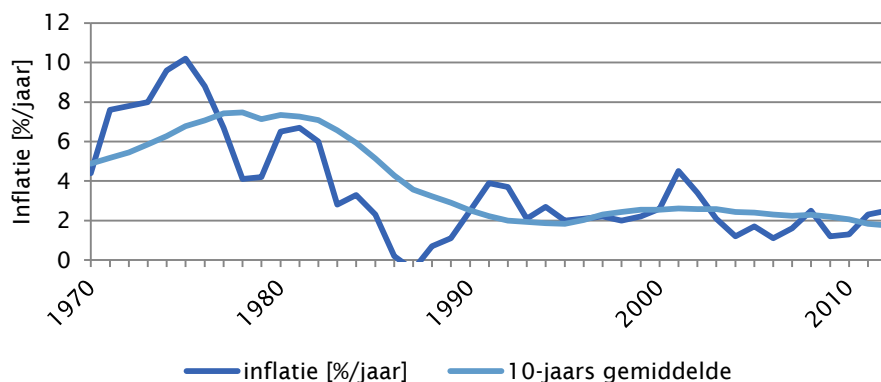
4.1 Contant maken kosten

Voor het kwantificeren van de kosten die verbonden zijn aan de verschillende maatregelen is de Netto Contante Waarde (NCW) methode gebruikt. Dit houdt in dat kosten en opbrengsten in de toekomst *contant* gemaakt worden naar het heden. Dit wordt gedaan onder aanname van een inflatiepercentage:

$$HW = \frac{TW}{(1 + i)^t} \quad \text{Vergelijking 9}$$

HW	=	huidige waarde [€]
TW	=	toekomstige waarde [€]
i	=	inflatiepercentage [-]
t	=	tijd [jaar]

Op deze manier wordt waarde in de toekomst uitgedrukt in termen van het heden. Dit is een goede methode om waarde in heden en toekomst te vergelijken. In Figuur 4.1 is de jaarlijkse inflatie in Nederland weergegeven vanaf 1963 tot 2012. Het schatten van een inflatiepercentage is lastig. In Figuur 4.1 is te zien dat het 10-jaars gemiddeld vanaf 1990 rond de 2% fluctueert. Bij de NCW berekeningen is daarom uitgegaan van 2% inflatie per jaar.



Figuur 4.1. Gemiddelde jaarlijkse inflatie in Nederland vanaf 1963 tot 2012. Bron: CBS Statline.

4.2 Kosten voor WKO

De investeringskosten van de WKO-installatie die aangesloten wordt op de drinkwaterleiding en in hoofdlijnen omschreven is in paragraaf 3.2.4 bedragen € 334.000,- (excl. BTW). In Tabel 4.1 is een gedetailleerde omschrijving van de opbouw van de kosten opgenomen.

Tabel 4.1. Investeringskosten WKO (bron: IF Technology).

Bronnen en putbehuizingen, met o.a.: • 2 bronnen tot 175 m-mv (afstand 125 m) • 2 half bovengrondse putbehuizingen in groenstrook	€	110.000,-
Leidingwerk en appendages in bronnen en putten, met o.a.: • bronkoppen, bronpompen, leidingwerk, kleppen, etc. grondwaterzijdig • leidingwerk, kleppen, etc. drinkwaterzijdig • dubbelwandige platenwisselaar	€	100.000,-
Transportleidingen, met o.a.: • grondwaterleiding tussen bronnen • aansluiting op drinkwaterleiding • motorbediende afsluiter in drinkwatertransportnet	€	35.000,-
Regeling en bekabeling, met o.a.: • voeding inclusief voedingskast Liander (buitenopstelling) • regelkast (buitenopstelling) • bekabeling • gebouwbeheersysteem	€	45.000,-
Subtotaal:	€	290.000,-
Onvoorzien 10%	€	29.000,-
Vergunningen, met o.a.: • Waterwet • lozingen • leges	€	15.000,-
Totaal:	€	334.000,-

Na 15 en 30 jaar is er een herinvestering nodig van € 80.000 (prijspeil 2014).

De jaarlijkse exploitatiekosten van de WKO installatie bedragen € 11.500,- (excl. BTW). De exploitatiekosten worden in sterke mate bepaald door de duur dat de WKO in bedrijf is om de temperatuur van het drinkwater te verlagen. Het aantal dagen dat de WKO in gebruik is voor koeling van drinkwater is gebaseerd op het aantal dagen dat de temperatuur op 1 meter beneden maaiveld⁶ boven de 25°C komt. In 2050 zijn dit naar verwachting 45 dagen per jaar (Pieterse-Quirijns *et al.*, 2011). Er wordt aangenomen dat tussen 2015 en 2050 het aantal dagen per jaar dat de WKO ingezet wordt lineair toeneemt van 16 (huidige situatie) naar 45 dagen per jaar. De operationele kosten van de WKO worden in de business case gecorrigeerd voor deze toename. Er wordt aangenomen dat er geen vreemd vermogen nodig is om de investeringen te dekken.

Tabel 4.2. Jaarlijkse exploitatiekosten WKO bij 45 dagen inzet per jaar (bron: IF Technology).

Elektraverbruik bronpompen: • 33.000 kWh @ € 0,10/kWh_e	€	2.600,-
Onderhoudskosten: • 2% van aanneemsom	€	6.400,-
Kosten monitoring vergunning Waterwet:	€	2.500,-
Totaal:	€	11.500,-

⁶ Hierbij wordt uitgegaan van zandgrond in stedelijk gebied (straatwerk als bodembedekking).

4.2.1 Gevoeligheidsanalyse

Het koelvermogen, de hierbij behorende grootte van het grondwaterdebiet en de investerings- en exploitatiekosten zijn ook bepaald voor koeling van het drinkwater met een temperatuurverschil van 2 en 6°C. In onderstaande tabel is hier een samenvatting van weergegeven.

Tabel 4.3. Gevoeligheidsanalyse exploitatiekosten WKO bij ΔT van 2, 4 en 6°C.

dT °C	vermogen kW	grondwaterdebiet m³/h	investeringskosten €	exploitatiekosten €
2	700	75	295.000,-	9.400,-
4	1.400	150	334.000,-	11.500,-
6	2.100	225	370.000,-	13.600,-

4.3 Kosten voor dieper leggen van leidingen

Door PWN is een berekening gemaakt voor het gehele leidingnet van PWN met een lengte van 10.300 km. Omdat de leidinglengte in het analysegebied van case Volendam 45 km bedraagt moeten de bedragen uit Tabel 4.4 en Tabel 4.5 omgerekend worden met een factor 45/10300. Daarna zijn de meerkosten berekend van het dieper leggen ten opzichte van het leggen van leidingen op normale diepte.

Tabel 4.4. Investeringskosten dieper leggen leidingen (bron: PWN).

Investeringskosten elk jaar in de periode 2015-2050	leiding op 1,00 meter	leiding op 1,50 meter
aannemerskosten van nieuw aan te leggen distributieleidingen	35 km nieuwe distributieleiding kengetal aannemerskosten € 28.000 € 980.000	 stijging kengetal met 70 % € 1.666.000
aannemerskosten van distributieleidingen, die worden gelegd ter vervanging van bestaande distributieleidingen	115 km te vervangen distributieleiding kengetal aannemerskosten € 110.000 € 12.650.000	 stijging kengetal met 70 % € 21.505.000
aannemerskosten van nieuwe aan te leggen aansluitleidingen	4.500 nieuwe aansluitleidingen kengetal aannemerskosten € 300 € 1.350.000	 stijging kengetal met 70 % € 2.295.000
Totaal investeringskosten jaarlijks	€ 14.980.000	€ 25.466.000
Omrekening testcase Volendam Meerkosten dieper leggen	Totaal x 45/10300 € 65.000	totaal x 45/10300 € 111.000 € 46.000

Tabel 4.5. Operationele kosten dieper leggen leidingen (bron: PWN).

Operationele kosten jaarlijks geleidelijk toenemend tussen 2015 en 2050	leiding op 1,00 meter	leiding op 1,50 meter
kosten door gewonden onder monteurs bij het graven van sleuven (berekend met risicomatrix PWN)	effect van ziekenhuisopname of langdurig verzuim = € 300.000 kans op dit effect = 1 keer per jaar risico = € 300.000	kans op dit effect = 2 keer per jaar risico = € 600.000
kosten voor het repareren van lekke distributieleidingen	aantal storingen in 2050 ligt naar verwachting op 1.500 storingen kengetal aannemerskosten € 1.000 € 1.500.000	minder storingen omdat circa 43 % leidingen inmiddels op 1,50 m ligt: stel 1.200 storingen kengetal aannemerskosten € 1.500 € 1.800.000
schade aan eigendommen van derden bij lekkage van de leiding	jaarlijks schadebedrag € 246.000 € 246.000	stijging met 100 % door diepere kuilen en doordat lek later onderkend wordt € 492.000
schade door bevriezing van het drinkwater in leidingen	komt niet of nauwelijks voor € 0	zal niet voorkomen € 0
schade door graafwerkzaamheden van derden	oninbaar schadebedrag € 43.000 + schades waarbij dader niet kan worden achterhaald € 65.000 € 108.000	volgens DPW-rapport KWR 2011.022 neemt schade af met 70 % € 32.400
Totaal operationele kosten jaarlijks	€ 2.154.000	€ 2.924.400
Omrekening testcase Volendam Meerkosten dieper leggen	totaal x 45/10300 € 9.000	totaal x 45/10300 € 13.000 € 4.000

De operationele kosten nemen lineair toe gedurende de evaluatieperiode. Dat wil zeggen dat de operationele meerkosten in 2050 € 4.000 per jaar bedragen. Wanneer de totaalbedragen omgerekend voor testcase Volendam uit Tabel 4.4 en Tabel 4.5 opgeteld worden resulteert dat in totale meerkosten van € 46.000 + € 4.000 = € 50.000 per jaar ten opzichte van het leggen van leidingen op een diepte van 1 m onder maaiveld. Er wordt aangenomen dat er geen vreemd vermogen nodig is om de investeringen te dekken.

5 Resultaten

5.1 Temperatuur: overschrijding 25 graden norm

In deze paragraaf zijn voor alle scenario's de resultaten weergegeven voor het eerste beoordelingscriterium uit paragraaf 3.4 op de 763 aansluitingen die in het analysegebied vallen. In Tabel 5.1 is voor elk scenario het percentage aansluitingen te zien waarbij de wettelijke maximumtemperatuur (25°C) op een zeker moment overschreden wordt.

Tabel 5.1. Percentage aansluitingen waar maximumtemperatuur overschreden wordt (criterium 1).

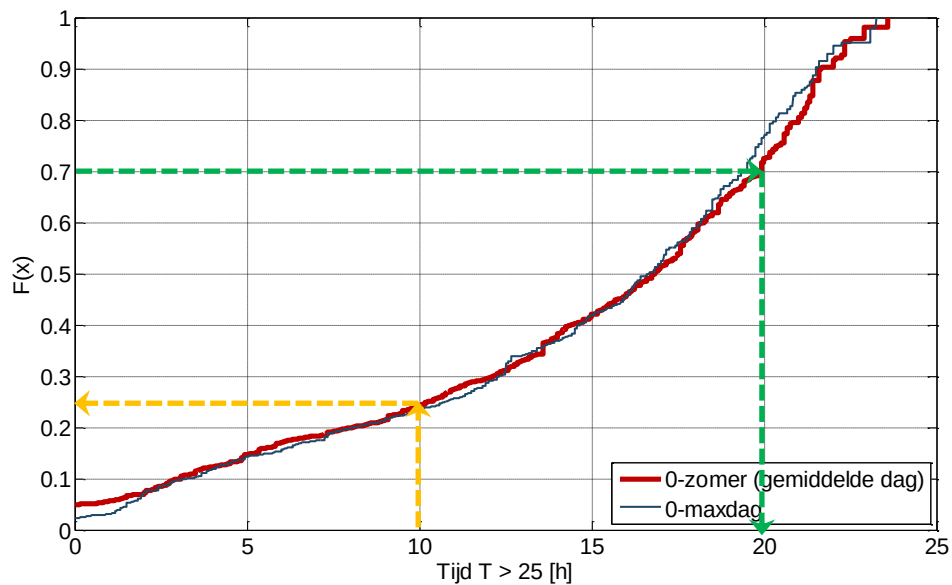
Scenario	Aansluitingen met overschrijding [%]
0-zomer	95
0-winter	0
0-maxdag	98
1-spuien	95
1-extra Q	95
2-WKO zomer	91
2-WKO winter	0
3-dieper zomer	93
3-dieper winter	0

In Tabel 5.1 is goed te zien dat de absolute waarden van overschrijding weinig inzicht geven. Duidelijk is dat de mitigerende maatregelen spuien en vergroten verbruik geen en de opties WKO en dieper leggen nauwelijks effect hebben in dit criterium.

5.2 Temperatuur: duur van overschrijding 25 graden norm

Het tweede beoordelingscriterium is het aantal uren overschrijding van de wettelijke maximumtemperatuur per aansluiting *tijdens verbruik*. In deze resultaten is het verschil in resultaat tussen de verschillende scenario's meer inzichtelijk.

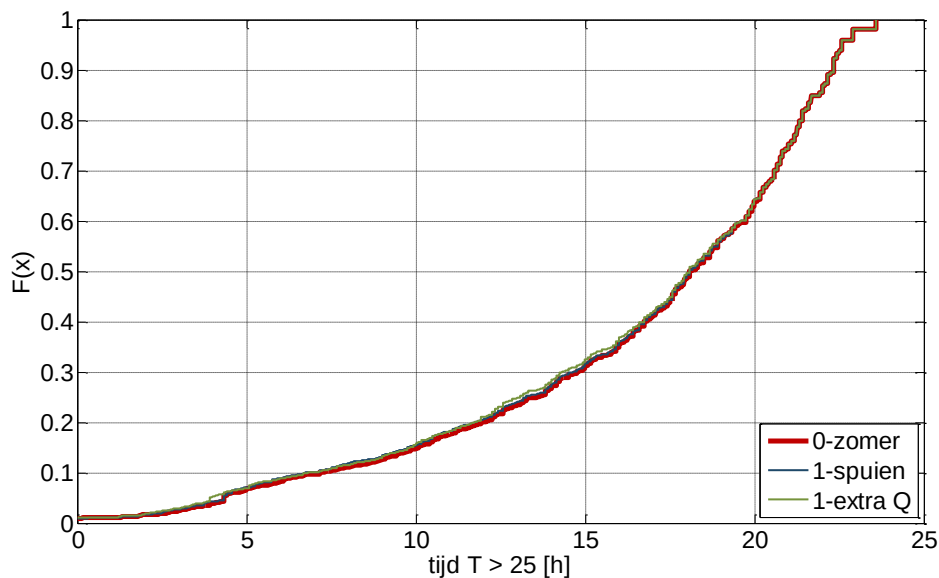
In Figuur 5.1 is een voorbeeld gegeven hoe de grafiek afgelezen kan worden. Wanneer de gele pijlen gevolgd worden is te zien dat in het 0-zomer scenario 20% van de aansluitingen een overschrijding heeft van maximaal 10 uur tijdens verbruik gedurende 24 uur. De grafiek kan ook andersom gelezen worden: wanneer de groene pijlen gevolgd worden is te zien dat de waarde op de horizontale as behorend bij het 70^e percentiel ($F(x) = 0.7$) ongeveer gelijk is aan 20 uur overschrijding tijdens verbruik. Dit wil zeggen dat bij 70% van de aansluitingen een overschrijding tijdens verbruik heeft *kleiner* dan 20 uur (of 30% een overschrijding *groter* dan 20 uur).



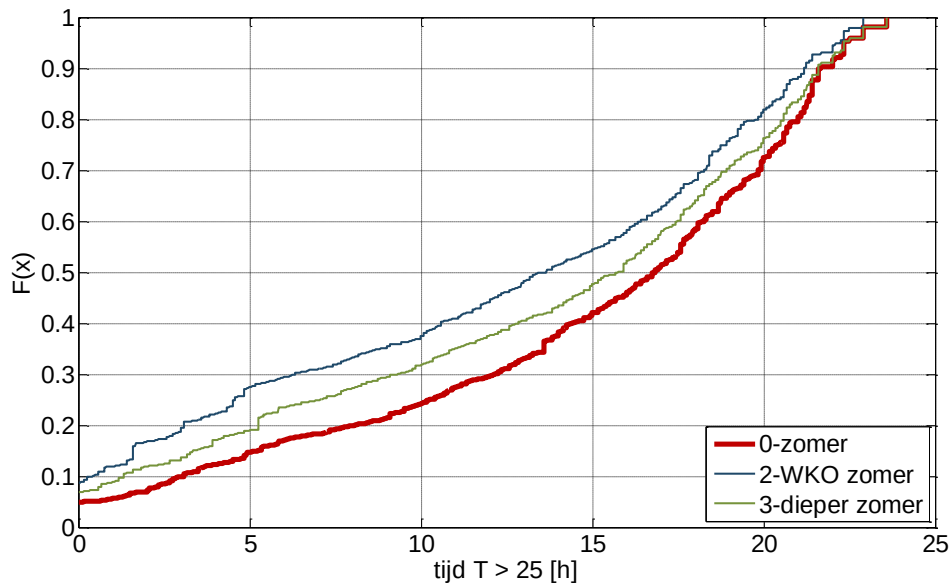
Figuur 5.1. Cumulatieve frequentieverdeling tijd van overschrijding temperatuurnorm tijdens verbruik voor iedere aansluiting.

In Figuur 5.1 is te zien dat het resultaat voor tijdsoverschrijding in scenario “0-maxdag” nauwelijks verschilt van het 0-scenario “0-zomer” (gemiddelde dag).

In Figuur 5.2 en Figuur 5.3 zijn de scenario’s “1-spuien”, “1-extra Q”, “2-WKO zomer” en “3-dieper zomer” vergeleken met het 0-scenario “0-zomer” voor het tweede criterium.



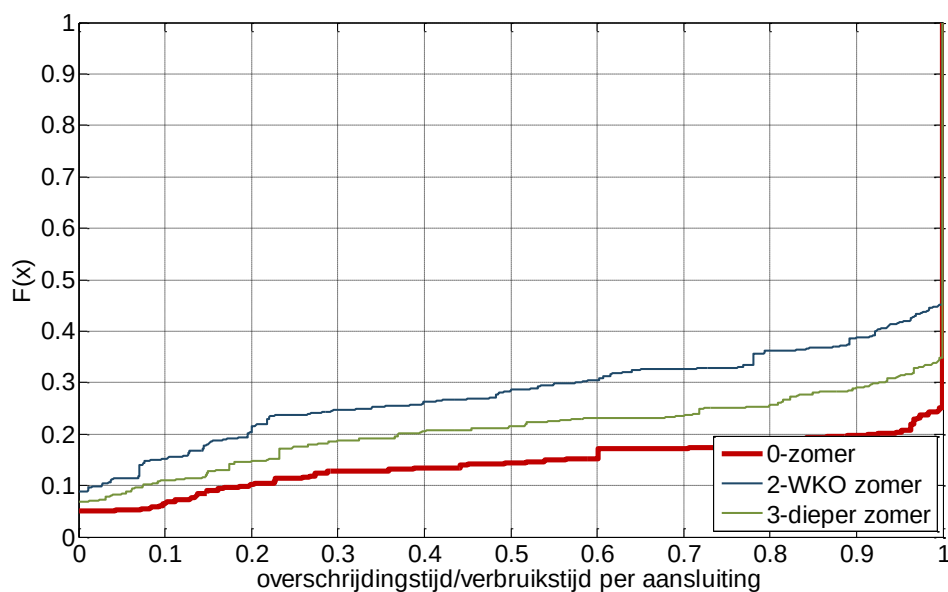
Figuur 5.2. Cumulatieve frequentieverdeling tijd van overschrijding temperatuurnorm tijdens verbruik voor iedere aansluiting.



Figuur 5.3. Cumulatieve frequentieverdeling tijd van overschrijding temperatuurnorm tijdens verbruik voor iedere aansluiting.

In Figuur 5.2 is te zien dat de mitigerende maatregelen uit de scenario's "1-spuien" en "1-extra Q" geen significant effect hebben op het terugdringen van tijd dat de temperatuur hoger is dan 25°C. In Figuur 5.3 is te zien dat het dieper leggen van leidingen nauwelijks leidt tot een kortere tijd van overschrijding. Het inzetten van een WKO heeft meer effect, maar ook dit is beperkt.

In Figuur 5.4 is de overschrijdingstijd per aansluiting (Figuur 5.3 hierboven) gedeeld door de verbruikstijd per aansluiting. Dit geeft een beeld van de overschrijdingstijd per aansluiting als percentage van de totale verbruikstijd.



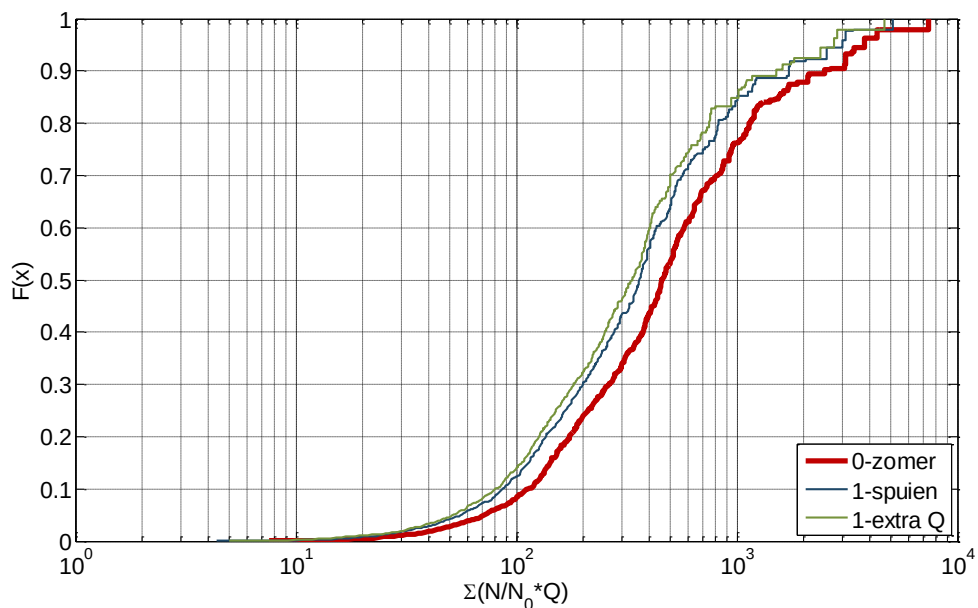
Figuur 5.4. Cumulatieve frequentieverdeling tijd van overschrijding temperatuurnorm tijdens verbruik voor iedere aansluiting gedeeld door de totale verbruikstijd per aansluiting.

Te zien is dat in het 0-scenario 75% van de aansluitingen de overschrijdingstijd gelijk is aan de verbruikstijd (overschrijdingstijd/verbruikstijd = 1). Voor het scenario “2-WKO zomer” is dit 55% en voor het scenario “3-dieper zomer” is dit 65%.

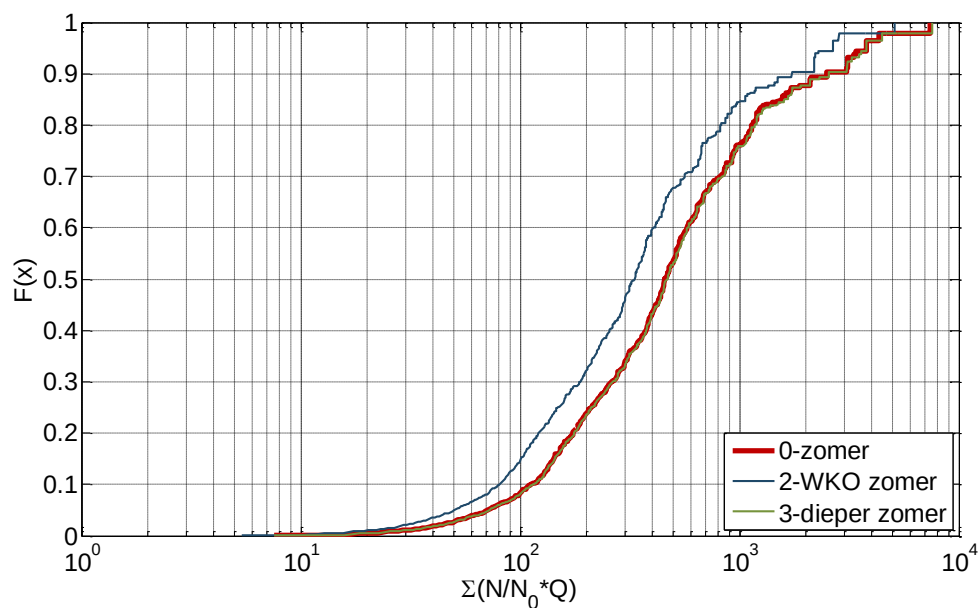
Omdat er in de winter geen temperatuuroverschrijdingen plaats vinden (zie Tabel 5.1) zijn de resultaten van de scenario's “0-winter”, “2-WKO winter” en “3-dieper winter” voor de overschrijdingsduur niet grafisch weergegeven.

5.3 Surrogaatparameter voor groei fictieve micro-organismen

In Figuur 5.5 en Figuur 5.6 zijn de scenario's “1-spuien”, “1-extra Q”, “2-WKO zomer” en “3-dieper zomer” vergeleken met het 0-scenario “0-zomer” voor het derde criterium.



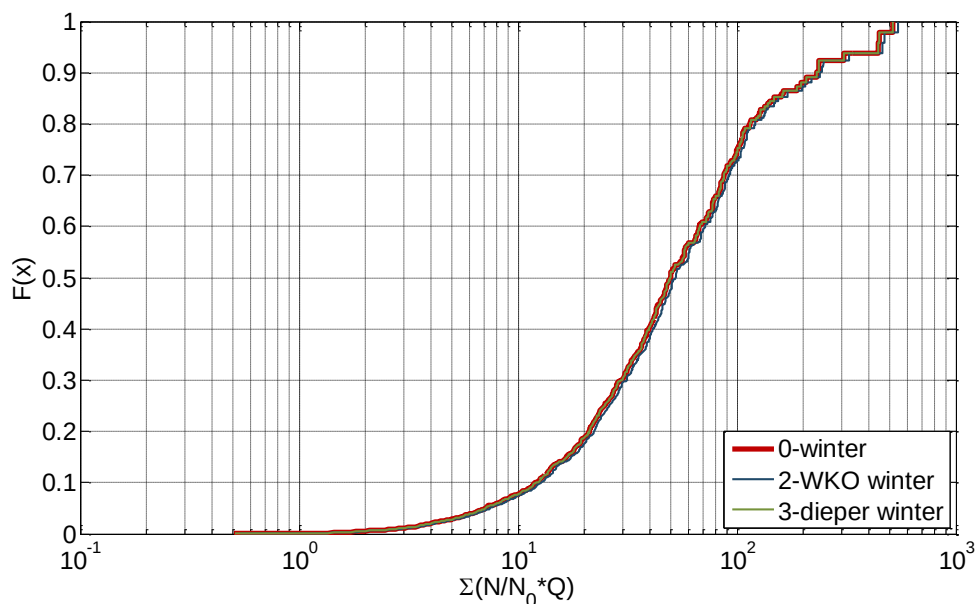
Figuur 5.5. Cumulatieve frequentieverdeling surrogaatparameter.



Figuur 5.6. Cumulatieve frequentieverdeling surrogaatparameter.

In Figuur 5.5 is te zien dat de mitigerende maatregelen uit de scenario's "1-spuien" en "1-extra Q" een klein positief effect (0,2 log reductie gemiddeld) hebben op de surrogaatparameter voor fictieve micro-organismen. De wijze van verbruik vergroten (in distributienet "1-spuien" of in woningen "1-extra Q") maakt weinig uit. Het scenario "0-maxdag" is niet weergegeven in Figuur 5.5. Dit scenario heeft echter geen significante invloed op de surrogaatparameter voor groei van micro-organismen. Figuur 5.6 laat zien dat het dieper leggen van leidingen in deze studie niet leidt tot een verlaging van de surrogaatparameter. Het inzetten van een WKO heeft wel een klein positief effect op de surrogaatparameter (0,2 log reductie gemiddeld).

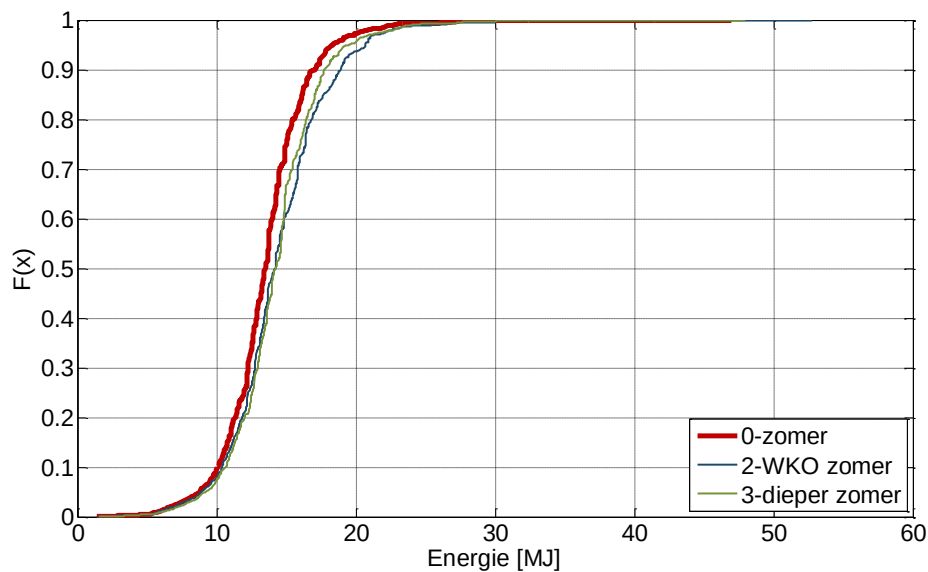
In Figuur 5.7 zijn de scenario's "2-WKO winter" en "3-dieper winter" vergeleken met het 0-scenario "0-winter" voor het derde criterium. Om de WKO in de winter met koude te laden wordt het drinkwater aan het einde van de transportleiding opgewarmd. In Figuur 5.7 is te zien dat dit geen significante gevolgen heeft voor de surrogaatparameter voor groei van fictieve micro-organismen.



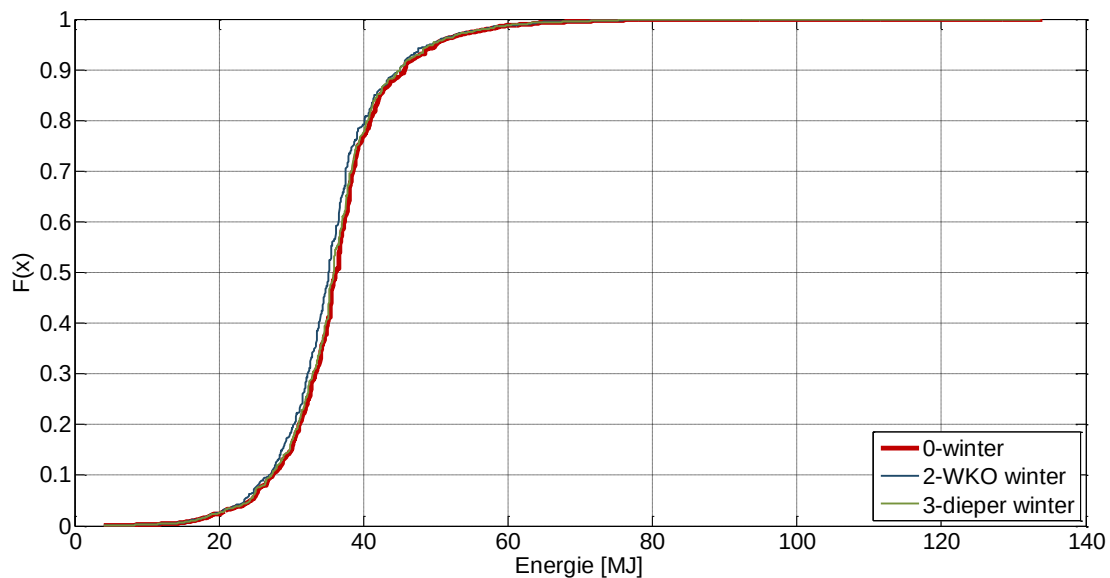
Figuur 5.7. Cumulatieve frequentieverdeling surrogaatparameter.

5.4 Energieverbruik huishoudens voor bereiding warm tapwater

Hieronder zijn de resultaten van het vierde beoordelingscriterium weergegeven voor de verschillende scenario's in zomer (Figuur 5.8) en winter (Figuur 5.9).



Figuur 5.8. Cumulatieve frequentieverdeling energieverbruik per aansluiting.



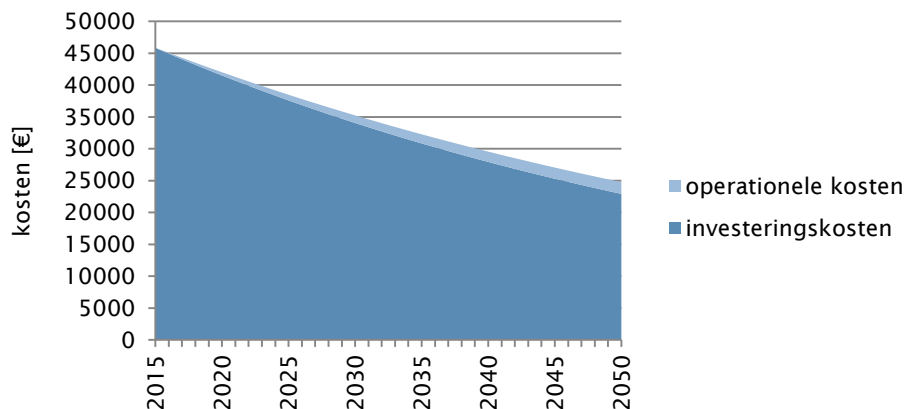
Figuur 5.9. Cumulatieve frequentieverdeling energieverbruik per aansluiting.

Uit Figuur 5.8 en Figuur 5.9 kan afgeleid worden dat de effecten van de scenario's "2-WKO zomer", "2-WKO-winter", "3-dieper zomer" en "3-dieper winter" geen significante gevolgen hebben voor het energieverbruik van de gemiddeld per jaar in de case Volendam.

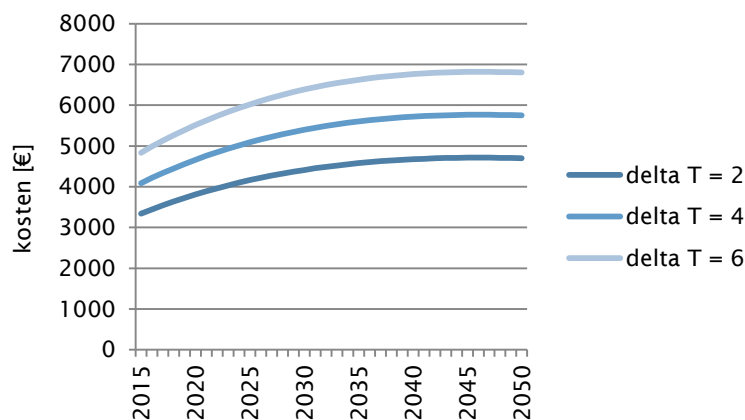
Het verhogen van verbruik heeft geen effect voor het energieverbruik van huishoudens voor de bereiding van warm tapwater en is daarom ook niet weergegeven in de figuur. Er wordt wel meer water verbruikt in de woning (1-extra Q) of in het distributienet (1-spuien) maar dit leidt niet tot een grotere consumptie van warm water aan de tap of tot andere watertemperaturen bij de woningaansluiting (zie Figuur 5.2).

5.5 Kosten na contant maken en correcties

In de vorige twee hoofdstukken zijn de investeringskosten en operationele kosten voor het dieper leggen en WKO gedetailleerd weergegeven en gecorrigeerd voor de case Volendam. Om een correct beeld te krijgen van de daadwerkelijke kosten van de verschillende opties moeten de kosten contant gemaakt worden voor de gehele evaluatieperiode. Dit is gedaan met de methode en de bedragen zoals beschreven in hoofdstuk 4. Omdat het KNMI 2050 W+ scenario als uitgangspunt is genomen is het jaar 2050 tevens het einde van de evaluatieperiode. Bij het contant maken is het jaar 2015 als startjaar van de evaluatieperiode aangenomen. De evaluatieperiode duurt dus 35 jaar. Na het contant maken kunnen de (jaarlijkse) investerings- en operationele kosten opgeteld worden. Afschrijvingen zijn niet meegenomen in de berekeningen omdat zowel bij het dieper leggen als bij de installatie van de WKO geen sprake is van een restwaarde na realisatie en er aan wordt genomen dat er geen vreemd vermogen nodig is om te investeren. Mogelijke geldelijke baten uit de gewonnen warmte of koude worden ook niet meegenomen omdat het zeer onzeker is of er binnen de directe omgeving van de WKO warmte- of koudevragen zijn of in de toekomst zullen komen. In Figuur 5.10 zijn de ontwikkeling van de totale jaarlijkse kosten voor dieper leggen na contant maken uitgezet tegen de evaluatieperiode. In Figuur 5.11 zijn de jaarlijkse operationele kosten voor de inzet van een WKO met $\Delta T = 2, 4$ en 6 graden na contant maken uitgezet tegen de evaluatieperiode. De investeringskosten voor de WKO zijn weggelaten in de grafiek omdat deze eenmalig zijn en daarom niet veranderen in de tijd.



Figuur 5.10. Ontwikkeling kosten dieper leggen gedurende evaluatieperiode (na contant maken).



Figuur 5.11. Ontwikkeling operationele kosten WKO bij verschillende waarden voor ΔT gedurende evaluatieperiode (na contant maken).

Ondanks het contant maken nemen de jaarlijkse operationele kosten voor de WKO (Figuur 5.11) toe. Dit komt doordat de inzet van de WKO tussen 2015 en 2050 toeneemt van 16 naar 45 dagen per jaar (zie paragraaf 2.2.3).

In Tabel 5.2 zijn de contant gemaakte kosten (zoals weergegeven in bovenstaande figuren) opgeteld. Voor de WKO zijn hierbij de eenmalige investeringskosten opgeteld (deze zijn niet weergegeven in Figuur 5.11).

Tabel 5.2. Totale kosten over evaluatieperiode (2015-2050).

Optie	Totale kosten voor evaluatieperiode contant gemaakt voor 2015 [€]	Kosten per aansluiting [€]
Dieper leggen leidingen	1.287.000	1.687
WKO ($\Delta T=2^{\circ}\text{C}$)	555.000	727
WKO ($\Delta T=4^{\circ}\text{C}$)	629.000	824
WKO ($\Delta T=6^{\circ}\text{C}$)	699.000	917

5.6 Samenvatting uitkomsten business case

De uitkomsten van de vorige paragrafen zijn samengevat in Tabel 5.3. De resultaten in de cumulatieve frequentieverdeling voor temperatuuroverschrijding (Figuur 5.3) worden vergeleken op basis van het 10^e, 50^e en 90^e percentiel.

Tabel 5.3. Samenvatting prestaties en kosten WKO en dieper leggen.

Criterium	WKO	Dieper leggen	Verhogen verbruik
1. Effect op overschrijding 25°C grens	4%	2%	0%
2. Reductie op overschrijdingsduur 25°C grens voor 10 ^e , 50 ^e en 90 ^e percentiel t.o.v. 0-scenario.	67% / 21% / 2%	50% / 9% / 0%	0% / 0% / 0%
3. Effect op surrogaatparameter (combinatie temperatuur-verblijftijd)	Kleine reductie	Geen reductie	Kleine reductie
4. Effect op energieverbruik huishoudens	Niet significant	Niet significant	Geen
Kosten			
Totale kosten over evaluatieperiode 2015-2050	€ 629.000	€ 1.234.000	€ 0

6 Discussie

6.1 Onderzochte maatregelen

6.1.1 Vergroten verbruik

Er is op twee manieren onderzocht of het vergroten van het verbruik een effectief middel is om de temperatuur bij de aansluiting te verlagen: (1) door simultaan spuien modelmatig te benaderen en (2) het verbruik op de aansluitingen te verhogen. Hoewel beide methoden in de praktijk misschien lastig te realiseren zijn schetsen deze scenario's wel een beeld van de potentie van het effect van een groter verbruik. Er is in deze scenario's met een verbruik gerekend dat maximaal geleverd kan worden door het distributienet zonder dat er negatieve drukken ontstaan. Het voordeel van deze maatregelen is dat ze niet leiden tot extra investeringen. Er is een klein positief effect zichtbaar op de surrogaatparameter voor groei van fictieve micro-organismen. Het vergroten van verbruik leidt echter op geen enkele manier tot een temperatuurverlaging van het drinkwater bij de aansluiting. Daarmee is het – op verschillende manieren – verhogen van verbruik het minst effectief vergeleken met de andere onderzochte opties.

6.1.2 Dieper leggen

Tussen 2015 en 2050 zal naar verwachting 43% van het leidingnet vervangen zijn. In deze studie is onderzocht of het dieper leggen van deze 43% effect heeft op de temperatuuroverschrijding en de surrogaatparameter voor groei van fictieve micro-organismen bij de aansluiting. In de resultaten is te zien dat het dieper leggen geen effect heeft op de surrogaatparameter voor groei van micro-organismen. Dit komt mede doordat de bodemtemperatuur bij het dieper leggen nog steeds hoger is dan 25°C, namelijk 26°C. Er is niet onderzocht of het dieper leggen van het complete distributienet meer effect heeft. Wanneer in 2050 echter 100% van het distributienet op een grotere diepte moet liggen zal er versneld gesaneerd moeten worden. In combinatie met het dieper leggen zal dit leiden tot zeer grote kostenposten waar tegenover geen duidelijke opbrengst voor de waterkwaliteit staat. Dit wil niet zeggen dat dieper leggen helemaal geen oplossing is. In combinatie met andere maatregelen (zoals het creëren van vegetatie op de bodem, zie paragraaf 6.2.3) is dieper leggen mogelijk wel effectief. Het blijft echter een kostbare maatregel. De operationele kosten voor het dieper leggen zijn gebaseerd op een risicomatrix van PWN en schattingen van het aantal storingen in 2050. Hoewel er verschillende arbitraire aannames achter deze schatting zitten bestaan de totale kosten voor het dieper leggen slechts voor 3% uit operationele kosten. De andere 97% zijn voornamelijk meerkosten voor aannemerswerk dat nodig is voor het dieper leggen van distributieleidingen.

6.1.3 WKO

De inzet van een WKO aan het begin van het distributienet heeft geen groot effect op de temperatuuroverschrijding bij de aansluiting. De bodemtemperatuur is dermate van invloed op de watertemperatuur dat een deel van het effect van de WKO op de temperatuur niet meer zichtbaar is bij de aansluiting. Deze maatregel heeft daarentegen wel een significant (maar beperkt) effect op de surrogaatparameter voor de groei van fictieve micro-organismen. Zoals aangegeven wordt de WKO tijdens de evaluatieperiode beperkt ingezet (16-45 dagen). Er kan ook gekozen worden om de WKO pas op een later tijdstip te realiseren. Het voordeel hiervan is dat er voorlopig geen (her)investeringen nodig zijn en er gewacht kan worden op de uitkomsten van meer gedetailleerd onderzoek naar deze maatregel. Dit in tegenstelling

tot het dieper leggen, waar idealiter zo snel mogelijk mee begonnen moet worden wil er in 2050 voldoende resultaat geboekt zijn.

6.2 Overige oplossingen en overwegingen

6.2.1 Netwerkconfiguratie

In dit project is het leidingnet van Volendam als testcase aangenomen. Een groot deel van dit leidingnet is op traditionele manier aangelegd als vermaasd net. Tussen 2015 en 2050 zal naar verwachting 43% van het leidingnet vervangen zijn. PWN en andere waterbedrijven zijn begonnen met het ontwerpen van een streefstructuur voor het secundaire net. Bij vervanging zal het tertiaire net als een zelfreinigend net worden aangelegd. Dit betekent een net met kleinere diameters en kortere leidinglengtes. Voor de temperatuur aan de tap maakt de diameter geen verschil; hoewel de verblijftijd korter is, is de opwarmingstijd bij kleine diameters evenredig korter en daarmee is de temperatuur dus gelijk. De eindtemperatuur aan de tap zal dan nog steeds de bodemtemperatuur bereiken. Doordat er ook sprake is van kortere leidinglengtes (de maas wordt niet gesloten) zal de verblijftijd nog verder afnemen, maar naar verwachting is de verblijftijd nog steeds zodanig lang is dat het drinkwater nog altijd de bodemtemperatuur bereikt. Het verkorten van de verblijftijd (door kleine diameters en kortere lengtes) betekent ook een kortere tijd voor eventuele nagroei. Op de surrogaatparameter in dit onderzoek heeft het verkorten van de verblijftijd een significant positief effect. In het kader van de waterkwaliteit, gerelateerd aan temperatuur, blijft de aanbeveling aan alle waterbedrijven om zelfreinigende netten te blijven aanleggen.

6.2.2 Isolatie

De boodschap uit dit onderzoek is dat de bodemtemperatuur rond de distributieleidingen de drinkwatertemperatuur bepaalt. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat de tijd die het kost om het drinkwater op te warmen (in de zomer) korter is dan de verblijftijd. In dit project is expliciet gekeken naar het verkorten van de verblijftijd door extra verbruik te genereren (binnen redelijke mogelijkheden). In de vorige paragraaf is iets gezegd over het verkorten van de verblijftijd door een andere netwerkconfiguratie. Een andere optie is het vergroten van de opwarmtijd door het isoleren van de drinkwaterleidingen. In een speerpunt BTO-onderzoek voor Brabant Water is deze optie uitgebreid bekeken voor het vertragen van de opwarming wanneer leidingen minder diep worden gelegd. Uit dit onderzoek bleek dat er wel wat vertraging kan worden gerealiseerd, maar niet voldoende. Een isolatiemateriaal met hoge isolatiewaarde is PUR; er blijkt een grote PUR-laag nodig te zijn (tot zelfs enkele male de inwendige diameter van de leiding) om een substantieel verschil te geven (Blokker *et al.*, 2014).

6.2.3 Vegetatie

De temperatuur rond de leidingen kan op verschillende manieren verlaagd worden. Een oplossing die bekeken is in dit project, is het dieper leggen van de leidingen. Dit is een maatregel die het waterbedrijf zelfstandig zou kunnen doorvoeren. De maatregel heeft effect, maar als de 25 graden niet mag worden overschreden is een behoorlijke diepte nodig (> 1,5 m). Een andere maatregel is het verhogen van de evapotranspiratie waardoor energie wordt gebruikt voor verdamping in plaats van voor opwarmen van de bodem. Door gras aan te brengen in plaats van asfalt, klinkers of tegels wordt de bodemtemperatuur op 1 meter diepte in de zomer behoorlijk lager. Struiken en bomen hebben ten opzichte van gras nog een extra positief effect door de schaduwwerking. In het DPW-onderzoek van 2012 (Blokker and Pieterse-Quirijns, 2012) is laten zien dat op 1 meter diepte in 2050 dan geen overschrijdingen van de 25 graden grens meer plaatsvinden. Boomwortels kunnen echter de integriteit van leidingen aantasten, daarom verdient gras de voorkeur.

Het aanbrengen van vegetatie ter plaatse van maaiveld boven de leiding is niet iets dat het waterbedrijf zelfstandig kan besluiten. Daarbij is samenwerking met de gemeente vereist. Over het algemeen zal de leefbaarheid van een stad worden verhoogd met meer groenvoorzieningen. Wanneer ook het drinkwater een positief effect ondervindt van meer groen, kan dit een extra reden zijn om dit aspect nader uit te werken. Onduidelijk is nu hoe dichtbij de leiding vegetatie aanwezig moet zijn om de bodemtemperatuur rond de leiding voldoende te verlagen.

6.2.4 Chloren

Een vierde optie is het beperken van de groei van micro-organismen. We hebben nu alleen een surrogaatparameter gemodelleerd waarbij de groei alleen afhankelijk was van de temperatuur en de verblijftijd. Vervolgonderzoek moet laten zien welke parameters het belangrijkste zijn in de nagroei en dus welke maatregelen getroffen kunnen worden in dit te beperken, bijvoorbeeld door het beperken van substraat (zuivering aanpassen, zelfreinigende netten zonder accumulatie van sediment) of door de afsterving te verhogen (chloren werkt tegen sommige organismen), etc.

6.2.5 Grondwater of oppervlaktewater

De temperatuur af pompstation is van veel minder groot belang voor de temperatuur aan de tap dan de bodemtemperatuur. Voor de surrogaatparameter geldt dat niet alleen de temperatuur aan de tap, maar ook de temperatuur onderweg belangrijk is. Wanneer het drinkwater met een lagere temperatuur het pompstation verlaat heeft dit dus ook een positief effect op de ontwikkeling van de surrogaatparameter. Grondwaterbedrijven met 's zomers een lagere ingaande temperatuur hebben dus ook geen lagere temperatuur aan de tap dan oppervlaktewaterbedrijven, maar mogelijk wel een minder negatief effect van de hogere temperaturen op de microbiologische activiteit.

6.2.6 Koelen drinkwater bij Andijk

In het onderzoek is alleen aandacht besteed aan het koelen van het drinkwater bij het einde van de transportleiding. Een andere optie is om het drinkwater bij Andijk te koelen. Mogelijk voordeel hiervan is dat de ontwikkeling van micro-organismen kortstondig geremd wordt in een groter gebied in een vroeger stadium (af pompstation in plaats van aan het einde van de transportleiding). Hiervoor is wel een grotere WKO installatie nodig. IF Technology heeft hiervoor een kostenraming gemaakt.

De drinkwaterdebiet bij Andijk bedraagt 3.000 m³/h. Om het drinkwater 4°C af te koelen is een grondwaterdebiet benodigd van 1.500 m³/h. Hiervoor zijn zes doubletten van 250 m³/h per doublet benodigd. Volgens de extrapolatiemethode bedragen de kosten hiervan dan € 2 mln.

Voor een vergelijkbare casus bij Waternet (WKO op WRK leiding bij Schiphol) bedraagt de totale investering circa 6,7 mln. (WRK station) + 17,5 mln. (bronnen, leidingen, verdeelstation, onderstation, etc.) = €24,2 mln. voor een grondwaterdebiet van 5.000 m³. Gebaseerd op deze casus bedragen de kosten voor een grondwaterdebiet van 1.500 m³/h voor casus koelen bij Andijk circa € 7,2 mln. Dit is echter een overschatting omdat in de casus van Waternet meer kosten meegenomen zijn dan alleen die van de WKO installatie zoals leidingwerk naar onderverdeelstation voor koudelevering aan gebouwen. Op basis van deze informatie schat IF Technology de kosten voor een WKO installatie bij Andijk met een grondwaterdebiet van 1.500 m³/h op € 3 à 4 mln.

7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Samenvatting

In dit onderzoek zijn verschillende mitigerende maatregelen onderzocht om de effecten van een stijgende bodemtemperatuur op de drinkwaterkwaliteit door klimaatverandering te beperken. Deze maatregelen zijn:

- het vergroten van het verbruik in het distributienet;
- het dieper leggen van leidingen;
- het actief koelen middels WKO (warmte-koude opslag) met een warmtewisselaar aan het begin van het distributienet.

Hiervoor is gebruik gemaakt van het 2050 W+ scenario van het KNMI. De oplossingen werden onderzocht op vier criteria: een overschrijding van de 25°C grens bij de aansluiting ergens op de dag tijdens verbruik, de duur van de overschrijding tijdens verbruik, de combinatie temperatuur-verblijftijd (middels een surrogaatparameter voor groei van fictieve micro-organismen) en mogelijke gevolgen voor het energieverbruik van huishoudens voor de bereiding van warm tapwater. Om tot een business case te komen zijn ook de operationele kosten en investeringskosten van de verschillende maatregelen bepaald voor een evaluatieperiode van 35 jaar (2015-2050). Andere baten dan een verbetering van de drinkwaterkwaliteit zijn niet meegenomen in de business case.

7.2 Conclusies per maatregel

De maatregel om verbruik te vergroten scoort positief in de business case omdat het geen investeringskosten vergt. Het blijkt echter dat het vergroten van verbruik geen effect heeft op het verlagen van de drinkwatertemperatuur bij de aansluiting tijdens verbruik. Deze maatregel heeft een klein positief effect op de surrogaatparameter voor groei van fictieve micro-organismen.

Bij het dieper leggen is na 35 jaar slechts 43% van de leidinglengte vervangen en dieper teruggelegd. Er blijkt dat dit zeer beperkt effect op het verminderen van de temperatuuroverschrijding en de surrogaatparameter voor groei van fictieve micro-organismen. De totale kosten tijdens de evaluatieperiode bedragen € 1.234.000. Deze maatregel is zeer kostbaar, zowel in investering als operationele kosten.

Het koelen van het drinkwater met een WKO met een warmtewisselaar heeft effect op de temperatuuroverschrijding maar dit is nauwelijks significant. Het effect op de surrogaatparameter voor groei van fictieve micro-organismen is wel significant, maar klein. Daarnaast blijkt dat mogelijke negatieve gevolgen voor het energieverbruik van huishoudens voor de bereiding van warm tapwater in de zomer niet significant zijn. Ook een mogelijke toename in groei van fictieve micro-organismen in de winter is niet significant. De totale kosten tijdens de evaluatieperiode bedragen € 629.000. Een investering in WKO kan eventueel op een later tijdstip in de evaluatieperiode plaats vinden wanneer dit echt noodzakelijk is voor de temperatuur van het drinkwater. De totale kosten zijn dan lager.

7.3 Praktische aanbevelingen: maatregelen in de praktijk

Operationele maatregelen waarbij het verbruik vergroot wordt (zoals spuien) zijn niet effectief in het voorkomen van temperaturen hoger dan 25°C bij de aansluiting wanneer de

bodemtemperatuur in het distributienet hoger wordt dan 25°C. Voor de waterkwaliteit is niet de temperatuur zelf het probleem, maar meer de gevolgen van een hogere temperatuur voor bijv. microbiologische groei. Hierbij kan de vraag gesteld worden of de grens van 25°C in de toekomst heroverwogen moet worden omdat de drinkwaterbedrijven niet in staat zijn om met operationele maatregelen te voorkomen dat de temperatuur bij de aansluiting hoger wordt dan 25°C.

Het dieper leggen van leidingen heeft weinig zin; drinkwaterbedrijven hoeven niet nu al te starten met het dieper leggen van leidingen. Ook omdat de investering zeer hoog is wordt aanbevolen om deze oplossing niet na te streven.

De inzet van een WKO met warmtewisselaar heeft geen negatieve effecten en kan daarnaast bijdragen aan warmte- en koudeleveringen aan gebruikers in de omgeving. Een voorbeeld hiervan is het koelen van een datacenter met koude uit de WKO. Deze maatregel kan op dit moment, maar ook op een later moment geïmplementeerd worden. Het vergt nader onderzoek om de locatie te bepalen waarbij de baten van de WKO maximaal zijn. Het verdient aanbeveling om te onderzoeken wat de baten zijn van een WKO installatie bij pompstation Hoorn of Andijk.

7.4 Aanbevelingen voor verder onderzoek

De onderzochte maatregelen hebben nauwelijks invloed op de overschrijding(stijd) van de 25°C grens. Wel is er een beperkt positief effect op de surrogaatparameter voor de groei van fictieve micro-organismen. Er wordt aanbevolen om verder onderzoek te doen naar het modelleren van groei van micro-organismen in het distributienet onder invloed van o.a. temperatuur en verblijftijd zodat het effect van koelen op de groei van micro-organismen beter gekwantificeerd kan worden.

In dit onderzoek is gekozen om de WKO aan het einde van de transportleiding te plaatsen. Vervolgonderzoek is nodig om te kunnen beoordelen welke op welke locatie de baten (wat betreft energie) van een WKO maximaal zijn met de minst negatieve effecten op temperatuur en nagroei in de winter tijdens het laden van koude in de WKO.

8 Literatuur

Blokker, E.; van Osch, A.; Hogeveen, R.; Mudde, C. (2013) Thermal energy from drinking water and cost benefit analysis for an entire city. *Journal of Water and Climate Change*, 4, 11-16.

Blokker, E. J. M. (2010) Stochastic water demand modelling for a better understanding of hydraulics in water distribution networks. Delft University of Technology, p. 212.

Blokker, E. J. M. (2011) *Temperatuur drinkwater Almere*. Report No. KWR 2011.026; KWR: Nieuwegein.

Blokker, E. J. M.; Mesman, G. A. M.; Slaats, P. G. G. (2014) *Distributienet van de toekomst-materiaaleigenschappen*. Report No. N.A.: KWR: Nieuwegein.

Blokker, E. J. M.; Pieterse-Quirijns, E. J. (2012) *Scenariostudies voor beperken invloed klimaatveranderingen op temperatuur en kwaliteit drinkwater in het net*. Report No.; KWR: Nieuwegein.

Blokker, E. J. M.; Pieterse-Quirijns, E. J. (2013) Modeling temperature in the drinking water distribution system. *JAWWA*, 105, 35-36.

Blokker, E. J. M.; Vreeburg, J. H. G.; Beverloo, H.; Klein Arfman, M.; van Dijk, J. C. (2010) A bottom-up approach of stochastic demand allocation in water quality modelling. *Drink. Water Eng. Sci.*, 3, 43-51.

Blokker, M.; Pieterse-Quirijns, I. (2010) Model voor de berekening van de watertemperatuur in het leidingnet, H₂O, pp. 46-49.

Burgos, P.; van den Beld, T. (2009) *Effecten van klimaatverandering op watertemperatuur en de consequenties daarvan voor visecologie en drinkwaterproductie*. Report No. 1002020-001; Deltares: Delft.

Eternit. (~1980) *Gegevens AC leidingen*. Report No. N.A.

Moerman, A. (2013) *Drinking water temperature modeling in domestic systems*. Report No.; KWR/TU-Delft: Nieuwegein.

Molen, M. v. d.; Kooij, H.; Smulders, E. F. P. A.; Heijman, S. G. J. (2008) *Warmteindringing in de bodem*. KWR: Nieuwegein.

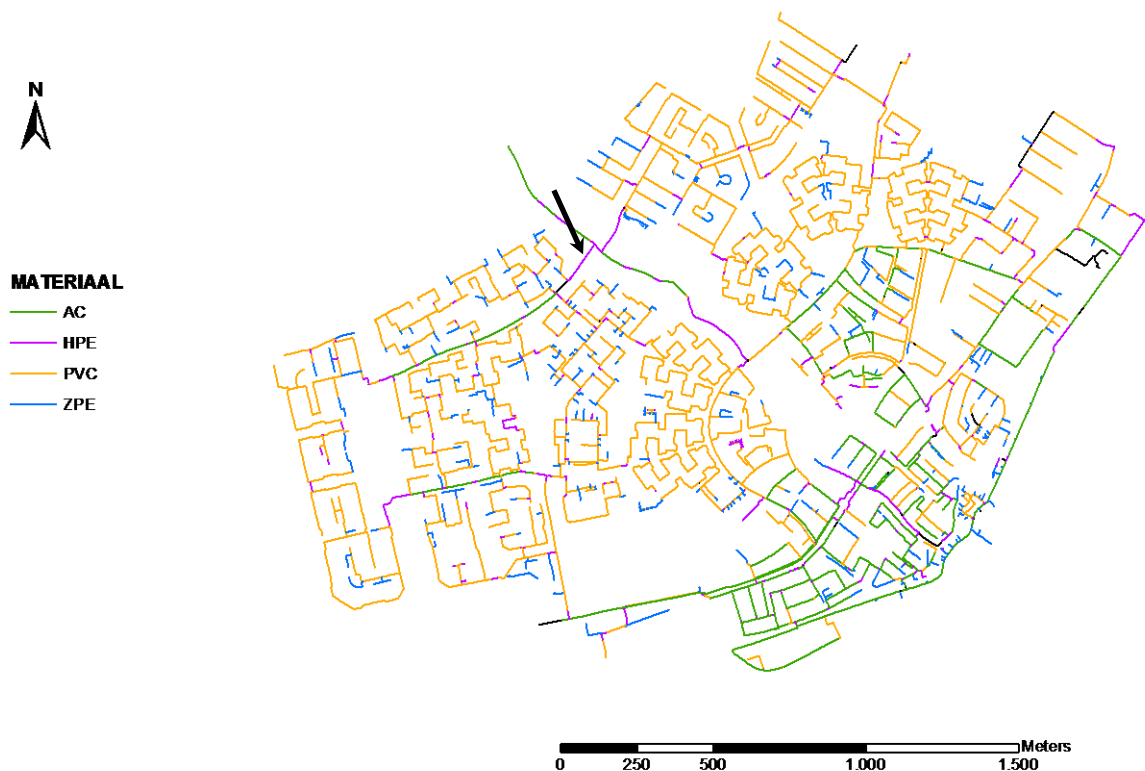
Olsthoorn, T. N. (2012) *Temperature change at Leiduin when heat is added near Schiphol*. Report No. N.A.; Waternet: Amsterdam.

Pieterse-Quirijns, E. J.; de Groot, R.; de Rijck, Y.; Ruijg, K. (2011) *Diepteligging van leidingen*. Report No.; KWR: Nieuwegein.

van den Akker, H. E. A.; Mudde, R. F. (2005) *Fysische transportverschijnselen I*. VSSD: Delft.

Bijlage I Leidingmaterialen in distributienet Volendam

In het hydraulisch model wordt geen onderscheid gemaakt tussen PVC en PE leidingen. Beide hebben een ruwheid gelijk aan 0,05 mm. Omdat de warmtegeleidbaarheid van PVC en (zacht/hard) PE niet gelijk is – respectievelijk 0,16 en 0,35-0,45 W/(m.K) – vertroebelt dit mogelijk de uitkomsten van de analyses. In hoeverre er PE in het leidingnet van Volendam te vinden is kan wel bepaald worden uit het LIS (LeidingInformatieSysteem). In Figuur I.1 zijn de materiaalsoorten van de leidingen geografisch weergegeven. De totale lengte van het leidingnet weergegeven in Figuur I.1 is ongeveer 80 km.



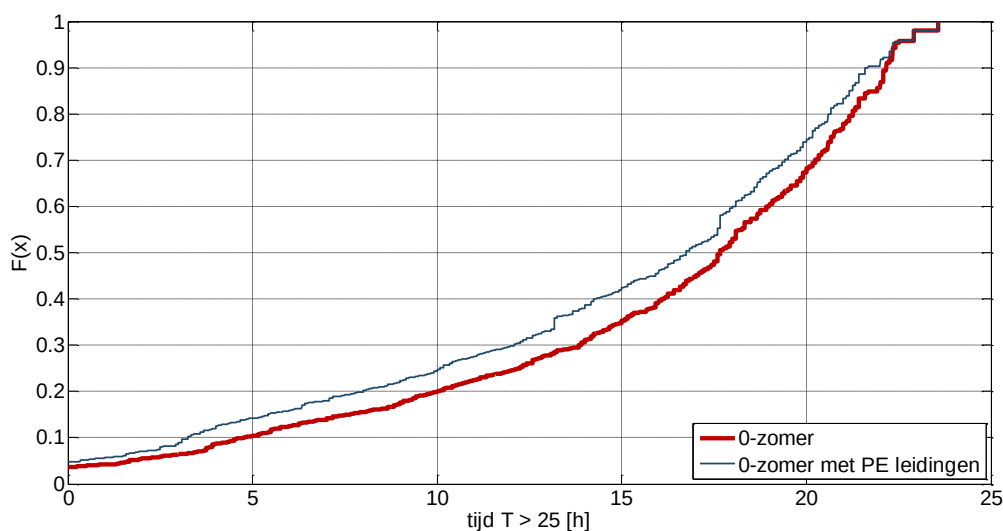
Figuur I.8.1. Leidingmaterialen in distributienet Volendam. Alleen AC, PVC, HPE (vermoedelijk PE80) en ZPE (vermoedelijk PE40) zijn weergegeven. Alle overige materialen zijn weergegeven als zwarte lijnstukken.

De diameters van het ZPE variëren van 25 tot 63 mm, HPE diameters variëren van 63 tot 315 mm. Hieruit is af te leiden dat het ZPE PE40 betreft en het HPE PE80. De leiding die in Figuur I.1 aangegeven is met de zwarte pijl is mogelijk gerelined. Dit is af te leiden uit het feit dat deze leiding afwisselend uit HPE en AC delen bestaat. Deze leiding heeft geen invloed op de resultaten omdat hij buiten het analysegebied valt.

Tabel I.8.1. Leidingmateriaal lengtes absoluut en relatief in distributienet Volendam

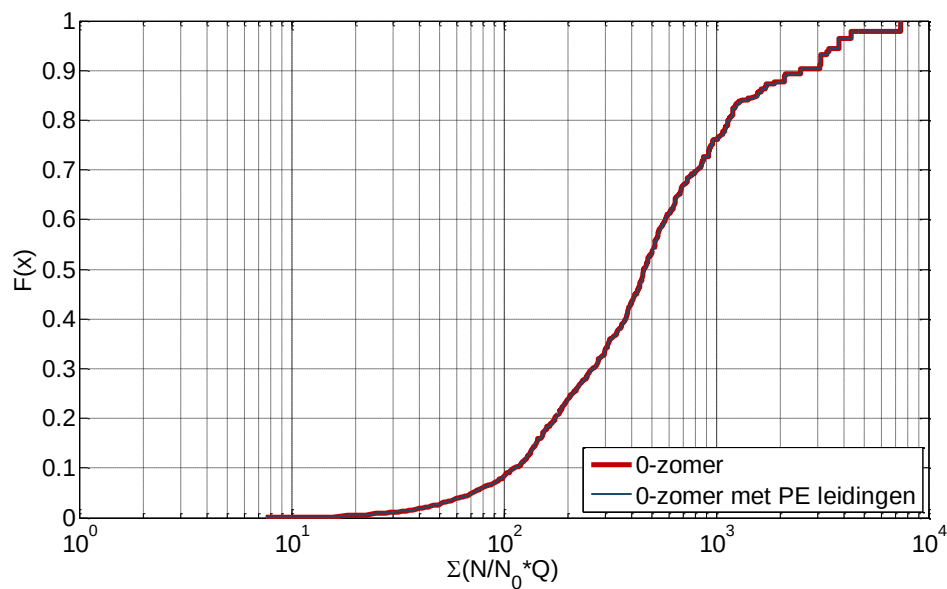
Materiaal	Aantal km	Ratio van totaal [%]
AC	14,7	17
PVC	55,0	63
HPE	7,4	8
ZPE	10,0	11
Overig	0,5	<1

Om het effect van PE leidingen op het temperatuurverloop in het distributienet te modelleren is uit een dataset met alle leidingen korter dan 25 meter⁷ 20% van de leidingnummers getrokken conform de methode uit paragraaf 2.2.4. De willekeurig getrokken leidingnummers zijn in het watertemperatuurmodel aangemerkt als PE40. De totale lengte van de getrokken leidingnummers komt overeen met de lengte van het aandeel ZPE (PE40) leidingen met een lengte korter dan 25 m (~2,5 km). Als warmtegeleidingscoëfficiënt voor PE40 is 0,4 W/(m.K) gesteld. Het percentage wanddikte/binnendiameter van PE40 is gelijk aan 15%. Het wand-diameter ratio (WDR) komt daarmee op 6.7.



Figuur I.2. Cumulatieve frequentieverdeling tijd van overschrijding temperatuurnorm tijdens verbruik voor iedere aansluiting.

⁷ Deze lengte komt overeen met de gemiddelde lengte van ZPE leidingen uit het GIS bestand van Volendam.



Figuur 1.3. Cumulatieve frequentieverdeling surrogaatparameter fictieve m.o. maal verbruik tijdens verbruik voor iedere aansluiting.

In Figuur 1.2 is te zien dat het invoegen van PE40 leidingen een zichtbare maar beperkte invloed heeft op de temperatuur. In Figuur 1.3 is duidelijk te zien dat het invoegen van PE40 leidingen geen effect heeft op de resultaten van de surrogaatparameter. Dit ligt voor de hand omdat alleen leidingen korter dan 25 m bij de willekeurige selectie mogelijk aangemerkt zijn als PE40 leiding. De leidingen korter dan 25 m zijn in het hydraulisch model bijna alleen aansluitleidingen die zich helemaal benedenstrooms in het systeem bevinden. Omdat de verblijftijden hier lang kunnen zijn is wel effect zichtbaar voor de *duur* van de overschrijding (criterium 2) maar nauwelijks voor het voorkomen van temperaturen boven de 25°C (~1% verschil met scenario 0-zomer voor criterium 1). Op de resultaten van het derde criterium (ontwikkeling van fictieve micro-organismen) heeft de implementatie van PE40 leidingen geen effect. Ook dit is goed te verklaren omdat er in het secundaire en tertiaire net reeds ontwikkeling van fictieve micro-organismen heeft plaatsgevonden. Daarnaast heeft het drinkwater – door de verblijftijd in het leidingnet – de bodemtemperatuur aangenomen. Daardoor hebben de PE leidingen geen aandeel in het vertragen van de opwarming van het drinkwater. Hierdoor blijft de groei van fictieve micro-organismen met dezelfde snelheid doorgaan, ook wanneer het water zich in de PE aansluitleidingen bevindt.

Op basis van deze resultaten zijn de effecten van PE40 leidingen niet meegenomen in de analyses. Het mogelijke effect van de PE80 leidingen (HPE in Figuur 1.1) kan ook verwaarloosd worden omdat deze leidingen grotendeels buiten het analysegebied vallen. De leidinglengte van het aantal PE80 leidingen die wel in het analyse gebied vallen is zeer beperkt.

Bijlage II Beschrijving uitbreiding KWR model

De totale warmteoverdrachtscoëfficiënt of warmtedoorgangscoefficiënt U kan worden berekend door de afzonderlijke warmteoverdrachtscoëfficiënten (van respectievelijk straling, geleiding door de bodem, geleiding door de leidingwand en convectie van het stromende drinkwater) als weerstanden in serie te zien⁸:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_s} + \frac{d_{bodem}}{\lambda_{bodem}} + \frac{d_{leidingwand}}{\lambda_{leidingwand}} + \frac{d_{leiding}}{\lambda_{water} \cdot Nu} \quad \text{Vergelijking 10}$$

Er volgt dat U met name bepaald wordt door de bodem. Voor een typisch distributienet met PVC ($\lambda_{leidingwand} = 0,16 \text{ W/m.K}$) Ø63 mm ($d_{leiding} = 60 \text{ mm}$, $d_{leidingwand} = 3 \text{ mm}$), $v = 0,1 \text{ m/s}$ ($Nu \approx 50$), in zand geldt (λ_{bodem} in de orde van grootte van $0,3 \text{ W/m.K}$, (Molen *et al.*, 2008)), en met $h_s \approx 5 \cdot 10^4 \text{ W/m}^2\text{K}$. Substitutie van deze waarden in Vergelijking 10 geeft:

$$\frac{1}{5 \cdot 10^4} + \frac{1}{0,3} + \frac{3 \cdot 10^{-3}}{0,16} + \frac{0,06}{0,6 \cdot 50} = \frac{1}{0,298} \approx \frac{1}{0,3} = \frac{d_{bodem}}{\lambda_{bodem}} \quad \text{Vergelijking 11}$$

Onder deze conditie is de aanname dat het bodemtemperatuurmodel en drinkwatertemperatuurmodel onafhankelijk van elkaar gedraaid kunnen worden zeker valide. Voor transportleidingen met een grotere diameter (bijvoorbeeld AC Ø500, $v = 0,5 \text{ m/s}$), die in een andere bodemsoort (verzadigde klei) liggen is de invloed van de bodem minder groot ten opzichte van de invloed van de leiding:

$$\frac{1}{5 \cdot 10^4} + \frac{1}{2,3} + \frac{35 \cdot 10^{-3}}{0,43} + \frac{0,5}{0,6 \cdot 1000} = \frac{1}{1,934} > \frac{1}{2,3} = \frac{d_{bodem}}{\lambda_{bodem}} \quad \text{Vergelijking 12}$$

Er is ongeveer 20% extra warmteoverdracht door de leiding ten opzichte van de bodem. In dit geval is het aan te bevelen om wel de invloed van de drinkwatertemperatuur op de bodem mee te nemen.

Voor de WRK-leiding van Waternet is een tweedimensionaal model ontwikkeld (Olsthoorn, 2012) waarmee de temperatuur van de bodem onder invloed van de temperatuur aan het oppervlak en de temperatuur van het drinkwater kan worden berekend. Dit is goed uitgewerkt voor statische condities (vaste randvoorwaarden voor temperatuur maaiveld, temperatuur drinkwater en vaste stroomsnelheid). Uit deze studie blijkt dat er pas na enkele weken een evenwicht ontstaat in de temperatuur rond de leiding. Uit de KWR studie (Molen *et al.*, 2008) blijkt dat de bodemtemperatuur veel dynamiek vertoont binnen een paar weken. In dynamische condities (met name van de temperatuur van het maaiveld) is het model van Olsthoorn ingewikkelder, en is nog niet getest. Het is daardoor nu niet mogelijk om de

⁸ N.B. in deze vergelijking is de invloed van convectie van de lucht (de wind) buiten beschouwing gelaten.

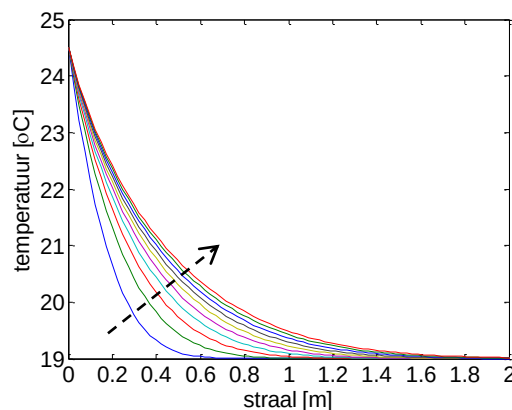
resultaten van het KWR bodemtemperatuurmodel + drinkwatertemperatuurmodel (onder aanname van geen interactie tussen beide modellen) met het model voor de WRK leiding te vergelijken.

Het is wel mogelijk om het KWR drinkwatertemperatuurmodel uit te breiden met een extra warmteweerstand rondom de leiding. Deze warmteweerstand bestaat uit een schil van bodemmateriaal rond de leiding. De randvoorwaarde van vaste temperatuur rond de leiding verplaatst zich dan van de leidingwand naar de buitenkant van de schil rond de leiding. De dikte van de schil die nodig is in het model kan worden bepaald met behulp van een niet-stationaire oplossing in het platte vlak van een doorsnede van de buis waarmee bepaald kan worden tot welke diepte het water de bodem beïnvloedt. Deze oplossing wordt gevonden door Vergelijking 13 op te lossen met randvoorwaarden $T_{r=0} = T_0$ en $T_{r=R} = T_\infty$.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad \text{Vergelijking 13}$$

α = warmtediffusiviteit [m^2/s]
 r = straal vanaf rand leiding [m]

In deze studie is de differentiaalvergelijking uit Vergelijking 13 numeriek opgelost met een tijdstap Δt van 300 s. $T_{r=0}$ is gelijk aan de temperatuur van het water uitgaande pompstation Andijk ($24,5^\circ\text{C}$). $T_{r=R}$ is gelijk aan de bodemtemperatuur: 19°C op $R = 25$ m. Daarmee wordt verondersteld dat er op een horizontale afstand van 25 m van de leiding geen invloed meer is van de watertemperatuur op de grondtemperatuur. In Figuur II.1 zijn oplossingen van Vergelijking 13 voor verschillende tijdstappen weergegeven.



Figuur II.1. Oplossingen van Vergelijking 13 in de tijd na 1 dag (meest linkse curve) en 10 dagen (meest rechtse curve). De oplossing verplaatst zich in de tijd in de richting van de pijl.

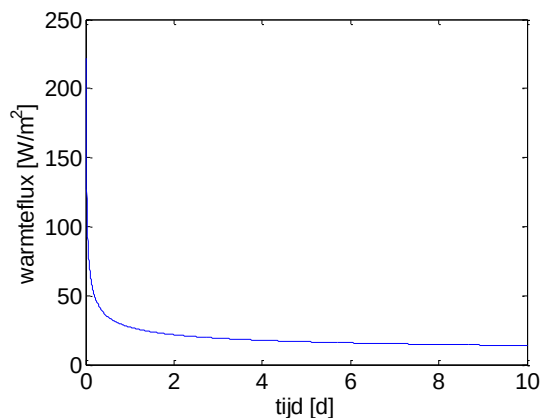
Vervolgens is de warmteflux Φ voor elke tijdstap bepaald op $r=0$ met Vergelijking 14:

$$\Phi = -\lambda_g \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=0} \quad \text{Vergelijking 14}$$

Φ = warmteflux als functie van tijd [W/m^2]
 λ_g = warmtegeleidingscoëfficiënt van bodemmateriaal [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]

In Figuur II.2 is de warmteflux in de tijd weergegeven voor een doorsnede van een $\varnothing 800$ leiding in verzadigde klei met een warmtegeleidingcoëfficiënt van $1,0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ en een

volumetrische warmtecapaciteit (soortelijke warmte maal dichtheid) van 3000 MJ/(m³.K) (Molen *et al.*, 2008).



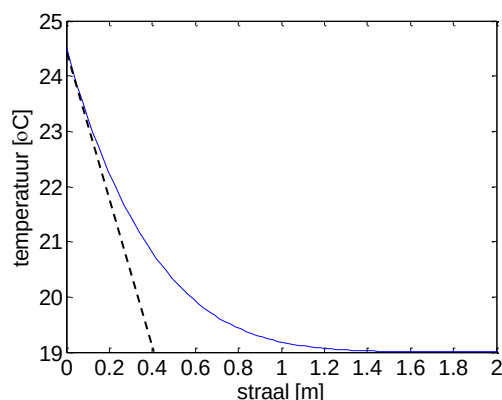
Figuur II.2. Warmteflux in doorsnede Ø800 in verzadigde klei.

De warmteflux vertoont een exponentieel verband met de tijd. Gesteld kan worden dat na 5 dagen de warmteflux nauwelijks meer varieert met de tijd. Daarnaast spelen andere invloeden in de bodem, zoals de grondwaterstand een rol. Gesteld kan worden dat deze invloeden hoogstens voor enkele dagen constant zijn omdat deze bodemprocessen een tijdschaal van enkele dagen hebben. Er wordt gesteld dat de warmteindringing in de bodem hoogstens gedurende 5 dagen toeneemt en dat na 5 dagen een stationaire situatie ontstaat. In de stationaire situatie is de warmteflux evenredig met het quotiënt van temperatuurverschil (ΔT) en indringdiepte (Δr). De temperatuur verloopt dan lineair over de indringdiepte Δr (hierna te noemen d_g):

$$\Phi = -\lambda_g \frac{\Delta T}{\Delta r} = -\lambda_g \frac{\Delta T}{d_g}$$

Vergelijking 15

Met Vergelijking 14 kan de bijbehorende indringdiepte afgelezen worden op de horizontale as (zie Figuur II.3).



Figuur II.3. Oplossing temperatuur in bodem na 5 dagen met raaklijn in $r=0$.

Voor de hierboven genoemde parameters (Ø800 leiding in verzadigde klei) is er sprake van een indringdiepte d_g gelijk aan 0,4 m. De indringdiepte d_g is een functie van de

warmte diffusiviteit van de bodem, de straal van de leiding en de tijd. De indringdiepte is dus niet afhankelijk van het verschil in temperatuur ($\Delta T_{r=0}$). De warmteflux is dat wel.

In Tabel II.1 zijn de benodigde indringdiepten weergegeven voor verschillende leidingdiameters na 5 dagen van warmteindringing.

Tabel II.1. Indringdiepten voor verschillende diameters na 5 dagen.

Diameter [mm]	Indringdiepte d_g [m]	Indringdiepte als ratio van leidingdiameter [-]
500	0,33	0,66
600	0,36	0,60
700	0,39	0,56
800	0,40	0,50
900	0,42	0,47

Wanneer een laag met dikte gelijk aan d_g wordt verdisconteerd in het KWR model wordt er voldoende rekening gehouden met de invloed van de transportleiding op de bodem rond de leiding. Voor de transportleiding van Andijk naar Volendam is dit uitgewerkt en dit heeft geleid tot de aannames in paragraaf 3.2.

Omdat de randvoorwaarde van de bodemtemperatuur verder van de leidingwand af ligt moet het temperatuurverschil over de leidingwand en de extra schil meegenomen worden. Er is daarom nieuwe definitie van de totale warmteoverdrachtscoëfficiënt (uit Vergelijking 1) nodig:

$$h = (h_{\text{water}}^{-1} + h_{\text{wand}}^{-1} + h_{\text{grond}}^{-1})^{-1} \quad \text{Vergelijking 16}$$

Hierbij zijn h_{water} , h_{wand} en h_{grond} gelijk aan:

$$h_{\text{water}} = \frac{\lambda_w Nu}{D} \quad \text{Vergelijking 17}$$

D = diameter leiding tot leidingwand [m]
 λ_w = warmtegeleidingscoëfficiënt van water [W/(m.K)]

Voor de berekening van het Nusselt getal, zie paragraaf 3.1.1.

$$h_{\text{wand}} = \frac{2\lambda_p}{D_p \ln(D_p / D)} \quad \text{Vergelijking 18}$$

D_p = diameter leiding met leidingwand [m]
 λ_p = warmtegeleidingscoëfficiënt van het leidingmateriaal [W/(m.K)]

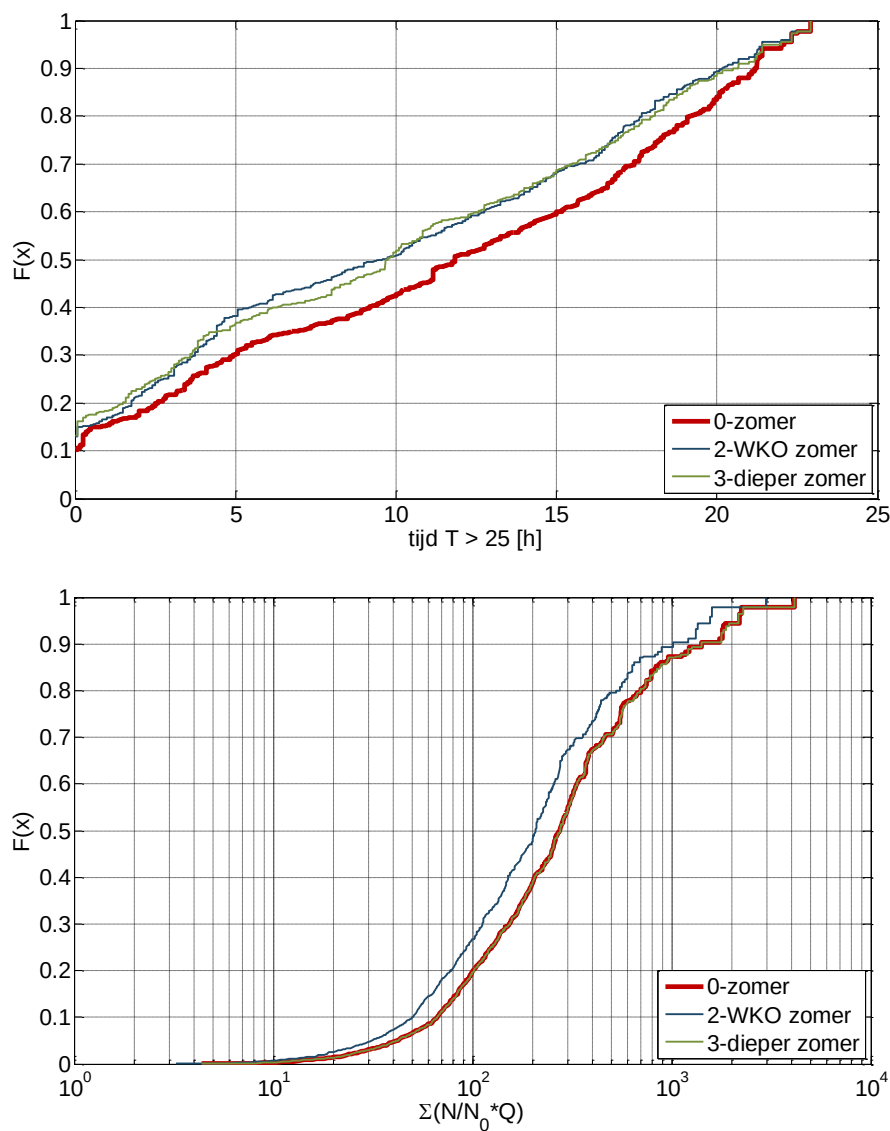
$$h_{\text{grond}} = \frac{2\lambda_g}{D_g \ln(D_g / D_p)} \quad \text{Vergelijking 19}$$

D_g = diameter buis met indringdiepte [m]
 λ_g = warmtegeleidingscoëfficiënt van bodemmateriaal [W/(m.K)]

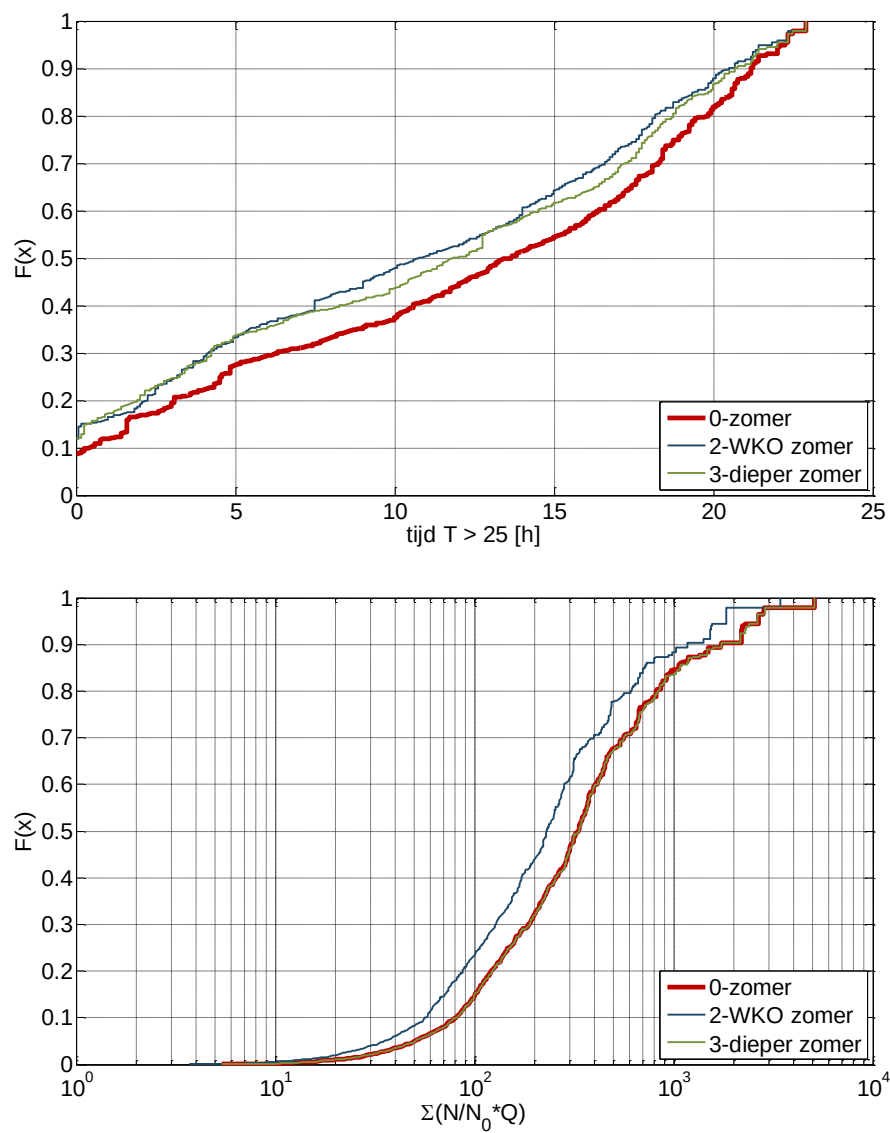
Voor Vergelijking 18 en Vergelijking 19 zie (van den Akker and Mudde, 2005).

Bijlage III Gevoeligheid WKO en dieper leggen voor temperatuur water uit transportnet

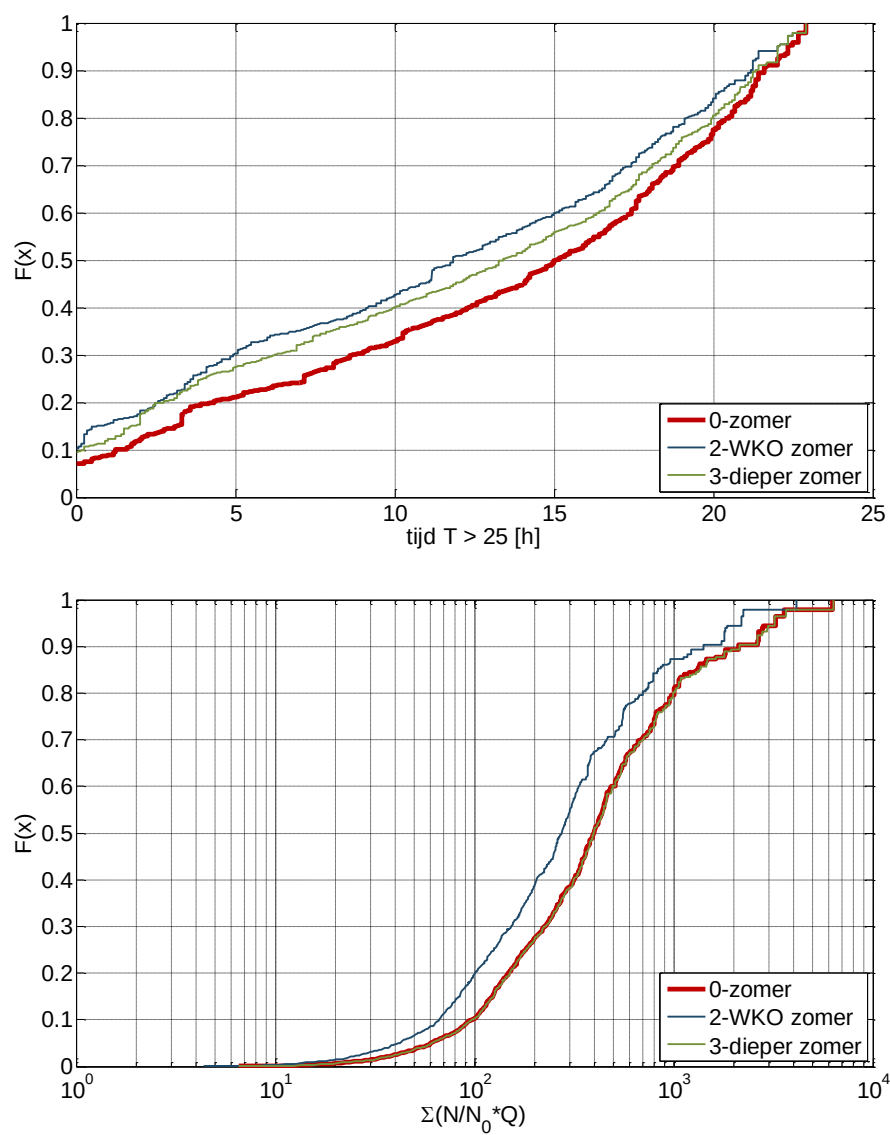
Om de gevoeligheid van de scenario's "2-WKO zomer" en "3-dieper zomer" voor de temperatuur van het water uit het transportnet te onderzoeken zijn deze scenario's gemodelleerd voor 5 verschillende instroomtemperaturen: 16, 18, 20, 22, 24 en 26 graden. De resultaten van deze berekeningen zijn weergegeven in de onderstaande figuren.



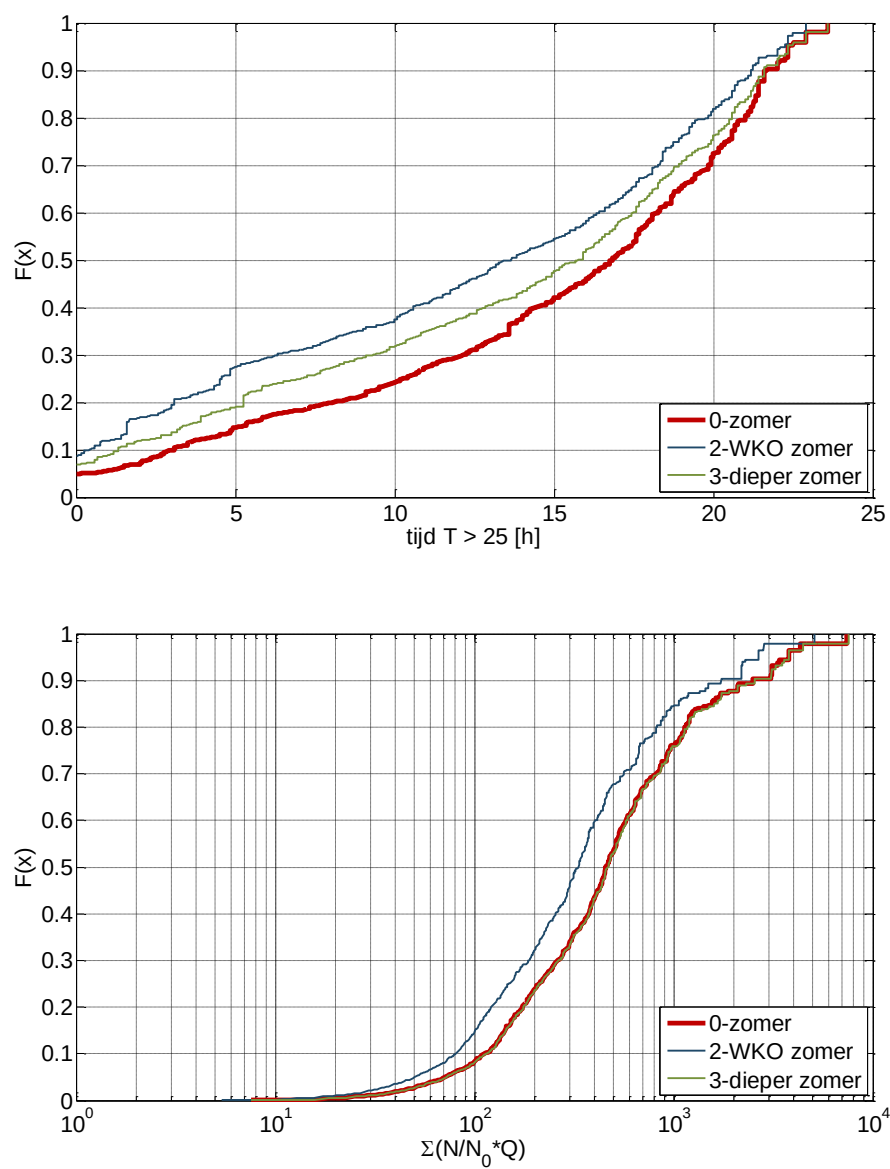
Figuur III.1. Overschrijdingstijd en surrogaatparameter voor instroomtemperatuur van 16°C.



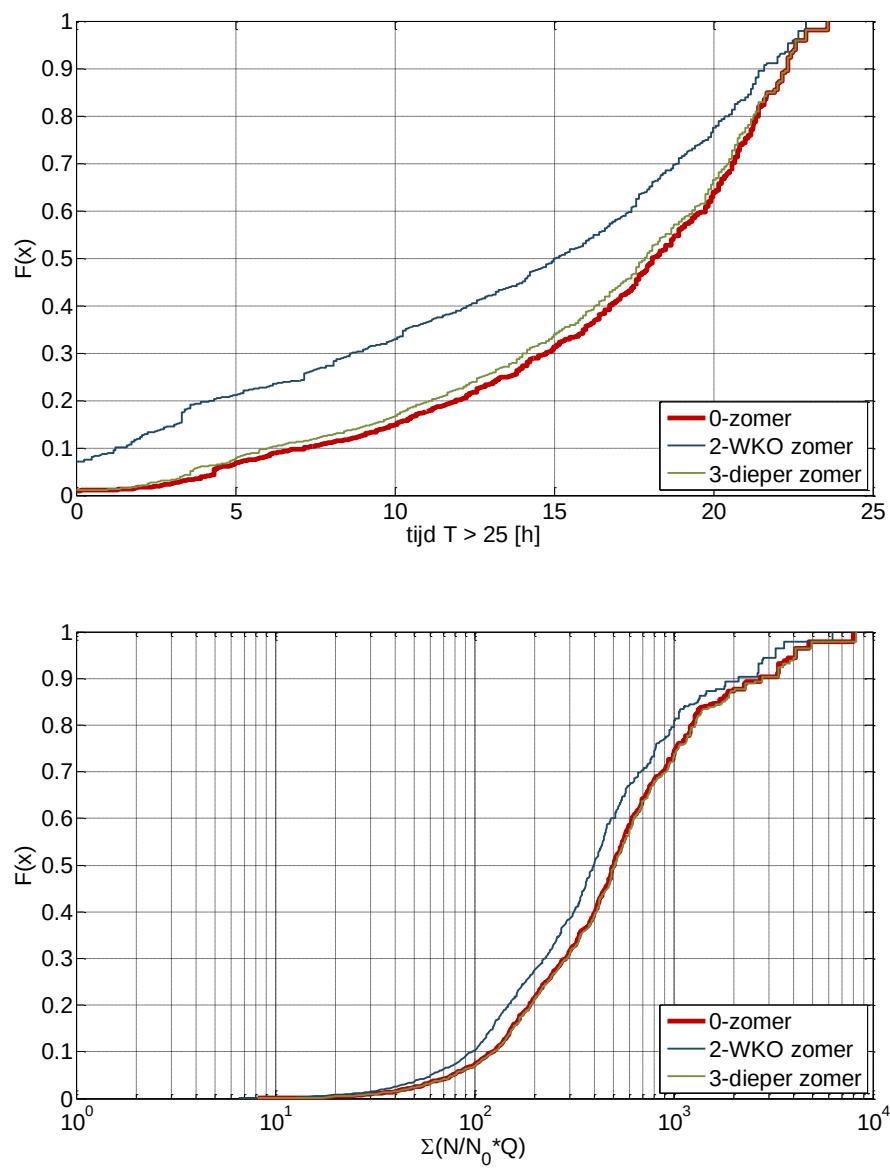
Figuur III.2. Overschrijdingstijd en surrogaatparameter voor instroomtemperatuur van 18°C.



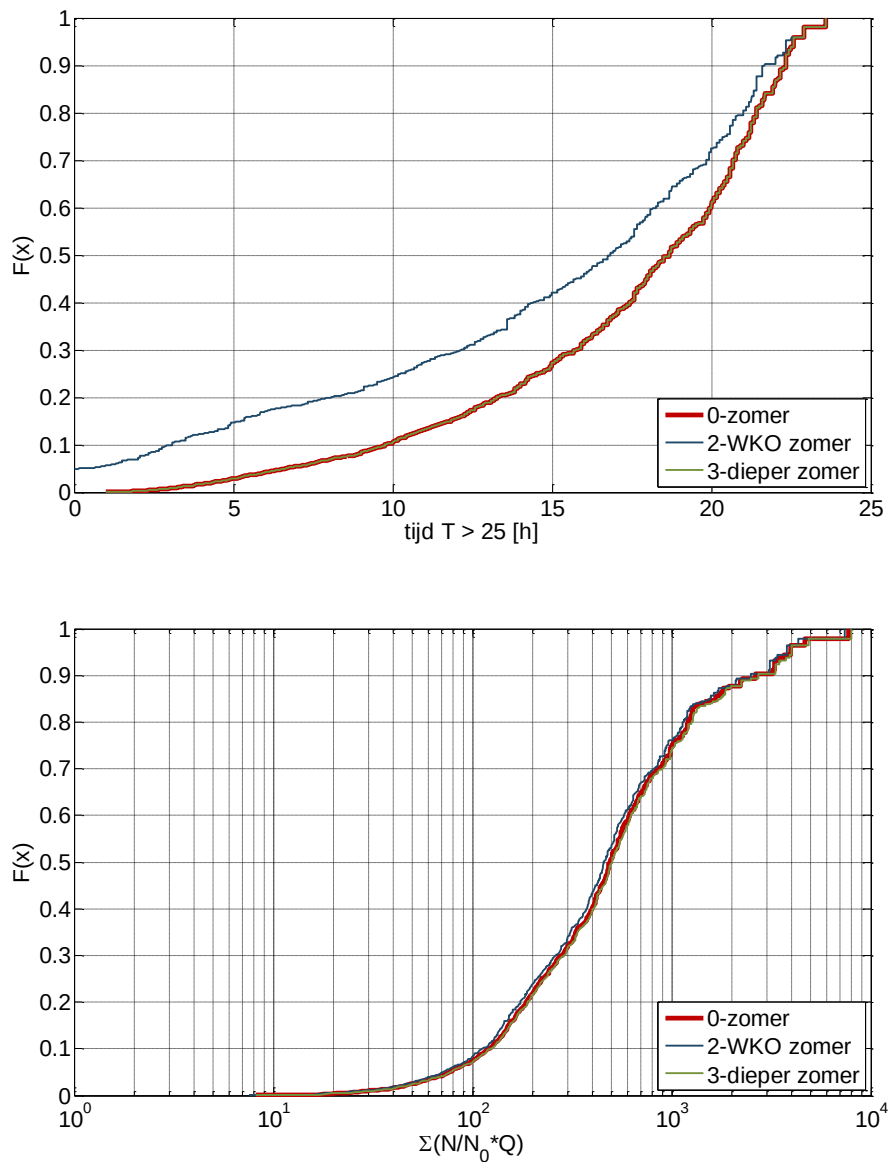
Figuur III.3. Overschrijdingstijd en surrogaatparameter voor instroomtemperatuur van 20°C.



Figuur III.4. Overschrijdingstijd en surrogaatparameter voor instroomtemperatuur van 22°C.



Figuur III.5. Overschrijdingstijd en surrogaatparameter voor instroomtemperatuur van 24°C.



Figuur III.6. Overschrijdingstijd en surrogaatparameter voor instroomtemperatuur van 24°C.

Op basis van de uitkomsten voor overschrijdingstijd en surrogaatparameter zoals weergegeven in de figuren III.1-III.6 kunnen een aantal conclusies getrokken worden onder de voorwaarden zoals deze in hoofdstuk 3 aan het distributienet gesteld zijn.

- Naar mate de instroomtemperatuur hoger wordt convergeert de oplossing voor de overschrijdingstijd voor scenario “3-dieper zomer” steeds meer naar het nulscenario “0-zomer”. Tegelijkertijd zijn er geen effecten zichtbaar op de prestaties van het scenario “3-dieper zomer” voor de surrogaatparameter; onder alle vier instroomtemperaturen verschilt deze oplossing niet significant van het nulscenario.
- Voor lagere zomerse temperaturen (18-20°C) presteren beide scenario’s “2-WKO zomer” en “3-dieper zomer” vergelijkbaar op overschrijdingstijd. Bij hogere temperaturen presteert het scenario “2-WKO zomer” zowel absoluut als relatief (aan nulscenario) beter op overschrijdingstijd dan het “3-dieper zomer” scenario.

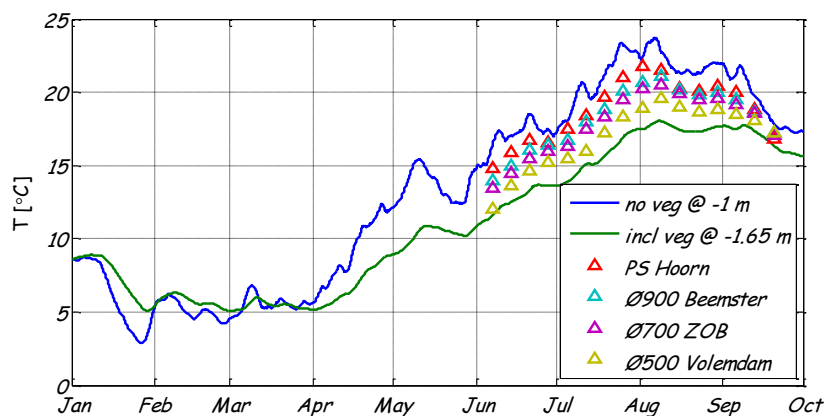
- Het verschil van prestatie op de surrogaatparameter voor beide scenario's "2-WKO zomer" en "3-dieper zomer" neemt toe naarmate de temperatuur hoger wordt (18 -> 22°). Bij instroomtemperaturen van 24-26°C neemt dit verschil weer af. Bij een instroomtemperatuur van 26°C is er zelfs nauwelijks verschil tussen beide scenario's.

Bijlage IV Validatie temperatuurmodel in 2013

Het bodemtemperatuurmodel en watertemperatuurmodel zijn gevalideerd en gepubliceerd. Wel is het zo dat er altijd wat onzekere factoren zijn voor specifieke locaties. Om een gevoel te krijgen voor de juiste randvoorwaarden voor het gebied van Volendam zijn de gebruikte modellen ook toegepast voor de situatie van 2013 en vergeleken met enkele temperatuurmetingen die PWN in dit gebied gedaan heeft.

Transportleidingen

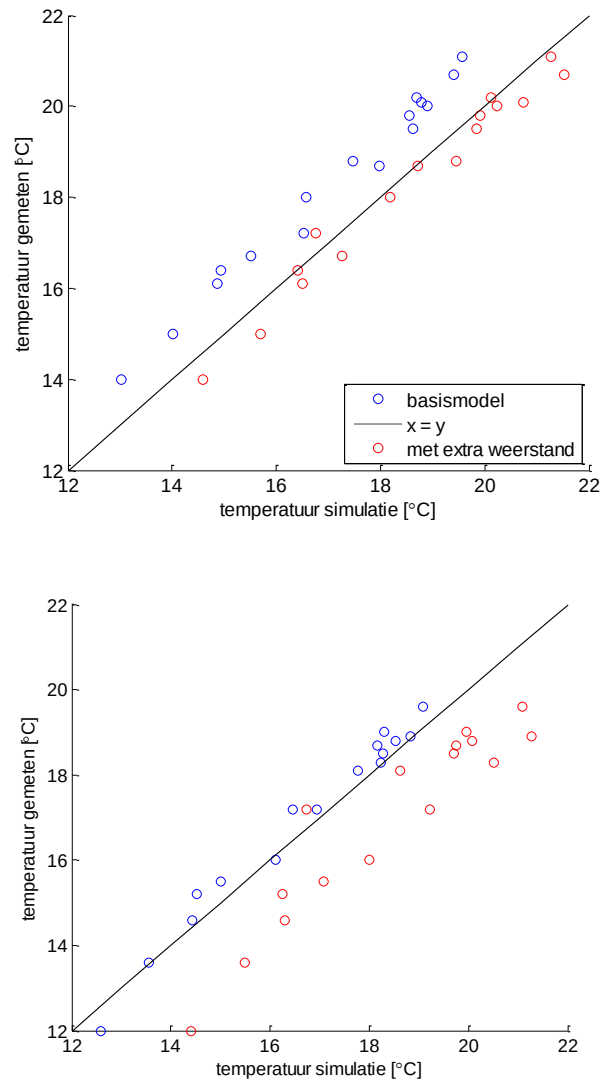
Om het model voor het transportnet te valideren zijn in de zomer van 2013 metingen uitgevoerd op verschillende locaties tussen pompstation Hoorn en het einde van de transportleiding. Verschillende metingen over de tijd zijn beschikbaar van steeklansen op transportleidingen (locaties zoals in Figuur 3.2). De transportleidingen liggen op ca. -1.65 m, in klei en onder gras. Met het bodemtemperatuurmodel zijn de temperaturen in de bodem bepaald (Figuur IV.1). Met het watermodel en de gesimuleerde bodemtemperaturen zijn de watertemperaturen bepaald op de verschillende locaties. De modeluitkomsten komen goed overeen met de gemeten temperaturen. Het model laat zien dat de temperatuur aan het eind van de transportleiding niet gelijk is aan de ingaande temperatuur af PS Andijk, en ook niet gelijk is aan de temperatuur van de bodem.



Figuur IV.1. Gemodelleerde bodemtemperatuur op -1.65 m (incl. vegetatie op het maaiveld) en op -1 m (zonder vegetatie op het maaiveld) naast temperatuurmetingen op verschillende locaties in het transportnet tussen PS Hoorn en Volendam (einde transportleiding).

De metingen in het transportnet zijn ook vergeleken met het model wat uitgebreid is met een extra warmteweerstand (zie bijlage II). In de Figuren IV.2a en IV.2b is te zien dat het temperatuurmodel met extra warmteweerstand tot Beemster (Figuur IV.2a) meer overeenkomt met de metingen (ligt dicht op lijn $x=y$) dan het basismodel zonder extra warmteweerstand. Wanneer metingen aan het einde van de transportleiding vergeleken worden met door het model voorspelde resultaten lijkt het model met extra warmteweerstand een onderschatting van de temperatuurverandering te geven. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de invloed van het water op de bodem bij grote transportleidingen (~900 mm en groter) significant is (een extra warmteweerstand is dan

nodig), maar dat dit voor kleinere transportleidingen (~500 mm) verder stroomafwaarts minder het geval is. Een extra warmteweerstand kan dan leiden tot een onderschatting van de temperatuurverandering. Vervolgonderzoek is nodig om deze effecten verder te onderzoeken.

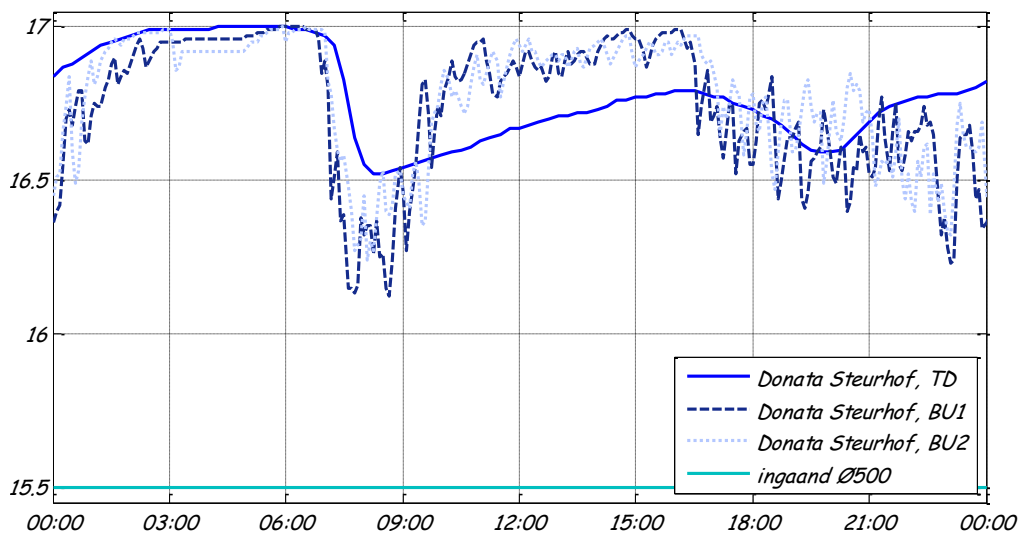


Figuur IV.2. Vergelijking basismodel en model met extra weerstand met metingen in (a) Beemster (bovenste figuur) en (b) Volendam einde transportleiding (onderste figuur).

Distributieleidingen

Een beperkt aantal temperatuurmetingen is beschikbaar in het distributienet van Volendam. De metingen zijn gedaan in het leidingnet, niet aan de tap, bij het verwisselen van de zakfilters op de locaties Donate Steurhof, Barketijn en Boezelgracht. Met het bodemtemperatuurmodel is bepaald wat de temperatuur op 1 m diepte in zand onder verhard oppervlak is. Als ingaande temperatuur zijn de metingen beschikbaar van de steeklans bij Volendam. Voor de ingaande temperatuur van Edam is geen meting beschikbaar. Omdat hiervan geen bruikbaar hydraulisch model beschikbaar was is aangenomen dat de temperatuur van het water uit Edam de bodemtemperatuur had aangenomen (17 gr). Met het watertemperatuurmodel is bepaald wat de

drinkwatertemperatuur is op de 3 locaties. Figuur IV.4 laat zien wat het resultaat is voor het Top down (TD)-model en 2 versies van het bottom-up (BU) model met SIMDEUM patronen. Voor locaties Barketijn en Boezelgracht is geen grafiek getoond: deze hebben de bodemtemperatuur aangenomen. Het BU-model voor Donata Steurhof laat zien dat er nog wat variatie is in temperatuur tijdens de dag en ook tussen de dagen (BU1 en BU2 zijn verschillend). De metingen zijn 's morgens rond 9.00 u gedaan, de exacte tijd is niet bekend. Het model voorspelt rond 9.00 een minimum temperatuur van 16.1, waar de meting op diezelfde dag (rond 9.00) 15.9 graden is. In combinatie met de resultaten voor Barketijn en Boezelgracht laat dit zien dat het model goed werkt voor het distributienet van Volendam. Ook laat het zien dat in het distributienet voor een deel de uitkomsten anders zijn met het TD model en BU model. In dit rapport is daarom met SIMDEUM patronen gewerkt, om niet de hoge temperaturen te overschatten.



Figuur IV.3. Variatie van temperatuur over de dag op Donata Steurhof met verschillende onderliggende hydraulische modellen (top-down versus SIMDEUM).