A network diagram consisting of various sized light blue circles connected by thin white lines, set against a solid blue background. The circles vary in size, with some being significantly larger than others, and they are interconnected in a complex, non-linear fashion.

KWR 2020.029 | April 2020

Modellering van de opwarming van drinkwater in drinkwaterinstallaties

Onder invloed van warmtenetten

Modellering van de opwarming van drinkwater in drinkwaterinstallaties

onder invloed van warmtenetten

KWR 2020.029 | April 2020

Opdrachtnummer

403073-001

Projectmanager

ir. A. (Andreas) Moerman

Opdrachtgever

Stefan Mol, Stichting Waternet

Auteur(s)

B. (Bram) Hillebrand, MSc

dr. ir. E.J.M. (Mirjam) Blokker

dr. J. (Joost) van Summeren

Kwaliteitsborger(s)

dr. P. (Peter) van Thienen

Verzonden naar

Stefan Mol, Stichting Waternet

Dit rapport is niet openbaar en slechts verstrekt aan de opdrachtgevers van het adviesproject. Eventuele verspreiding daarbuiten vindt alleen plaats door de opdrachtgever zelf.

N.B. de opdrachtgever heeft op 8 januari 2021 aan KWR kenbaar gemaakt dat dit rapport openbaar is en derhalve ook beschikbaar gemaakt mag worden via de online KWR bibliotheek.

Keywords

warmtenetten, temperatuur drinkwater, drinkwaterinstallatie

Jaar van publicatie
2020

Meer informatie

Bram Hillebrand, MSc.
T +31 (0)30 60 69 590
E Bram.Hillebrand@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



April 2020 ©

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevens bestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder

Samenvatting

Een van de alternatieven voor gas om onze huizen mee te verwarmen zijn warmtenetten. In dit rapport wordt onderzocht op basis van numerieke simulaties wat de invloed is van warmtelevering op de drinkwatertemperatuur aan de tap. Onderzocht is hoe de temperatuur in de aansluitleiding, de meterkast en de drinkwaterinstallatie de maximale en gemiddelde temperatuur aan de tap bepalen. Hiervoor zijn verschillende scenario's doorgerekend en zijn de maximale, gemiddelde en minimale drinkwatertemperatuur bij de keukenkraan, de douche en de badkamerkraan tijdens tappen vergeleken met de temperaturen in een referentiescenario.

Het blijkt dat het type warmtenet de grootste invloed heeft op de optredende temperaturen bij de verschillende tappunten. Een veel kleinere invloed hebben het seizoen, de lengte van de aansluitleiding en het gebruikte leidingmateriaal in de drinkwaterinstallatie. Opwarmtijden in de aansluitleiding (PE of koper) zijn kort. Stilstaand water is na ongeveer 20 minuten opgewarmd tot de omgevingstemperatuur. Tijdens watervraag is de verblijftijd in de aansluitleiding echter kort, zodat er nauwelijks een verandering van temperatuur optreedt. Dat betekent dat de temperatuur die na doorstroming aan de tap gemeten wordt vooral bepaald wordt door de temperatuur van het drinkwater uit de distributieleiding. In geval een warmteleiding vlak bij een aansluitleiding van het drinkwater ligt zal 25% van het totale waterverbruik opwarmen in de aansluitleiding, en ca. 10% van het totale waterverbruik zal met een hogere temperatuur uit de kraan stromen of bij de warmtapwaterbereider aankomen.

De gemiddelde drinkwatertemperatuur komt voor verschillende scenario's in deze studie boven de wettelijke grens van 25 °C. Dit brengt mogelijk een microbiologische risico met zich mee. Er is een verhoogd risico op *Legionella pneumophila* wanneer de temperatuur meer dan 7 dagen boven de 28 °C uitkomt. Uit berekeningen blijkt dat de maximale temperaturen bij de verschillende tappunten allemaal bijna gelijk zijn aan de temperaturen van de directe omgeving van de aansluitleiding/leiding in de meterkast (luchttemperatuur). Er is niet precies bekend hoe hoog die temperaturen zijn; op ca. 25 cm van een secundaire warmteleiding (DN50) is de bodemtemperatuur op 75 cm diepte in zand onder tegels gedurende enkele dagen per jaar (in een warme zomer) boven de 28 °C; er zijn ons geen metingen bekend van de temperatuur in de meterkast. *Legionella* kan dus in de biofilm in aansluitleidingen groeien. Dit betekent echter nog niet dat er ook uitwisseling is tussen de waterfase en de biofilm, en dat *Legionella* uit de biofilm in het drinkwater komt. Hiernaar is meer onderzoek nodig.

Om te voorkomen dat er hoge maximale drinkwatertemperaturen optreden bij de verschillende tappunten is het belangrijk om de directe omgevingstemperatuur van de drinkwateraansluitleiding laag te houden. Dit kan enerzijds door de aansluitleidingen van het warmtenet en het drinkwater voldoende ver uit elkaar te leggen en anderzijds door te kiezen voor lagetemperatuurwarmtenetten. Ook dan is het raadzaam om de aansluitleidingen niet te dicht bij elkaar te leggen. De precieze invloed van de afstand tussen de twee aansluitleidingen zou nog verder moeten worden onderzocht.

Inhoud

Samenvatting	3
1 Inleiding	5
2 Methode	6
2.1 Inleiding	6
2.2 Scenario's	6
2.3 Tappatronen	8
2.4 Berekeningen	9
3 Resultaten	10
3.1 Inleiding	10
3.2 Opwarming	10
3.3 Drinkwatertemperaturen aan de keukenkraan	11
3.4 Drinkwatertemperatuur aan de douche	16
3.5 Drinkwatertemperatuur aan de badkamerkraan	17
3.6 Samenvatting van de resultaten	18
3.6.1 Type warmtenet	18
3.6.2 Seizoen	18
3.6.3 Type materiaal van de drinkwaterinstallatie	19
3.6.4 Lengte aansluitleiding	19
3.6.5 Optredende drinkwatertemperaturen	19
4 Discussie	20
4.1 Factoren die gemiddelde en maximale temperatuur aan de tap beïnvloeden	20
4.2 De hoeveelheid water die wordt beïnvloed door het warmtenet	20
4.3 Beperkingen van het model	22
4.4 Mogelijkheden om de drinkwatertemperatuur te beperken	23
4.5 Microbiologische waterkwaliteit	24
5 Conclusie en aanbevelingen	25
6 Bibliografie	26
I EPANET-MSX input file (.msx)	27
II Modellering bodemtemperatuur rond warmteleiding	30

1 Inleiding

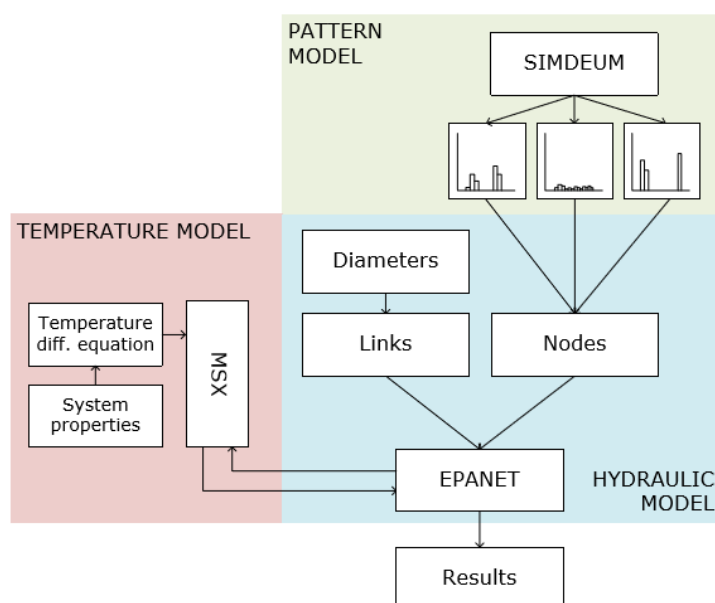
In het kader van de energietransitie zijn er verschillende mogelijkheden om huizen te verwarmen in plaats van met gas. Eén van deze mogelijkheden zijn warmtenetten. Hierin zijn verschillende varianten mogelijk, namelijk een hogetemperatuurwarmtenet waarbij het aangevoerde water een temperatuur van ~ 70 °C heeft en een lagetemperatuurwarmtenet waarbij het aangevoerde water een temperatuur van ~ 40 °C heeft. Een derde mogelijkheid is een bronnet waarbij het aangevoerde water koud (ca 10 °C) is en wordt opgewarmd met individuele warmtepompen. Warmtenetten en drinkwaterdistributiesystemen liggen samen in de beperkte ruimte onder de grond. De mogelijke invloed die zij op elkaar hebben is onderzocht (van der Zwan, Blokker, Agudelo-Vera, & Nugroho, 2019). De voorliggende studie richt zich op het laatste stukje in het distributiesysteem namelijk de invloed die een warmtetaansluitleiding heeft op een drinkwateraansluitleiding in de paar meter voor de voordeur en de invloed in de meterkast wanneer beide hier binnenkomen. De specifieke vraag is wat de bijdrage is van een warmteaansluitleiding in de bodem en de meterkast aan de drinkwatertemperatuur aan de tap. Treden er in een dergelijk scenario temperaturen op die de microbiologische veiligheid in gevaar brengen of risico van verbranding met zich meenemen.

In deze studie hebben we deze vraag modelmatig onderzocht. Het was mogelijk om een groot aantal verschillende scenario's door te rekenen en met elkaar te vergelijken. Hiermee hebben we naast de verschillende type warmtenetten ook de invloed van onder andere de lengte van aansluitleidingen, leidingmateriaal en de verschillende seizoenen onderzocht. Voor de beoordeling van de resultaten hebben we ons beperkt tot de drie tappunten waar de meeste gezondheidsrisico's mee verbonden zijn namelijk de koude keukenkraan, de koude kraan van de douche en de koude badkamerkraan.

2 Methode

2.1 Inleiding

Voor de berekeningen hebben we een EPANET-model van een drinkwaterinstallatie gebruikt uit Moerman (2013). Op elk tappunt zit een tappatroon dat met SIMDEUM (Blokker, 2010) is gegenereerd. De warmteoverdrachtsvergelijkingen zijn opgelost gebruikmakend van EPANET-MSX en de hydraulische berekeningen met behulp van EPANET. Een overzicht is gegeven in Figuur 2-1. Er vindt warmteoverdracht plaats bij elke leiding. Voor de aansluitleiding is er rekening mee gehouden dat deze in de grond ligt, ook is er vanwege convectie rekening gehouden met de oriëntatie (verticaal of horizontaal) van de leidingen in de drinkwaterinstallatie. Voor meer details zie paragraaf 2.3 en Moerman (2013).



Figuur 2-1: Overzicht van de rekenmethode. Overgenomen uit (Moerman, 2013)

2.2 Scenario's

In overleg met de opdrachtgever zijn 10 variabelen geïdentificeerd waarvan we de invloed willen onderzoeken. Deze zijn weergegeven in Tabel 2-1. Hiervan zijn er 6 onafhankelijk van elkaar; de overige hangen of af van het type warmtenet of van het seizoen. Dit heeft een lijst van 576 scenario's opgeleverd (een voor elke mogelijke combinatie) die we allemaal hebben doorgerekend. De variabelen zijn ook weergegeven in Figuur 2-2.

Alle waarden die zijn gekozen voor de verschillende variabelen zijn inschattingen gebaseerd op expertkennis. De beoordeling van de resultaten wordt gedaan door de verschillen met het referentiescenario te bekijken, niet zozeer door naar absolute waarden te kijken.

De warmteleiding die bij het huis aankomt is een DN50 leiding met een aanvoertemperatuur van 70 °C. De leiding is geïsoleerd met een PUR laag van 40 mm. Uit een berekening (zie bijlage II) blijkt dat de bodemtemperatuur rond de warmteleiding 2 tot 8 °C hoger is dan wanneer er geen warmteleiding ligt (Figuur II- 6). Op 25 cm van een secundaire warmteleiding (DN50) is de bodemtemperatuur ca. 3-4 °C warmer dan zonder deze warmteleiding. Een schatting op basis van eerder gemodelleerde bodemtemperaturen geeft dat in een warme zomer, in zand onder

tegels op ca. 75 cm diepte een temperatuur van bijv. 33 °C verwacht kan worden. In figuur 2-1 van een DPWE-rapport over opwarming is te zien dat de temperatuur op 75 cm onder zand maximaal 28 °C – 30 °C wordt in de oude klimaatscenario's (Blokker en Pieterse-Quirijns, 2012).

Om in de modellen goed onderscheid te kunnen maken tussen de herkomst van verschillende waterpakketjes en de invloed daarvan op maximale en gemiddelde temperatuur is in de scenario's met hogetemperatuurwarmtenet een veel hogere (model)temperatuur toegepast, namelijk 55 °C. Deze zou theoretisch kunnen optreden wanneer er geen (werkende) isolatielaag is. De scenario's zijn dus worst case, en komen niet overeen met de werkelijkheid. De temperatuur in de meterkast is niet bekend, daarom zijn dezelfde temperaturen gebruikt als rond de aansluitleiding.

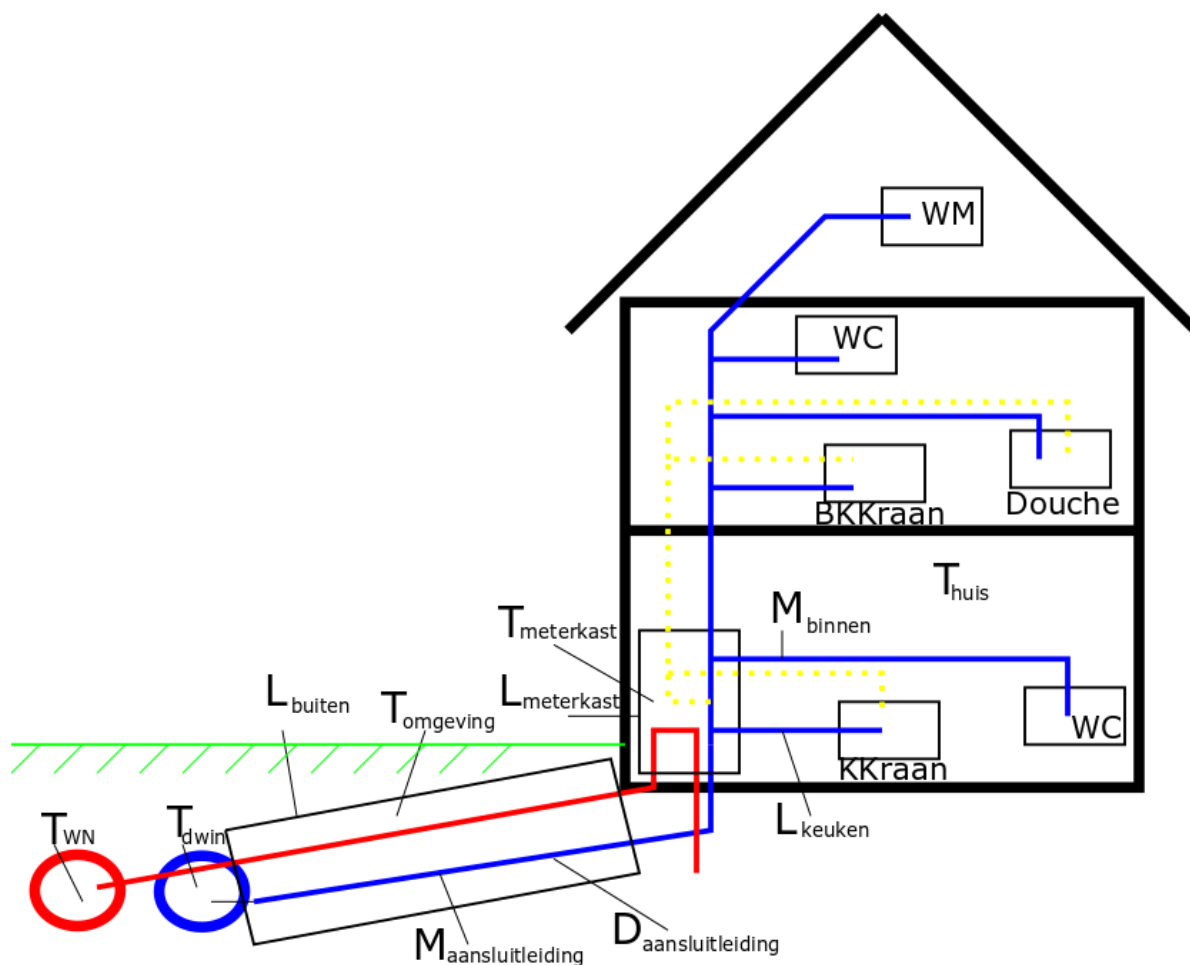
De modelberekeningen de verschillende type warmtenetten geven inzicht in de invloed op maximale en gemiddelde temperaturen als gevolg van de verschillende herkomsten van het water. De representatie van de werkelijkheid is echter anders dan de gekozen benaming doet vermoeden:

- Berekening hogetemperatuurwarmtenet met 55 °C – in werkelijkheid treedt dit niet (tenzij de isolatie rond het warmtenet niet functioneert)
- Berekening lagetemperatuurwarmtenet met 30 °C – in werkelijkheid zijn dit temperaturen die optreden bij gebruik van een hogetemperatuurwarmtenet (schatting is 33 °C)
- Berekening zonder warmtenet – in werkelijkheid zijn dit temperaturen die optreden bij gebruik van een lagetemperatuurwarmtenet of bij gebruik van een bronnet.

Om verwarring te voorkomen wordt daarom bij de modelberekening gesproken van HTW (hogetemperatuurwarmtenet) en LTW (lagnetemperatuurwarmtenet).

Tabel 2-1: Overzicht van de verschillende variabelen. Vetgedrukt zijn waarden van de referentiescenario's waarin geen warmtenet aanwezig is.

Variabele	Betekenis	Seizoen		Type warmtenet		Onafhankelijke variabele
		Zomer	Winter	HTW (70 °C)	LTW (40 °C)	
T_{DWIN} (afhankelijk van Seizoen)	Temperatuur van drinkwater uit distributienet	20 °C	10 °C			
$T_{OMGEVING}$ (afhankelijk van seizoen en type warmtenet)	Temperatuur in de grond direct om aansluitleiding	23 °C	3 °C	55 °C	30 °C	
L_{BUITEN}	Lengte aansluitleiding					2 m / 10 m
$L_{METERKAST}$	Lengte/hoogte meterkast					0 m / 0,5 m / 2 m
L_{KEUKEN}	Lengte leiding van meterkast tot keukenkraan					5 m / 20 m
$T_{METERKAST}$ (afhankelijk van seizoen en type warmtenet)	Temperatuur in de meterkast	23 °C	20 °C	55 °C	30 °C	
T_{HUIS} (afhankelijk van seizoen)	Temperatuur in huis	23 °C	20 °C			
$D_{AANSLUITLEIDING}$	Diameter aansluitleiding					25 mm / 32 mm
$M_{AANSLUITLEIDING}$	Materiaal aansluitleiding					Koper / PE
M_{BINNEN}	Materiaal drinkwaterinstallatie					Koper / PE

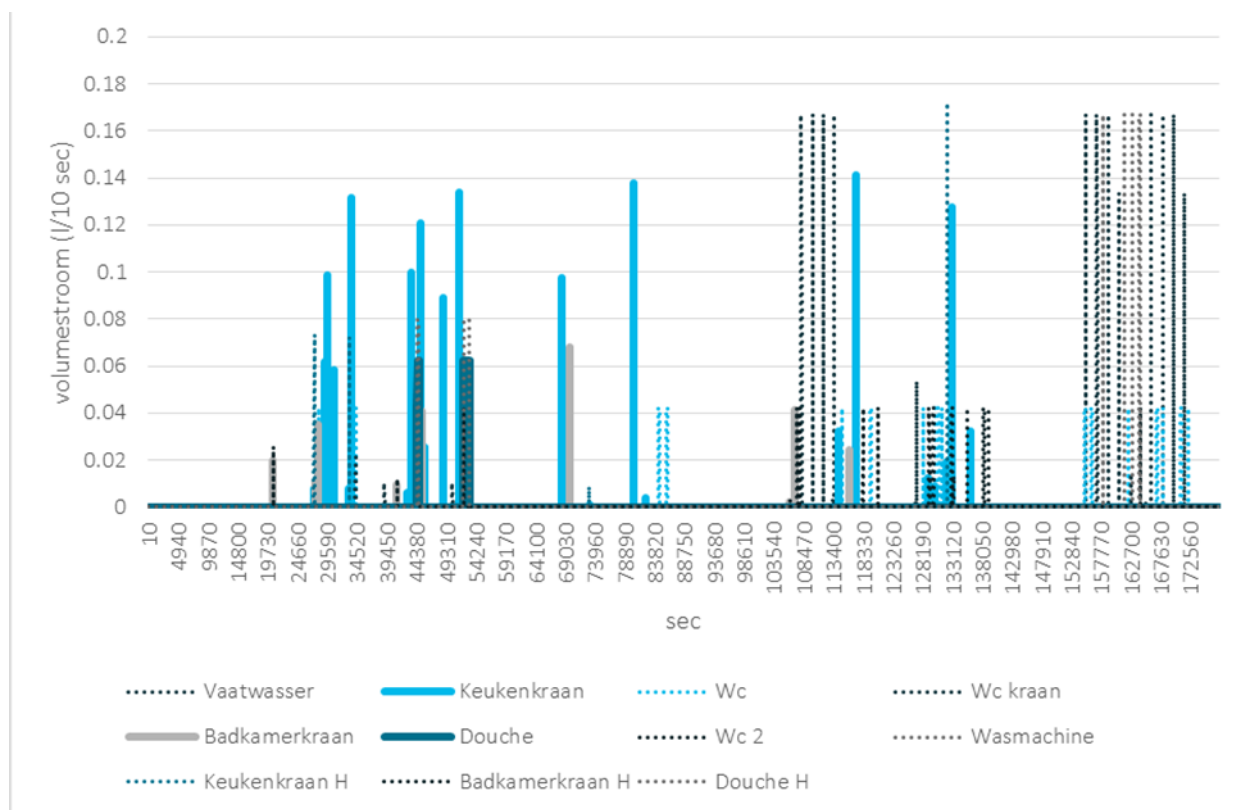


Figuur 2-2: Schematisch overzicht van de variabelen en tappen. De blauwe lijnen zijn de drinkwaterleidingen; de rode de aanvoerleiding van het warmtenet.

2.3 Tappatronen

In Figuur 2-3 zijn de gebruikte (SIMDEUM-)tappatronen op de verschillende tappen weergegeven. Alle tappen hebben invloed op de stroming van het drinkwater in de drinkwaterinstallatie en daardoor op de temperatuur van het drinkwater in de drinkwaterinstallatie. De tappatronen zijn stochastisch en zijn soms kort en soms wat langer, en er zijn verschillende tijdsduren tussen de tappen. Hiermee worden werkelijke tappatronen gesimuleerd. Doorstroming betekent dat er een tapping is, maar de duur van de tapping is niet gestandaardiseerd, en leidt niet altijd tot een evenwichtssituatie van de eindtemperatuur aan de tap.

Voor deze studie hebben we afgesproken om ons te richten op de drie tappen waar gezondheidsrisico's m.b.t. microbiologie het grootst zijn, namelijk de keukenkraan, de badkamerkraan en de douche. In alle drie de gevallen focussen we op de koudwaterkraan. De koudwaterleidingen zijn met blauwe lijnen aangegeven, de warmwaterleidingen met gele stippellijnen.



Figuur 2-3. Tappatronen gesimuleerd met SIMDEUM voor ieder tappunt. Met doorgetrokken lijnen zijn de drie tappunten weergegeven die zijn onderzocht in deze studie: de keukenkraan, de douche en de badkamerkraan. Gestippeld is het verbruik op alle andere tappunten. Deze tappunten hebben wel invloed op de drinkwatertemperatuur in de drinkwaterinstallatie.

2.4 Berekeningen

De drinkwaterinstallatie is gemodelleerd in EPANET. Hierin zijn een huis met alle leidingen binnen (gesplitst in warm- en koudwaterleidingen) gemodelleerd. Voor het huis ligt een aansluitleiding voor drinkwater. Vervolgens zijn er met behulp van EPANET-MSX temperatuurrandvoorwaarden opgelegd op iedere leiding en daarna zijn de warmteoverdrachtsvergelijkingen opgelost. In EPANET is vervolgens de hydraulica doorgerekend met de SIMDEUM tappatronen op de verschillende tappunten. Dit alles is gedaan voor 24 uur met een tijdstap van 10 seconden. Voor een overzicht van de gebruikte methode verwijzen we naar Moerman (2013), naar Zlatanovic, Moerman, van der Hoek, Vreeburg, & Blokker (2017) en naar de EPANET-MSX input file in de bijlage. De randvoorwaarden op de verschillende leidingen zijn: $T_{OMGEVING}$ op de aansluitleiding, $T_{METERKAST}$ op de leiding in de meterkast en T_{HUIS} op alle andere leidingen. T_{DWIN} is de ingaande temperatuur van het drinkwater. Het is belangrijk om op te merken dat $T_{METERKAST}$ gelijk is aan $T_{OMGEVING}$ voor scenario's met warmtenetten en gelijk aan T_{HUIS} voor de referentiescenario's. Dus dit is niet een onafhankelijke parameter waarvoor de invloed is onderzocht. Voor de berekeningen is van een zeer hoge omgevingstemperaturen ($T_{OMGEVING}$) uitgegaan (zie § 2.2) voor de temperatuur rond aansluitleiding en meterkast.

3 Resultaten

3.1 Inleiding

Voor de resultaten hebben we gekeken naar drie tappunten. De koudwaterzijde van keukenkraan, douchekraan en de badkamerkraan. Hier hebben we gekeken naar de maximum, minimum en gemiddelde drinkwatertemperatuur tijdens het tappen gedurende 24 uur. Dit betekent bijvoorbeeld dat wanneer in een scenario voor de maximale drinkwatertemperatuur bij de keukenkraan X °C gevonden wordt, dat de drinkwatertemperatuur bij dit tappunt gedurende de 24 uur tijdens een tapmoment minimaal een keer X °C is geweest.

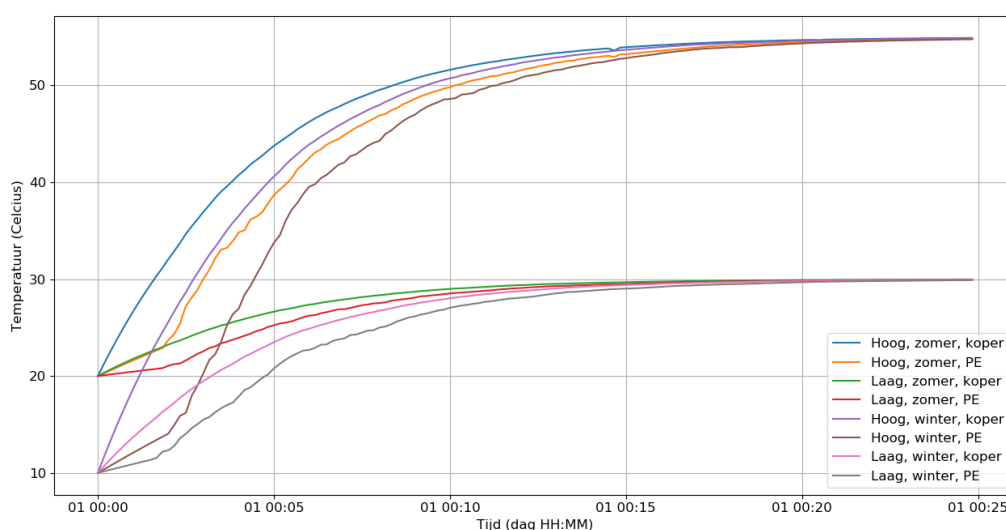
Het verloop van de drinkwatertemperatuur op een tappunt in het geval van een aanwezig warmtenet is ongeveer als volgt:

- 1) Eerst komt al het water uit de leidingen van de meterkast tot het desbetreffende tappunt uit de kraan (over het algemeen gelijk aan de temperatuur van het huis);
- 2) als de kraan lang genoeg open staat volgt hierna het water uit de leiding in de meterkast en de aansluitleiding. Afhankelijk van de afkoeling onderweg is de temperatuur van het water lager (maar niet veel lager) dan de maximale temperatuur (T_{OMGEVING}).
- 3) Wanneer de kraan daarna nog steeds openstaat, komt er water uit de distributieleiding die vervolgens tijdens het transport door de aansluitleiding en drinkwaterinstallatie in meer of mindere mate wordt opgewarmd voordat het bij het desbetreffende tappunt is.
- 4) Dit laatste wordt beïnvloed door het vlak ervoor of gelijktijdig openzetten van andere tappunten. Bij een hogere doorstroming kan er door convectie snellere opwarming zijn, maar belangrijker is dat de verblijftijd in de drinkwaterinstallatie hierdoor korter wordt en er dus waarschijnlijk minder invloed is van de temperatuur in de woningen; de temperatuur dus meer gelijk is aan de drinkwatertemperatuur uit het distributienet.

Het maximum (punt 2 hierboven) betreft vaak een korte piek. Omdat het maximum kort duurt en de duur van het minimum sterk afhankelijk is van de tapduur is er ook gekeken naar de gemiddelde temperatuur. De resultaten zijn weergegeven in box-whiskerplots, waarbij geldt dat de oranje lijn de mediaan aangeeft, de box van het laagste kwartiel tot het hoogste kwartiel (25 – 75%) gaat en de lijnen het minimum en het maximum aangeven. De box-whiskerplots bestaan uit alle scenario's binnen die categorie. De variatie die de box-whiskerplots weergeven is dan ook belangrijker dan de exacte waarden. In de rest van dit rapport wordt met keukenkraan de koudwateraansluiting van de keukenkraan, met douche de koudwateraansluiting van de douche en met badkamerkraan de koudwateraansluiting van de badkamerkraan bedoeld.

3.2 Opwarming

Figuur 3-1 toont de opwarming van het drinkwater in het knooppunt aan het einde van de meterkast voor verschillende scenario's. Dit is indicatief voor de tijd die het kost voor stilstaand water om terug te komen op de maximale temperatuur (gelijk aan T_{OMGEVING}). In elk scenario heeft het water de maximum temperatuur bereikt na ongeveer 20 minuten voor een eindtemperatuur van 55 °C (zoals hier gebruikt is in het scenario met HTW) en na ongeveer 15 minuten voor LTW (30 °C). Voor HTW is het drinkwater in de zomer in koperen leidingen na 5 minuten al ~45 °C en in de winter voor PE leidingen ~35 °C (de twee uitersten). Voor LTW is de drinkwater temperatuur na 5 minuten ~27 °C respectievelijk ~20 °C. De opwarming gaat dus snel, wanneer er 20 minuten nergens getapt wordt in het huis heeft het drinkwater in de aansluitleiding en ook in de meterkast al de maximale temperatuur bereikt. De temperaturen die bij de verschillende tappunten optreden zijn dus o.a. afhankelijk van of er in de 20 minuten daarvoor ergens anders een tappunt heeft opengestaan.

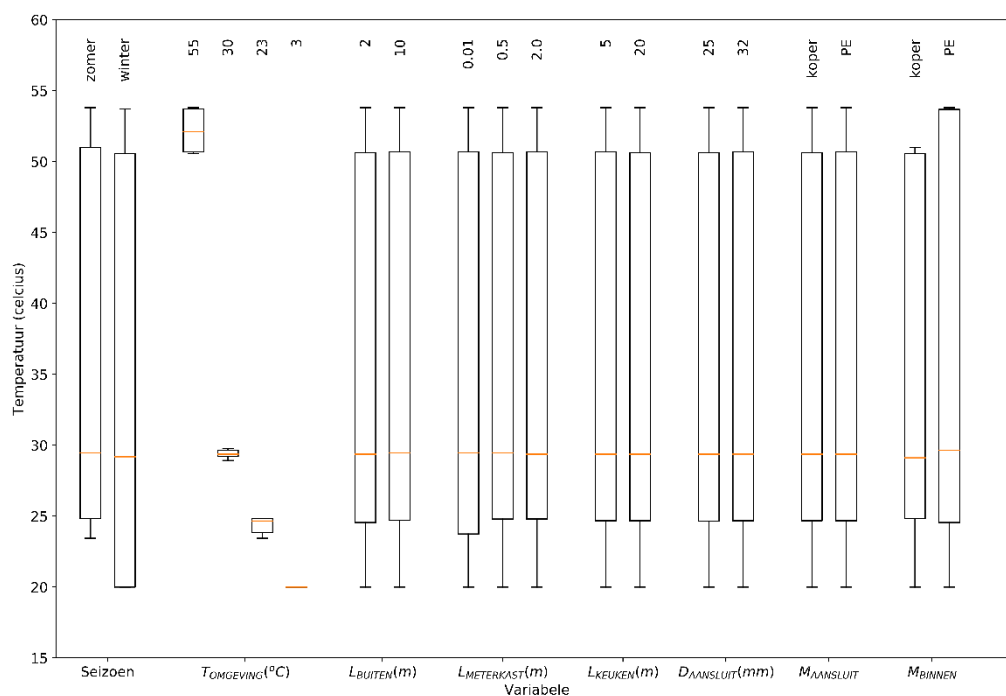


Figuur 3-1: Gemodelleerde opwarming van drinkwater. meteen na de meterkast voor het begin van de rekentijd, met stilstaand water (geen tappings). Voor modellen met allemaal koper en allemaal PE voor zomer en winter en HTW (hoog) en LTW (laag).

3.3 Drinkwatertemperaturen aan de keukenkraan

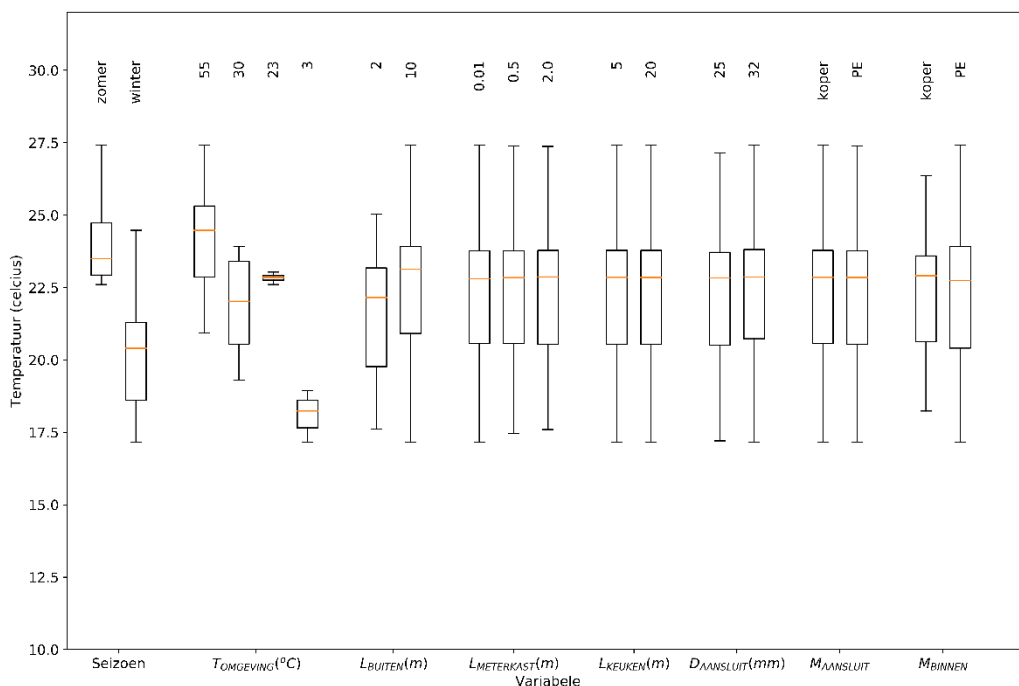
De resultaten worden als volgt gepresenteerd. Eerst identificeren we met behulp van box-whiskerplots de belangrijkste variabele. Vervolgens kiezen we een subset van de scenario's waarbij deze belangrijkste variabele wordt vastgezet om de invloed van de andere parameters te onderzoeken.

Figuur 3-2 laat de variatie van de maximale drinkwatertemperatuur zien voor alle 576 modellen. Elke categorie (Seizoen, $T_{OMGEVING}$ etc.) bevat alle 576 modellen gesplitst in de waardes die in die categorie voor komen (voor Seizoen bv Zomer en Winter alle zomermodellen staan in de zomer box-whiskerplot samengevat en alle wintermodellen in de winter box-whiskerplot). In het geval waar $T_{OMGEVING}$ 23 of 3 °C is gaat het om referentiemodellen waarin geen warmtenet aanwezig is respectievelijk in de zomer en in de winter. Uit deze figuur kunnen we concluderen dat voor de maximale drinkwatertemperatuur bij de keukenkraan, $T_{OMGEVING}$ (oftewel het type warmtenet) verreweg de grootste invloedsfactor is omdat hier de variatie in drinkwatertemperaturen tussen de verschillende categorieën het grootst zijn. Andere variabelen die (een kleine) invloed hebben zijn Seizoen en M_{BINNEN} (het materiaal van de drinkwaterinstallatie).

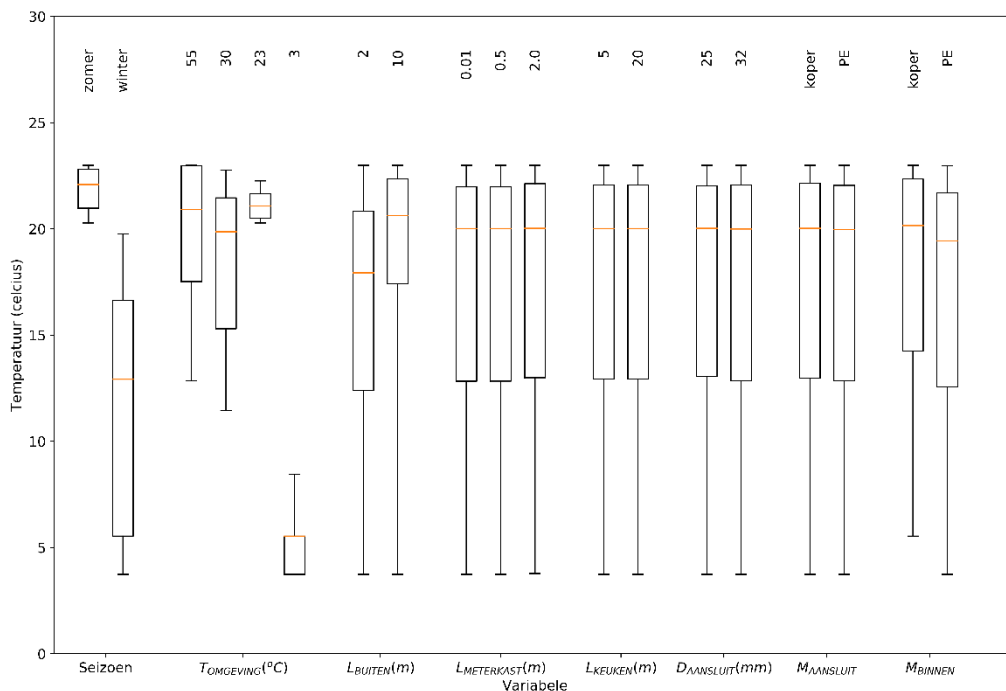


Figuur 3-2: De variatie in maximale drinkwatertemperatuur aan de keukenkraan bij doorstroming. In de verschillende box-whiskerplots is per categorie te zien welke variatie in temperaturen hierbij voorkomen. Het betreft hier alle scenario's met en zonder warmtenet (de referentiescenario's)

Figuur 3-3 toont dat voor de gemiddelde drinkwatertemperatuur $T_{OMGEVING}$, in vergelijking met het referentie-scenario in de winter, ook een belangrijke variabele is. Nu zien we ook duidelijk verschil voor Seizoen en in mindere mate voor L_{BUITEN} (lengte van de aansluitleiding). In Figuur 3-4 is dezelfde figuur weergegeven voor de minimale temperatuur. Ook hier zien we dat de belangrijkste variabelen $T_{OMGEVING}$ en Seizoen zijn en in mindere mate L_{BUITEN} . Voor de gemiddelde en de minimale drinkwatertemperatuur levert een HTW duidelijke verschillen op met beide referentiemodellen (zomer en winter, geen warmtenet) voor een LTW is er voor de gemiddelde en minimale drinkwatertemperatuur niet veel verschil meer met het zomerreferentiemodel (geen warmtenet). In de winter echter is de invloed wel significant.



Figuur 3-3: De variatie in gemiddelde drinkwatertemperatuur aan de keukenkraan bij doorstroming. In de verschillende box-whiskerplots is per categorie te zien welke variatie in temperaturen hierbij voorkomen. Het betreft hier alle scenario's met en zonder warmtenet (de referentiescenario's)

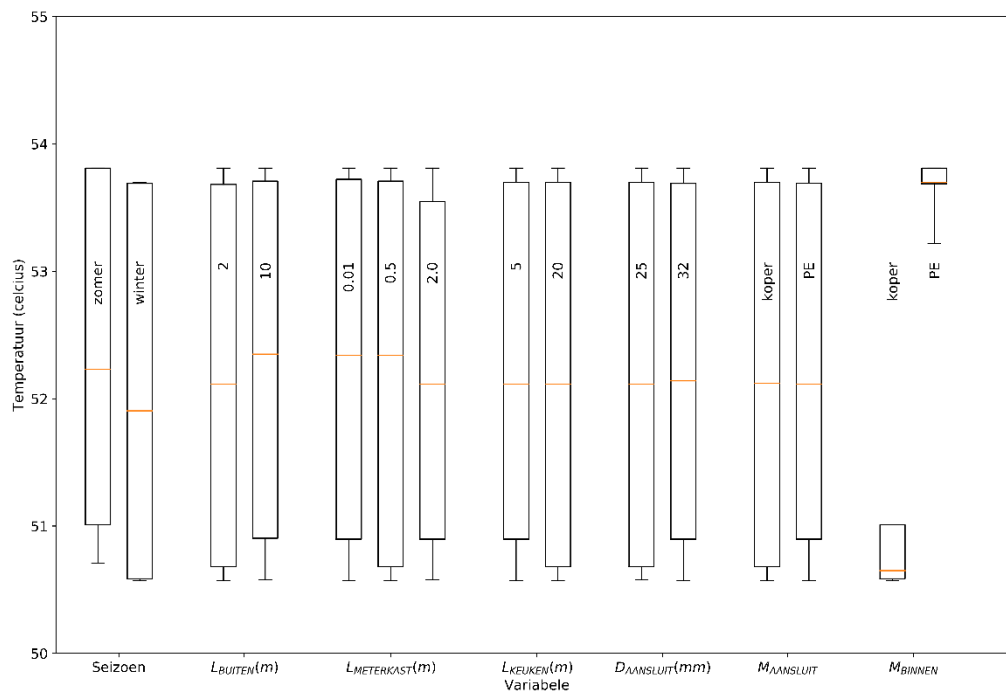


Figuur 3-4: De variatie in minimale drinkwatertemperatuur aan de keukenkraan bij doorstroming. In de verschillende box-whiskerplots is per categorie te zien welke variatie in temperaturen hierbij voorkomen. Het betreft hier alle scenario's met en zonder warmtenet (de referentiescenario's)

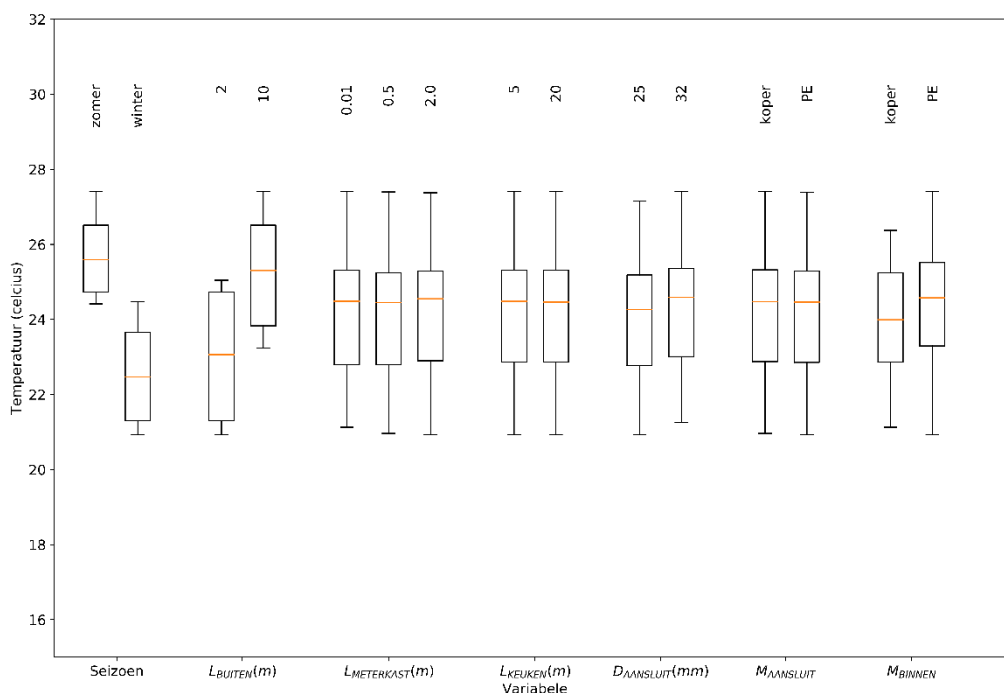
In Figuur 3-5 zien we de scenario's met een HTW. Hieruit valt te concluderen dat verreweg de grootste variatie binnen deze groep wordt bepaald door het feit of de drinkwaterinstallatie van koper of van PE is, waarbij er in koperen leidingen lagere maximale temperaturen optreden dan bij PE leidingen. Het water koelt sneller af (tussen

meterkast en tappunt) in koperen leidingen dan in PE leidingen en dit geeft een verschil van ~ 3 °C. Dit verschil hangt waarschijnlijk wel af van de hoogte van de omgevingstemperatuur. Verder is er nog een kleine invloed van het seizoen, de lengte van de aansluitleiding en de hoogte van de meterkast, maar hierbij gaat het om tienden van graden.

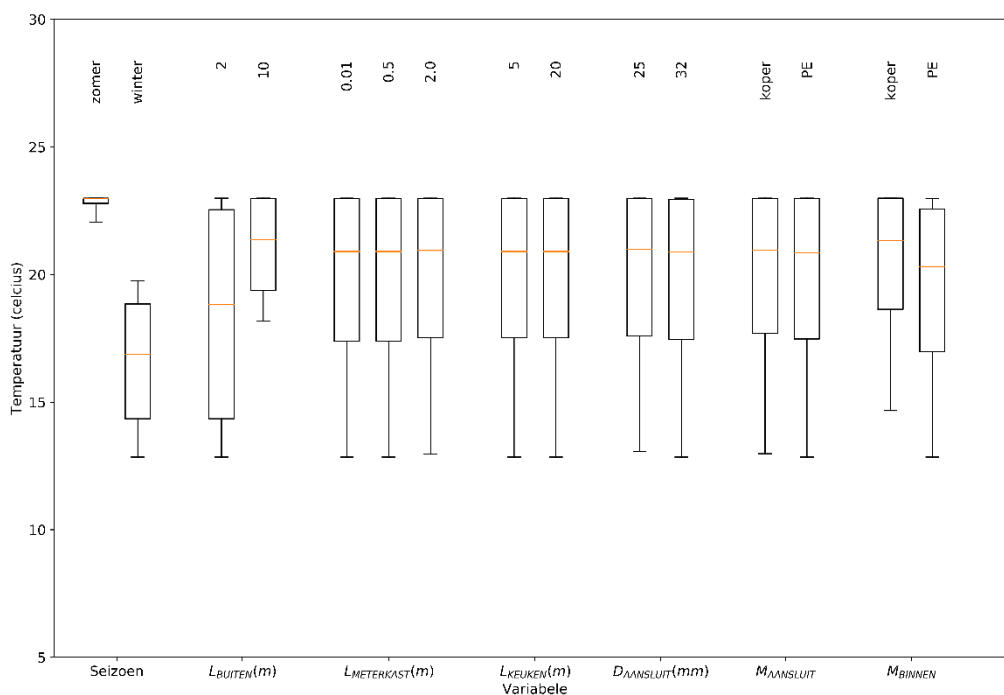
In Figuur 3-6 is te zien dat voor de gemiddelde drinkwatertemperatuur het seizoen en de lengte van de aansluitleiding belangrijker zijn dan het materiaal van de drinkwaterinstallatie. De gemiddelde temperatuur is lager in de winter en ook lager voor een kortere aansluitleiding. Het seizoen heeft vooral invloed door het verschil in kamertemperatuur (T_{HUIS}) en de temperatuur van het drinkwater in de distributieleiding. De lengte van de aansluitleiding bepaalt hoeveel tijd drinkwater heeft om tijdens doorstroming op te warmen; ook bepaalt deze het volume dat met de maximale temperatuur initieel de drinkwaterinstallatie instroomt tijdens het opendraaien van een tappunt. Figuur 3-7 laat zien dat de minimale temperatuur bij de keukenkraan gevoelig is voor dezelfde variabelen als de gemiddelde drinkwatertemperatuur.



Figuur 3-5: De variatie in maximale drinkwatertemperatuur bij de keukenkraan voor alle scenario's met een HTW.



Figuur 3-6: De variatie in de gemiddelde drinkwatertemperatuur bij de keukenkraan voor alle scenario's met een HTW



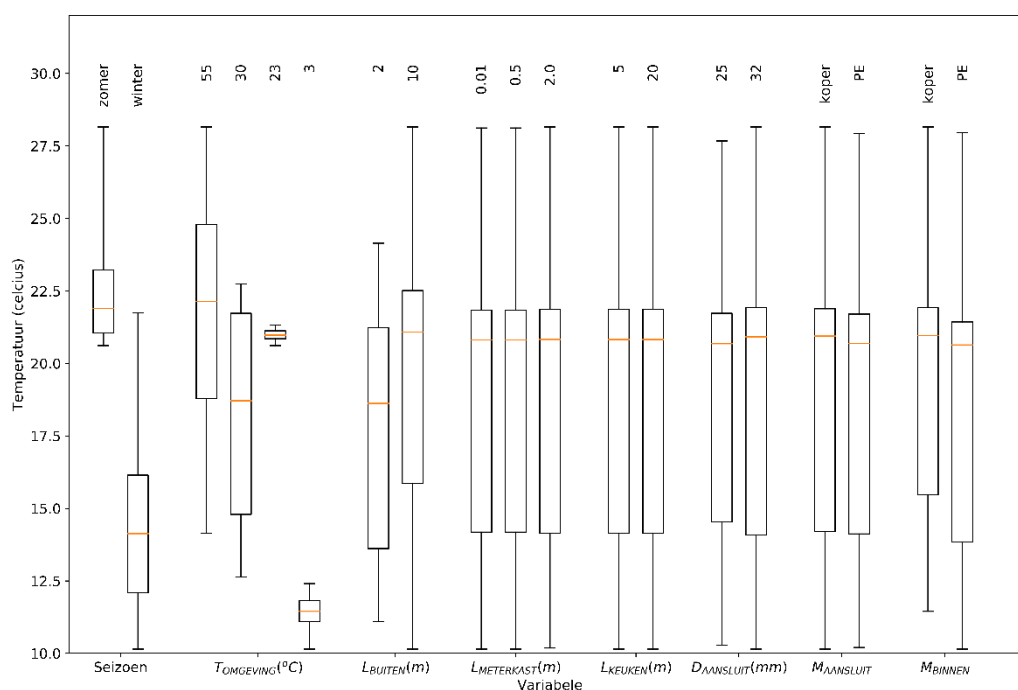
Figuur 3-7: De variatie in minimale drinkwatertemperaturen aan de keukenkraan voor scenario's met een HTW

Voor alle scenario's met een LTW zijn de resultaten vergelijkbaar. Ook hier is voor de maximale drinkwatertemperatuur het materiaal van de drinkwaterinstallatie het belangrijkste en voor de gemiddelde en minimale drinkwater temperatuur seizoen en lengte van de aansluitleiding.

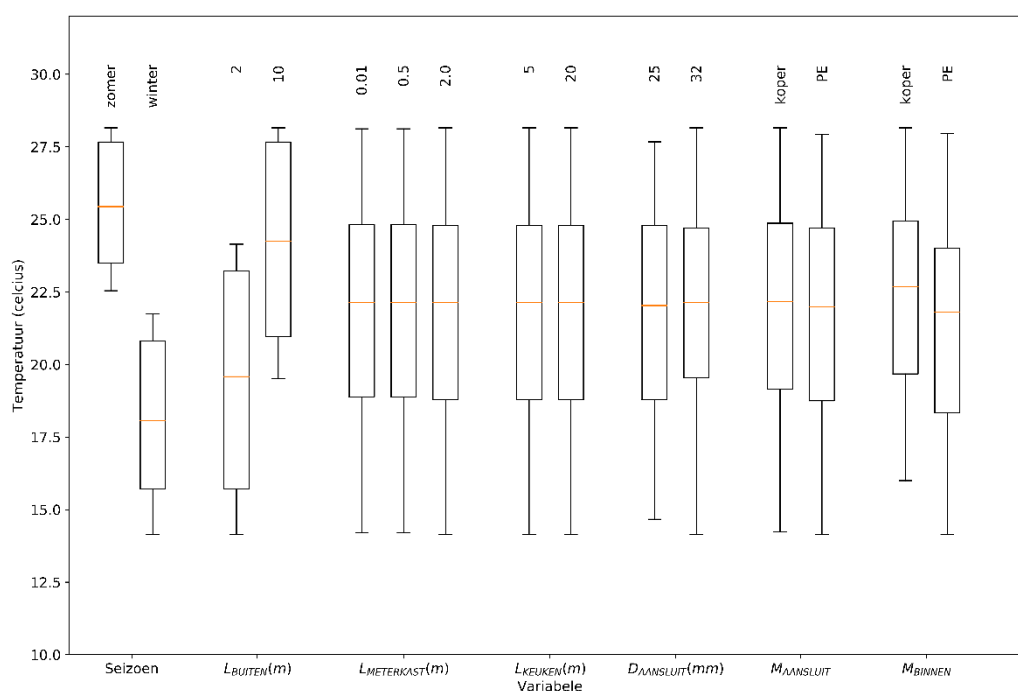
3.4 Drinkwatertemperatuur aan de douche

Voor de douche zijn de resultaten bijna identiek aan die van de keukenkraan. De gemiddelde drinkwatertemperatuur ligt iets lager (zie ook Figuur 3-8) en de variatie is iets groter maar de belangrijke variabelen komen overeen met die van de keukenkraan. Dit kan verklaard worden door de duur van het opzetten van de douchekraan vergeleken met die van de keukenkraan waardoor de gemiddelde temperatuur meer wordt beïnvloed door de drinkwatertemperatuur in het distributienet (T_{DWIN}) dan dat dit het geval is bij de keukenkraan.

In Figuur 3-9 zien we een interessant klein verschil tussen de keukenkraan en de douche. Voor de gemiddelde temperatuur van het drinkwater bij de keukenkraan zorgen PE binnenleidingen voor een iets hoger gemiddelde dan koper terwijl bij de douche dit effect omgekeerd is. Dit betekent dat voor de keukenkraan PE leidingen ervoor zorgen dat het drinkwater net iets minder afkoelt (tijdens korte tapduren) terwijl voor de douche PE leidingen ervoor zorgen dat het drinkwater net iets minder opwarmt (tijdens langere tapduren). Ook dit heeft dus weer te maken met de duur van het tappen. De verschillen zijn echter wel klein; het gaat om ongeveer 1 °C.



Figuur 3-8: De variatie in gemiddelde drinkwatertemperaturen voor alle scenario's bij de douche.

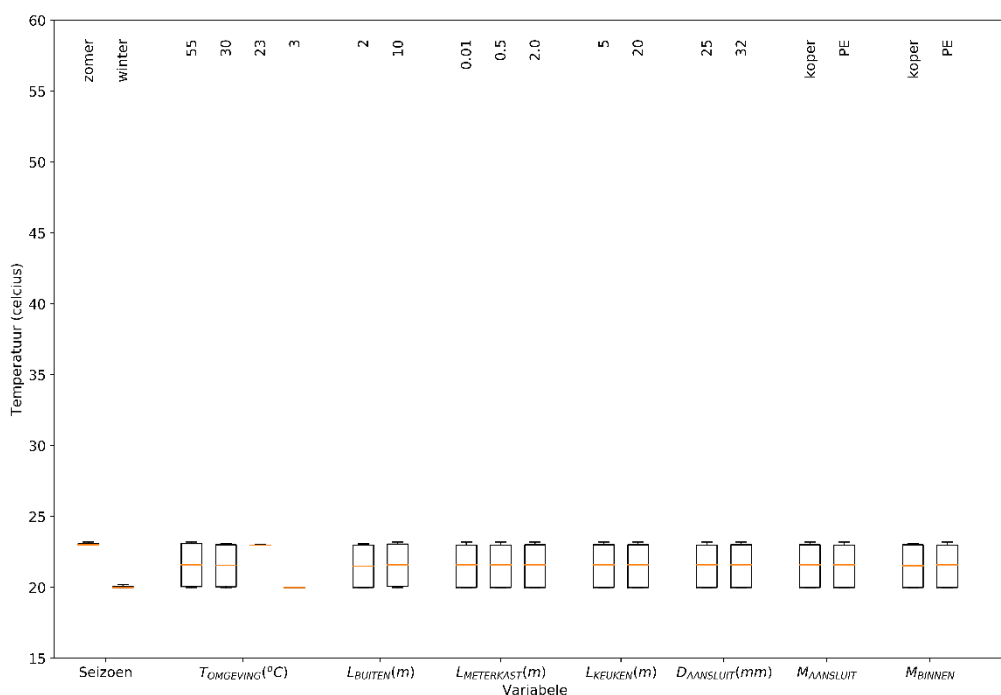


Figuur 3-9: De variatie in gemiddelde drinkwatertemperatuur bij de douche voor alle HTW-scenario's

3.5 Drinkwatertemperatuur aan de badkamerkraan

Bij de badkamerkraan zijn de resultaten anders. De maximale temperatuur komt hier nauwelijks boven de 23 °C uit (zie Figuur 3-10). De verklaring hiervoor is dat het warme water uit de aansluitleiding en leiding in de meterkast het tappunt niet bereikt. Dit kan in het algemeen twee oorzaken hebben: 1) de taptijd van de badkamerkraan is te kort en het getapte volume water daardoor kleiner dan wat er in de leidingen vanaf de meterkast tot de badkamerkraan past. Deze leiding is in ons model (en in de meeste huizen) namelijk langer dan die naar de keuken, en bovendien zijn tappings aan de keukenkraan ook regelmatig langer dan aan de badkamerkraan. Mogelijkheid 2) is dat iedere keer wanneer de badkamerkraan wordt opgezet zojuist een tappunt (ergens in de buurt) open was waardoor er geen opgewarmd water meer in de aansluitleiding en meterkastleiding zit. Een snelle analyse van de data laat zien dat dit voor onze berekeningen niet het geval is. Het getapte volume van de badkamerkraan is dus altijd kleiner dan er in de leidingen van meterkast tot kraan past. Voor het specifieke scenario dat is doorgerekend geldt verklaring 1; het maximale volume dat aan de badkamerkraan is getapt is 0,3 liter, en dat is de inhoud van 1 meter leiding met een diameter van 20 mm.

De resultaten van de badkamerkraan illustreren dat de taptijd alsmede de tappatronen van andere tappunten ook belangrijke factoren zijn in de temperaturen die optreden bij het tappunt.



Figuur 3-10: De variatie in maximale drinkwatertemperaturen voor alle scenario's bij de badkamerkraan.

3.6 Samenvatting van de resultaten

In Tabel 3-1 zijn de resultaten voor de keukenkraan samengevat. Alle waarden betreffen de vergelijking tussen de medianen. Dit geeft aan welke mate van invloed de verschillende parameters hebben. Ook zijn de waarden van de medianen weergegeven.

3.6.1 Type warmtenet

Het type warmtenet heeft verreweg de grootste invloed op de maximale drinkwatertemperatuur bij de verschillende tappunten. Opwarming van het drinkwater gaat snel en het type warmtenet bepaalt tot welke temperatuur het drinkwater opwarmt en heeft daarom grote invloed op de maximale drinkwatertemperatuur. Omdat de maximale temperatuur als gevolg van het warmtenet naast de aansluitleiding en in de meterkast slechts van korte duur is (het volume van de aansluitleiding en de leiding in de meterkast is beperkt) wordt de gemiddelde drinkwatertemperatuur slechts beperkt beïnvloed. Voor de minimale drinkwatertemperatuur is er alleen vergeleken met geen warmtenet (of een bronnet) in de winter een groot verschil. In de zomer zijn de verschillen minimaal.

3.6.2 Seizoen

Voor de gemiddelde en de minimale optredende drinkwatertemperatuur heeft naast de aanwezigheid of het type warmtenet het seizoen een grote invloed. Dit heeft twee oorzaken. Ten eerste is er een klein verschil in kamertemperatuur tussen de zomer en de winter, maar belangrijker is de drinkwatertemperatuur in de distributieleiding (T_{DWIN}). Bij doorstroming van een tappunt gaat het water snel door de aansluitleiding en de meterkast (waar de eventueel opwarming plaatsvindt), waardoor het water in ieder geval niet geheel opwarmt en daarom de initiële temperatuur van het drinkwater van groter belang is.

Maximale temperaturen aan de tappunten worden duidelijk bepaald door de temperatuur in de aansluitleiding of meterkast welke wordt bepaald door het type warmtenet en enkel bij het ontbreken van zo'n net is het seizoen een belangrijke factor.

3.6.3 Type materiaal van de drinkwaterinstallatie

Voor de maximale drinkwatertemperatuur bij het tappunt is het leidingmateriaal van de drinkwaterinstallatie van belang. Het verschil in maximale drinkwatertemperatuur tussen koper en PE is ongeveer 3 °C. Koper isoleert minder dan PE en dit betekent dus dat het warme water van de aansluitleiding tijdens het transport door de drinkwaterinstallatie in koperen leidingen sneller afkoelt dan in PE leidingen. Voor de gemiddelde en minimale drinkwatertemperatuur is dit effect veel kleiner, omdat deze temperaturen veel dichterbij de omgevingstemperatuur liggen, daardoor zijn eventuele afkoeling of opwarming een veel kleinere factor. Het effect (zoals bij de gemiddelde drinkwatertemperatuur bij de douche) kan ook andersom zijn. Hier zorgt PE ervoor dat het water onder invloed van de woningtemperatuur minder opwarmt dan in geval van koperen leidingen.

3.6.4 Lengte aansluitleiding

De lengte van de aansluitleiding heeft invloed op de gemiddelde en de minimale drinkwatertemperatuur. De lengte van de aansluitleiding bepaalt het volume opgewarmd drinkwater dat de drinkwaterinstallatie instroomt; dat heeft invloed op de gemiddelde drinkwatertemperatuur. Voor de minimale drinkwatertemperatuur is de lengte van de aansluitleiding ook van belang omdat in een langere aansluitleiding het drinkwater iets meer opwarmt (tijdens stroming) dan in een kortere aansluitleiding.

3.6.5 Optredende drinkwatertemperaturen

De maximale drinkwatertemperatuur is voor het gemiddelde HTW boven de 50°C. In de aansluitleiding wordt de drinkwatertemperatuur voor beide type warmtenetten hoger dan 25°C.

De gemiddelde drinkwatertemperatuur aan de keukenkraan komt voor een HTW regelmatig boven de 25 °C (de mediaan ligt net hieronder) voor een LTW is er geen scenario waarbij het gemiddelde van de drinkwatertemperatuur aan de keukenkraan boven de 25 °C komt.

Tabel 3-1: Samenvatting van de verschillen in maximale, gemiddelde en minimale drinkwatertemperatuur die worden veroorzaakt door de verschillende variabelen (bij de keukenkraan). Cursief en tussen haakjes zijn voor de maximale drinkwatertemperatuur de uitersten weergegeven.

VARIABLE	VERSCHIL IN MAXIMALE DRINKWATERTEMPERATUUR (KEUKENKRAAN)	VERSCHIL IN GEMIDDELDE DRINKWATERTEMPERATUUR (KEUKENKRAAN)	VERSCHIL IN MINIMALE DRINKWATERTEMPERATUUR (KEUKENKRAAN)
Type warmtenet	~25-35 °C (~28-54 °C)	~3-5 °C	~15 °C (in de winter)
Seizoen	~0,5-1 °C (~50,5-54 °C) (HTW) ~0,25 °C (~29-29,5 °C) (LWT)	~3 °C (HTW) ~3 °C (LWT)	~5°C (HTW) ~7°C (LWT)
L _{BUITEN}	Verwaarloosbaar (~50,5-54 °C) (HTW) Verwaarloosbaar (~29-29,5 °C) (LWT)	~2 °C (HTW) ~1 °C (LWT)	~3°C (HTW) ~3°C (LWT)
M _{BINNEN}	~3°C (~50,5-54 °C) (HTW) ~0,5°C (~29-29,5 °C) (LWT)	~0,5 °C (HTW) Verwaarloosbaar (LWT)	~1 °C (HTW) ~1 °C (LWT)

4 Discussie

4.1 Factoren die gemiddelde en maximale temperatuur aan de tap beïnvloeden

De verschillende scenario's geven gezamenlijk inzicht in de invloed van de verschillende onderdelen van de aansluitleiding tot de tap op de minimale, gemiddelde en maximale temperatuur. Met name het HTW scenario (door de keuze voor hele hoge temperaturen) geeft inzicht in het effect van opgewarmd drinkwater in aansluitleiding en meterkast, ten opzichte van de drinkwatertemperatuur in de rest van de drinkwaterinstallatie onder invloed van de luchttemperatuur in de woning; en ten opzichte van het minder warme aangevoerde water uit de distributieleiding.

De gemiddelde temperatuur (bij een voldoende lange tapping) wordt met name bepaald door de temperatuur uit de hoofdleiding (T_{DWIN}) en vervolgens opwarming in de woning door te temperatuur van het huis (T_{HUIS}). In de winter wordt bijvoorbeeld vanuit de hoofdleiding water van 10 °C aangevoerd, is de temperatuur in de aansluitleiding 3 °C (zonder warmtenet) en is de temperatuur in de woning 20 °C. De minimale temperatuur aan de kraan is dan 3 °C, en gemiddeld rond de 18 °C. In de zomer wordt vanuit de hoofdleiding water van 20 °C aangevoerd, is de temperatuur in de aansluitleiding 23 °C (zonder warmtenet) en is de temperatuur in de woning 23 °C. De minimale temperatuur aan de kraan is dan 20 °C, en gemiddeld rond de 23 °C. De gemiddelde temperatuur wordt maar beperkt door het warmtenet beïnvloed; alleen bij een lange aansluitleiding vindt er een beperkte opwarming plaats tijdens de tapping.

In geval van een warmtenet wordt de maximale temperatuur sterk bepaald door de drinkwatertemperatuur in de aansluitleiding en in de meterkast. Wanneer de drinkwaterinstallatie uit koperen leidingen bestaat is er tussen meterkast en keukenkraan een paar graden afkoeling, met een PE leiding is er nauwelijks afkoeling; en is de maximale temperatuur dus gelijk aan de omgevingstemperatuur van aansluitleiding of meterkast. De maximale drinkwatertemperatuur is sterk afhankelijk van $T_{OMGEVING}$. De opwarming in de aansluitleiding is namelijk een snel proces. In slechts 20 minuten is het water in zijn geheel opgewarmd tot $T_{OMGEVING}$.

In geval er een warmtenet ligt is zowel bij de gemodelleerde scenario's HTW als LTW voor de maximale drinkwatertemperatuur het materiaal van de drinkwaterinstallatie de belangrijkste variabele (PE of koper) en voor de gemiddelde en minimale drinkwatertemperatuur het seizoen en lengte van de aansluitleiding.

Tijdens tappen is de verblijftijd in de aansluitleiding (bepaald door het volume, dus lengte en diameter) meestal zodanig kort dat er slechts een beperkte opwarming plaatsheeft. Bij een grotere lengte van de aansluitleiding kan wel opwarming tijdens tappen een rol spelen. Dat betekent dat de temperatuur die na doorstroming aan de keukenkraan gemeten wordt vooral bepaald wordt door de temperatuur van het drinkwater uit de distributieleiding. Daarmee wordt de invloed van een eventueel warmtenet dus nooit gemeten tijdens reguliere monsternamen.

4.2 De hoeveelheid water die wordt beïnvloed door het warmtenet

Op basis van de bevindingen met het model kan worden ingeschat hoeveel water opwarmt onder invloed van een warmtenet langs de aansluitleiding. Er wordt onderscheid gemaakt tussen opwarming tijdens tapping, en opwarming tijdens stilstand (voor de tapping).

- Tijdens stilstand: in de aansluitleiding warmt het water in ca. 20 minuten tijd volledig op (van de aanvoertemperatuur of dat nu 5 of 20 graden is tot de eindtemperatuur die gelijk is aan de bodemtemperatuur, bijv. 30 graden), de verblijftijd is enkele uren

- Tijdens tapping: de opwarming is ongeveer gelijk aan die tijdens stilstand (mogelijk ietsje sneller), maar de verblijftijd is veel korter. Een 5 meter leiding van $\varnothing 25$ mm heeft een inhoud van 4 liter. Tijdens een douche die ca. 8 liter per minuut trekt betekent dat een verblijftijd van 30 seconden. In die 30 seconden is er wel wat opwarming, maar zeer beperkt. In de drinkwaterinstallatie is sprake van een kleinere diameter, en mogelijk een wat grotere leidinginhoud tussen watermeter en douchetappunt, en voor het koude water is er sprake van ongeveer 4 liter per minuut. In de drinkwaterinstallatie is daardoor sprake van een grotere invloed op de temperatuur aan de tap dan in de aansluitleiding.

Dus zodra de kraan opengaat krijg je

- 1 Eerst het water uit de drinkwaterinstallatie (DWI); de inhoud van de DWI hangt af van de afstand tussen meterkast en tappunt, en de diameter van de leiding, maar is bijv. 2 liter.
- 2 Dan het water uit de meterkast (MK) een aansluitleiding (AL); de inhoud van de AL + MK is ca. 4 liter.
- 3 En daarna het water uit de distributieleiding (DL), dat beperkt opwarmt in de MK en AL, en enigszins opwarmt in de DWI.

Afhankelijk van de duur/volume van de tapping krijg je aan de kraan alleen 1, 1 en 2, of alle 3. Dat vertaalt zich als volgt:

- A) Bij een tapping van minder dan 2 liter (bijv. aan de keukenkraan of badkamerkraan, komt alleen het water uit de DWI uit het tappunt. De temperatuur van dit water is gelijk aan de luchttemperatuur in de woning. Het warme water uit MK en AL wordt wel de DWI ingetrokken, en heeft de tijd om daar af te koelen tot de volgende tapping. Het water in de MK en AL wordt ververst, en heeft de tijd om op te warmen (in geval van warmtenetscenario) tot de volgende tapping. Dit betekent dat na iedere tapping dezelfde hoeveelheid water (0-2 liter) als dat wordt getapt ook weer opwarmt in MK en AL. In een vierpersoonshuishouden zijn er ca. 25 van dit soort tappingen per dag. Dat komt neer op 25 tappingen van gemiddeld 1 liter, ofwel 25 liter totaal.
- B) Bij een tapping tussen 2 en 6 liter (toiletspoelingen, inname door vaatwasser, en afwas bijv. aan de keukenkraan) komt eerst het water uit de DWI en daarna dat uit de MK en AL uit het tappunt. De maximale temperatuur wordt bepaald door het water uit MK en AL (in geval van warmtenet), en de gemiddelde temperatuur is ongeveer gelijk aan het gemiddelde van de watertemperatuur uit MK en AL uit de DWI. Het water in de MK en AL wordt ververst, en heeft de tijd om op te warmen (in geval van warmtenetscenario) tot de volgende tapping. Dit betekent dat na iedere tapping dezelfde hoeveelheid water als dat wordt getapt tot maximaal 4 liter (dus 2-4 liter) ook weer opwarmt in MK en AL. In een vierpersoonshuishouden zijn er ca. 25 van dit soort tappingen per dag. Dat komt neer op 25 tappingen van gemiddeld 4 liter, ofwel 100 liter totaal, waarvan dan 25 maal 3,5 liter gemiddeld wordt opgewarmd.
- C) Bij een tapping van meer dan 6 liter (douche en bad, ca. 50 tot 150 liter per keer) komt eerst het water uit de DWI, vervolgens dat uit de MK en AL uit het tappunt, en vervolgens het grootste deel uit het distributienet. De maximale temperatuur wordt bepaald door het water uit MK en AL (in geval van warmtenet), en de gemiddelde temperatuur vooral door de drinkwatertemperatuur in het distributienet. Het water uit het distributienet zal tijdens deze tapping beperkt opwarmen in MK en AL of DWI. Het water in de MK en AL wordt ververst, en heeft de tijd om op te warmen (in geval van warmtenetscenario) tot de volgende tapping. Dit betekent dat na iedere tapping 4 liter water weer opwarmt in MK en AL. In een vierpersoonshuishouden zijn er 3 à 4 van dit soort tappingen per dag. Dat komt neer op 4 tappingen van gemiddeld 100 liter, ofwel 400 liter totaal, waarvan dan 4 maal 4 liter wordt opgewarmd.

In totaal wordt er $25 * 1$ liter + $25 * 4$ liter + $4 * 100$ liter, dus 525 liter getapt. Wanneer elke tapping ten minste 20 minuten van elkaar zit zal $25 * 1$ liter + $25 * 3,5$ liter + $4 * 4$ liter, oftewel ca. 129 liter worden opgewarmd. De hoeveelheid warm water dat uit de kraan stroomt is ca. $25 * 0$ liter + $25 * (4-2)$ liter + $4 * 4$ liter, dus 56 liter, waarbij verondersteld wordt dat de hoeveelheid warm water in geval A in de DWI weer afkoelt. Dat betekent dat ca. 25% van het totale waterverbruik opwarmt in MK en AL, en ca. 10% van het totale waterverbruik met een hoge temperatuur uit de kraan stroomt.

Sommige van deze tappingen zijn echter in werkelijkheid kort na elkaar of zelfs tegelijkertijd, wat zou kunnen betekenen dat bijv. 15% van het water wordt opgewarmd. De gelijktijdigheidsfactor is kleiner in eenpersoonshuishoudens, daar zal het percentage van het totale waterverbruik dat wordt opgewarmd wel 25% zijn. De 10% die berekend is als percentage van het waterverbruik dat met een hoge temperatuur uit de kraan stroomt, is inclusief het water dat met een hogere temperatuur bij de warmtapwaterbereider aankomt of bij de wasmachine of vaatwasser die het water verder opwarmen.

4.3 Beperkingen van het model

Hoewel er veel verschillende scenario's zijn doorgerekend, was het toch een beperking. Hieronder wordt beschreven wat het mogelijke effect van de beperking is, en wat verder onderzoek zou kunnen toevoegen.

Geen onderscheid tussen invloed meterkast en aansluitleiding: Omdat de omgevingstemperaturen van aansluitleiding en de leiding in de meterkast in de meeste scenario's gelijk zijn gehouden ($T_{\text{OMGEVING}} = T_{\text{METERKAST}}$), is de invloed van beide leidingen ten opzichte van elkaar niet expliciet bepaald; alleen in de winter is te zien dat de minimale temperatuur van 3 °C overeenkomt met de temperatuur uit de aansluitleiding. Voor het scenario zonder warmtenet is bovendien ook de temperatuur in huis gelijk aan de temperatuur in de meterkast ($T_{\text{HUIS}} = T_{\text{METERKAST}}$), waardoor de gemiddelde temperatuur aan de keukenkraan in de zomer 23 °C is met heel weinig variatie. In een vervolgstudie zou de invloed van de verschillende temperaturen ten opzichte van elkaar meer expliciet kunnen worden onderzocht.

De temperaturen rond aansluitleidingen en in de meterkast zijn niet goed bekend: Zowel de maximale als gemiddelde drinkwatertemperatuur worden beïnvloed door de temperatuur van de aansluitleiding en in de meterkast. De maximale drinkwatertemperatuur bij de tap duurt maar kort, maar wanneer deze temperatuur heel hoog is kan er zelfs een risico op verbranding optreden of er kan een schrikreactie bij een temperatuur die hoger is dan verwacht optreden wat in de douche tot ongelukken kan leiden. Het doorgerekende HTW-scenario voor een ~25°C hogere maximale drinkwatertemperatuur bij de keukenkraan in de zomer (vergeleken met geen warmtenet) en zelfs een ~30°C hogere maximale drinkwatertemperatuur in de winter. Voor het LTW-scenario is dit respectievelijk ~5°C en ~10°C. Voor de gemiddelde drinkwatertemperatuur zijn de absolute verschillen in de orde van ~2-7°C. Voor de doorgerekende scenario's met warmtenetten (zowel HTW als LTW) komt de temperatuur van het drinkwater in de aansluitleiding boven de 25°C uit. Deze temperaturen brengen een microbiologisch risico met zich mee.

We bevelen dan ook aan om meer onderzoek te doen naar de daadwerkelijk optredende temperaturen. Daarbij kunnen we de volgende overwegingen meegeven:

- De bodemtemperatuur rond aansluitleidingen is niet zo eenvoudig te meten; eenvoudiger is het om de drinkwatertemperatuur te meten. Na voldoende lange tijd stilstand (na ca. 20 min) is de drinkwatertemperatuur gelijk aan de bodemtemperatuur. De temperatuur van het water in de aansluitleiding kan worden gemeten door de temperatuur in de watermeter te meten. Daarbij moet goed worden gedocumenteerd of de meting plaatsvindt tijdens doorstroming en hoe lang het water in de aansluitleiding heeft stilgestaan sinds de laatste tapping.
- De temperatuur in de meterkast wordt bepaald door de elementen in de meterkast en de ventilatie, en wordt beïnvloed door ontwerp en daadwerkelijk gebruik wanneer de meterkast ook als kast voor schoenen of tassen e.d. wordt gebruikt. Dit betekent dat idealiter in de praktijk gemeten wordt.

De HTW- en LTW-scenario's zijn beperkt realistisch: In dit onderzoek is het HTW-scenario vooral geschikt om een duidelijk onderscheid te kunnen maken uit welk leidingdeel welk waterpakketje afkomstig is en waar opwarming plaatsvindt. Het LTW-scenario lijkt meer op de daadwerkelijke temperaturen die optreden wanneer een DN50

warmteleiding van 70 °C op ca. 25 cm afstand van een drinkwateraansluitleiding ligt. Berekeningen voor warmtenetten die met 40 °C (een lagetemperatuurwarmtenet) of 15 °C (een bronnet) warmte leveren zijn niet gedaan. Hierbij is belangrijk om te weten welke diameters voor de warmtenetten worden toegepast zodat een berekening kan worden gedaan voor de bodemtemperatuur (zoals in bijlage II is gedaan), of met behulp van metingen kan worden bepaald welke invloed er op de bodemtemperatuur of meterkast is. De aanbeveling bij het hiervoor genoemde punt om meer inzicht in werkelijke temperaturen te krijgen zou dus ook expliciet voor hoge- en lagetemperatuurwarmtenetten en voor bronnet moeten gelden.

De verschillende temperaturen zijn in werkelijkheid niet volledig onafhankelijk: De drinkwatertemperatuur vanuit het distributienet (T_{DWIN}) wordt grotendeels bepaald door de bodemtemperatuur op 1 meter diepte, en deze bodemtemperatuur wordt bepaald door bodemsoort, weer, bodembedekking en boven- en ondergrondse antropogene bronnen. De bodemtemperatuur rond de aansluitleiding wordt door dezelfde factoren beïnvloed, en beide temperaturen zijn dus niet volledig onafhankelijk van elkaar. De aansluitleiding ligt meestal minder diep dan de distributieleiding (verschil tussen 75 cm en 100 cm diepte is in zand onder tegels in de zomer bijv. 2-3 °C), en ligt potentieel dichter bij de warmteleiding (dat kan ook nog enkele graden schelen). Daarmee kan de drinkwatertemperatuur nog net enkele graden extra opwarmen in het laatste stukje tot de tap. In het model zou dan bijv. $T_{OMGEVING}$ gelijk kunnen worden genomen aan $T_{DWIN} + 5$ °C.

Er is slechts één verbruikspatroon toegepast: Deze studie geeft weer wat de maximale drinkwatertemperatuur bij de verschillende tappunten is in deze drinkwaterinstallatie met dit verbruikerspatroon. Om de kans op deze temperaturen te berekenen zouden er meerdere verbruikerspatronen moeten worden doorgerekend.

Totale warmtebalans is niet meegenomen: De warmwaterleidingen in de woning hebben ook invloed op de temperatuur van de woning, dat is hier niet expliciet meegenomen, maar zou nog bekeken kunnen worden. Wanneer in de winter de drinkwatertemperatuur verhoogd als gevolg van een warmtenet kan de warmte-uitwisseling via de drinkwaterinstallatie bijdragen aan een lager energieverbruik voor ruimteverwarming. Drinkwatertemperatuur als factor op de warmterekening of CO₂-voetafdruk kan expliciet worden gemaakt. In dat geval is de interactie tussen ruimteverwarming en drinkwatertemperatuur belangrijk om mee te nemen.

4.4 Mogelijkheden om de drinkwatertemperatuur te beperken

Op basis van de modelberekeningen en eerder onderzoek kunnen we bepalen hoe men kan zorgen dat de temperatuur aan de tap niet te hoog wordt. We geven aanbevelingen op basis van het begrip van de invloed van de verschillende aspecten.

Om hoge drinkwatertemperaturen bij de tappunten te voorkomen is het van belang om $T_{OMGEVING}$ en $T_{METERKAST}$ laag te houden. Dus zowel in huis als net buiten het huis moeten de warmtenet(aansluit)leidingen en de drinkwater(aansluit)leidingen zover mogelijk uit elkaar worden gehouden.

De hoogste temperatuur als gevolg van een warmtenet wordt in de drinkwateraansluitleiding bepaald door de temperatuur van het warmtenet en de afstand tussen drinkwaterleiding en warmtenet; in de meterkast wordt deze met name bepaald door de ventilatie. Dit betekent dat de maximale drinkwatertemperatuur beperkt kan worden door te kiezen voor een lagere temperatuur van het warmtenet of in de bodem voldoende afstand te houden tussen warmteleidingen en drinkwaterleiding; en in de meterkast te zorgen voor voldoende ventilatie en beperking van de warmtebronnen. Welke temperatuur, welke afstand en hoeveel ventilatie afdoende is, zou nog verder onderzocht moeten worden.

Wij denken dat het niet kansrijk is om met behulp van isolatie rond de drinkwaterleiding de opwarming in de aansluitleiding voldoende te vertragen, omdat het regelmatig voorkomt dat drinkwater in de aansluitleiding enkele

uren stil staat, bijvoorbeeld tijdens de nacht. De opwarming zonder isolatie vindt plaats in ongeveer 20 minuten, isolatie kan dit mogelijk vertragen tot 1 à 2 uur.

Naar aanleiding van deze studie raden wij het af om de warmteleiding op dezelfde plek het huis binnen te laten komen als de drinkwaterleiding. Daarmee wordt ervoor gezorgd dat de aansluitleidingen voldoende ver uit elkaar liggen, en de meterkast niet wordt opgewarmd door de warmte-afleverset.

4.5 Microbiologische waterkwaliteit

De drinkwatertemperatuur beïnvloedt de microbiologische waterkwaliteit. Er is een verhoogd risico op *Legionella pneumophila* wanneer de temperatuur meer dan 7 dagen boven de 28 °C uitkomt (van der Wielen 2014). De bodemtemperatuur op 75 cm diepte, in zand onder tegels, en in de buurt (ca. 25 cm) van een warmteleiding ligt kan in de zomer gedurende enkele dagen (en als gevolg van klimaatverandering in de toekomst enkele weken) boven de 28 °C uitkomen. *Legionella* kan dus in de biofilm in aansluitleidingen groeien. De inhoud van de gemodelleerde aansluitleidingen (diameters van 25 en 32 mm, lengtes van 5 en 20 meter) varieert van 2,5 tot 16 liter. Deze inhoud wordt niet iedere keer dat een kraan open gaat volledig verversd. Een toiletspoeling met spoelonderbreking is 3 liter per keer, bij de keukenkraan wordt regelmatig minder dan 1 liter per keer getapt. Bovendien is er gedurende de nacht nauwelijks waterverbruik. Dat wil zeggen dat de contacttijd tussen het water en de biofilm regelmatig meer dan enkele uren is. Dit betekent echter nog niet dat er ook uitwisseling is tussen de waterfase en de biofilm, en dat *Legionella* uit de biofilm in het drinkwater komt.

De invloed van de drinkwatertemperatuur en lokale biofilm (in aansluitleiding en drinkwaterinstallatie) op de microbiologische betrouwbaarheid van het drinkwater is slechts beperkt in beeld gebracht. Hiernaar zou meer onderzoek moeten worden gedaan.

5 Conclusie en aanbevelingen

Uit de berekeningen blijkt dat het type warmtenet de grootste invloed heeft op de optredende temperaturen bij de verschillende tappunten. Een veel kleinere invloed hebben het seizoen, de lengte van de aansluitleiding en het gebruikte leidingmateriaal in de drinkwaterinstallatie. Opwarmtijden in de aansluitleiding (PE of koper) zijn kort. Stilstaand water is na ongeveer 20 minuten opgewarmd tot de omgevingstemperatuur. Tijdens watervraag is de verblijftijd in de aansluitleiding echter kort, zodat er nauwelijks een verandering van temperatuur optreedt.

Uit berekeningen blijkt dat de maximale temperaturen bij de verschillende tappunten allemaal bijna gelijk zijn aan de temperaturen van de directe omgeving van de aansluitleiding/leiding in de meterkast (luchttemperatuur). Er is niet precies bekend hoe hoog die temperaturen zijn; maar op basis van dit onderzoek wordt geschat dat op ca. 25 cm van een secundaire warmteleiding (DN50, 70 °C) de bodemtemperatuur op 75 cm diepte in zand onder tegels gedurende enkele dagen per jaar (in een warme zomer) boven de 28 °C is.

Dat betekent het volgende:

- 1 De berekeningen met het LTW-scenario geven een realistisch beeld van de verwachte temperaturen bij een hogetemperatuurwarmtenet. De maximale temperatuur aan de tap wordt daarmee hoger dan 25 °C, en het gemiddelde kan bij de keukenkraan ook boven de 25 °C uitkomen als de tapping niet zo lang duurt.
- 2 *Legionella* in de biofilm in aansluitleidingen kan groeien. Meer onderzoek is nodig om te bepalen welk risico dit met zich meebrengt.

Om te voorkomen dat er hoge maximale drinkwatertemperaturen optreden bij de verschillende tappunten is het belangrijk om de directe omgevingstemperatuur van de drinkwateraansluitleiding laag te houden. Dit kan enerzijds door de aansluitleidingen van het warmtenet en het drinkwater voldoende ver uit elkaar te leggen en anderzijds door te kiezen voor lagetemperatuurwarmtenetten. Ook dan is het raadzaam om de aansluitleidingen niet te dicht bij elkaar te leggen. De precieze invloed van de afstand tussen de twee aansluitleidingen zou nog verder moeten worden onderzocht.

6 Bibliografie

- Blokker, E. (2010). *Stochastic water demand modelling for a better understanding of hydraulics in water distribution networks*. Delft: Technical University Delft PhD thesis.
- Blokker, E. J. M. en Pieterse-Quirijns, E. J. (2012). "Scenariostudies voor beperken invloed klimaatveranderingen op temperatuur en kwaliteit drinkwater in het net." KWR 2012.017, KWR, Nieuwegein.
- Moerman, A. (2013, July 1). Drinking water temperature modeling in domestic systems. Delft, Netherlands: TU Delft, Master Thesis.
- van der Wielen, P.W. J. J. (2014). "Rol van drinkwater, biofilm en temperatuur op groei van opportunistische pathogenen." BTO 2014.217(s), KWR, Nieuwegein.
- van der Zwan, S., Blokker, M., Agudelo-Vera, C., & Nugroho, D. (2019). *The influence of subsurface heat sources on the drinking water temperature*. In Preparation.
- Zlatanovic, L., Moerman, A., van der Hoek, J., Vreeburg, J., & Blokker, E. (2017). Development and validation of a drinking water temperature model in domestic drinking water supply systems. *Urban Water Journal*, 1031-1037.

I EPANET-MSX input file (.msx)

```
[TITLE]
Temperature exchange with pipe wall Example

[OPTIONS]
AREA_UNITS M2 ;Surface concentration is mass/m2
RATE_UNITS SEC ;Reaction rates are temperature/s
SOLVER RK5 ;5-th order Runge-Kutta integrator
COMPILER NONE ;enabling Visual C++ compiler
TIMESTEP 10 ;300 sec (5 min) solution time step
RTOL 0.01 ;Relative concentration tolerance
ATOL 0.001 ;Absolute concentration tolerance

[SPECIES]
BULK T_water C ;Temperature in Celsius

[COEFFICIENTS]
PARAMETER T_wall 23.0 ;Temperature at wall / ground D-net
CONSTANT lambda_soil 1.2 ;Lambda value of soil
CONSTANT soil_th_fact 1.1 ;Soil isolation factor (diameter ratio)
PARAMETER lambda_pipe 401.0 ;lambda value of pipe
PARAMETER vv 1
PARAMETER LL 1
CONSTANT gg 9.81 ;m/s2 gravitational acceleration
CONSTANT rho_w 1000 ;kg/m3 water density
CONSTANT cp_w 4185 ;J/(kg.K) heat capacity of water
CONSTANT kv_a 0.000000002231 ;m2/s kinematic viscosity of air raised by power two
CONSTANT Pr_w 7.01 ;- Prandtl number for water
CONSTANT lambda_w 0.6 ;W/(m.K) thermal conductivity of water
CONSTANT lambda_a 0.0257 ;W/(m.K)thermal conductivity of air
CONSTANT beta_a 0.0034 ;1/K cubic expansion coefficient
CONSTANT minus -1 ;- help variable
CONSTANT Pr 7 ;Prandtl number, water at 20 C
CONSTANT alpha 1.36e-7 ;temperature diffusivity coefficient, water 20C
CONSTANT rhocp 4186000 ;heat capacity water * density water
CONSTANT lambda_water 0.6 ;temperature conduction coefficient of water
PARAMETER t -1 ;initial value for wall thickness: is corrected by values in [PARAMETERS] section
PARAMETER air 0 ;initial value of air (1 is air 0 is ground)

[TERMS]
Nu_grond STEP(10 - Re) * 5.8 + STEP(Re - 10) * STEP(2300 - Re) * 3.66 + STEP(Re - 2300) *
(0.023*Re^0.8*Pr^(0.3333))
D3_grond D2_grond * soil_th_fact ; anders voor meterkast
D2_grond D + 2*(t / 1000)
h_overall_g 1/(D/(Nu_grond*lambda_water) + D2_grond*log(D2_grond/D)/(2*lambda_pipe) +
D3_grond*log(D3_grond/D2_grond)/(2*lambda_soil)) ; anders voor meterkast
kk_grond 4*h_overall_g/(D3_grond*rhocp) ;constant in rate equation
Nu step(10 - Re)*5 + step(Re - 10)*step(2300 - Re)*10 + step(Re - 2300)*(0.023*Re^0.8*Pr_w^(0.3333))
;Table 3.6.3
h_1 Nu*lambda_w/D ;eq. 8.1
h_2 2*3.1415*lambda_pipe/(log(1.1*D/D)) ;pipe wall is assumed to be 10% of pipe diameter
Ra_a step(0.5 - vv)*(gg*beta_a*(T_wall - T_water)*D*D/kv_a) + step(vv - 0.5)*(gg*beta_a*(T_wall -
T_water)*LL*LL/kv_a) ;step function for calculation Rayleigh number for horizontal or vertical geometry (eq. 14)
Nu_a step(0 - Ra_a)*minus*0.59*Ra_a^(0.25) + step(Ra_a - 0)*0.59*Ra_a^(0.25)
;step function to avoid root of negative number in calculation Nusselt number for air (eq. 16)
h_3 Nu_a*lambda_a/D ;eq. 17
h_comb 1/(1/h_1 + 1/h_2 + 1/h_3) ;combined heat transfer coefficient (eq. 2.2)
kk 4*h_comb/(rho_w*cp_w*D)

[PARAMETERS]
PIPE 25 lambda_pipe 401
PIPE 25 T_wall 55
PIPE 33 T_wall 20
PIPE 1 T_wall 55
PIPE 1 LL 2.0
PIPE 1 air 1
PIPE 1 t 0.25
PIPE 2 LL 0.65
PIPE 2 air 1
PIPE 2 t 0.25
PIPE 3 LL 0.2
PIPE 3 air 1
PIPE 3 t 0.25
PIPE 4 vv 0
```

PIPE 4 air 1
PIPE 4 t 0.2
PIPE 5 vv 0
PIPE 5 air 1
PIPE 5 t 0.16
PIPE 6 vv 0
PIPE 6 air 1
PIPE 6 t 0.16
PIPE 7 LL 0.25
PIPE 7 air 1
PIPE 7 t 0.16
PIPE 8 vv 0
PIPE 8 air 1
PIPE 8 t 0.16
PIPE 9 LL 0.2
PIPE 9 air 1
PIPE 9 t 0.16
PIPE 10 vv 0
PIPE 10 air 1
PIPE 10 t 0.25
PIPE 11 vv 0
PIPE 11 air 1
PIPE 11 t 0.25
PIPE 12 LL 1.5175
PIPE 12 air 1
PIPE 12 t 0.25
PIPE 13 vv 0
PIPE 13 air 1
PIPE 13 t 0.25
PIPE 14 vv 0
PIPE 14 air 1
PIPE 14 t 0.16
PIPE 15 LL 0.2
PIPE 15 air 1
PIPE 15 t 0.16
PIPE 16 LL 0.5
PIPE 16 air 1
PIPE 16 t 0.16
PIPE 17 LL 0.35
PIPE 17 air 1
PIPE 17 t 0.2
PIPE 18 vv 0
PIPE 18 air 1
PIPE 18 t 0.2
PIPE 19 LL 1.44
PIPE 19 air 1
PIPE 19 t 0.2
PIPE 20 vv 0
PIPE 20 air 1
PIPE 20 t 0.2
PIPE 21 vv 0
PIPE 21 air 1
PIPE 21 t 0.2
PIPE 22 LL 0.2
PIPE 22 air 1
PIPE 22 t 0.2
PIPE 23 LL 0.75
PIPE 23 air 1
PIPE 23 t 0.25
PIPE 24 LL 0.35
PIPE 24 air 1
PIPE 24 t 0.25
PIPE 26 vv 0
PIPE 26 air 1
PIPE 26 t 0.16
PIPE 27 vv 0
PIPE 27 air 1
PIPE 27 t 0.25
PIPE 28 vv 0
PIPE 28 air 1
PIPE 28 t 0.25
PIPE 29 vv 0
PIPE 29 air 1
PIPE 29 t 0.16
PIPE 30 LL 0.1
PIPE 30 air 1
PIPE 30 t 0.16
PIPE 31 LL 0.3
PIPE 31 air 1
PIPE 31 t 0.16
PIPE 32 LL 1.25

```
PIPE 32 air 1
PIPE 32 t 0.2
PIPE 34 vv 0
PIPE 34 air 1
PIPE 34 t 0.2
PIPE 35 vv 0
PIPE 35 air 1
PIPE 35 t 0.2
PIPE 36 LL 0.25
PIPE 36 air 1
PIPE 36 t 0.16
PIPE 37 vv 0
PIPE 37 air 1
PIPE 37 t 0.16
PIPE 38 LL 0.45
PIPE 38 air 1
PIPE 38 t 0.16
PIPE 41 LL 1.0
PIPE 41 air 1
PIPE 41 t 0.25
PIPE 42 vv 0
PIPE 42 air 1
PIPE 42 t 0.25
PIPE 48 LL 1.43
PIPE 48 air 1
PIPE 48 t 0.25
PIPE 49 LL 1.58
PIPE 49 air 1
PIPE 49 t 0.25
PIPE 50 vv 0
PIPE 50 air 1
PIPE 50 t 0.16
PIPE 51 LL 0.2
PIPE 51 air 1
PIPE 51 t 0.25
PIPE 52 LL 1.5
PIPE 52 air 1
PIPE 52 t 0.25
PIPE 53 LL 0.5
PIPE 53 air 1
PIPE 53 t 0.25
PIPE 54 LL 0.2
PIPE 54 air 1
PIPE 54 t 0.25
PIPE 25 vv 0
PIPE 25 t 0.25
PIPE 33 vv 0
PIPE 33 t 0.32
```

[PIPES]

:Temperature of water

RATE T_water air*kk*(T_wall - T_water)+(1 - air)*kk_grond*(T_wall - T_water)

[TANKS]

[SOURCES]

:Initial conditions (= 0 if not specified here)

SETPOINT 17 T_water 20

[QUALITY]

:Initial conditions (= 0 if not specified here)

GLOBAL T_water 20

NODE 17 T_water 20

[PATTERNS]

[REPORT]

NODES ALL

SPECIES T_water YES

II Modelling bodemtemperatuur rond warmteleiding

MEMO d.d. 30 maart 2020, dr. J. van Summeren

Er is onderzocht in welke mate een droge zandbodem opwarmt rond een geïsoleerde warmteleiding. Hiertoe zijn 2D modelleerberekeningen uitgevoerd met het rekenpakket *HYDRUS 2D/3D*.

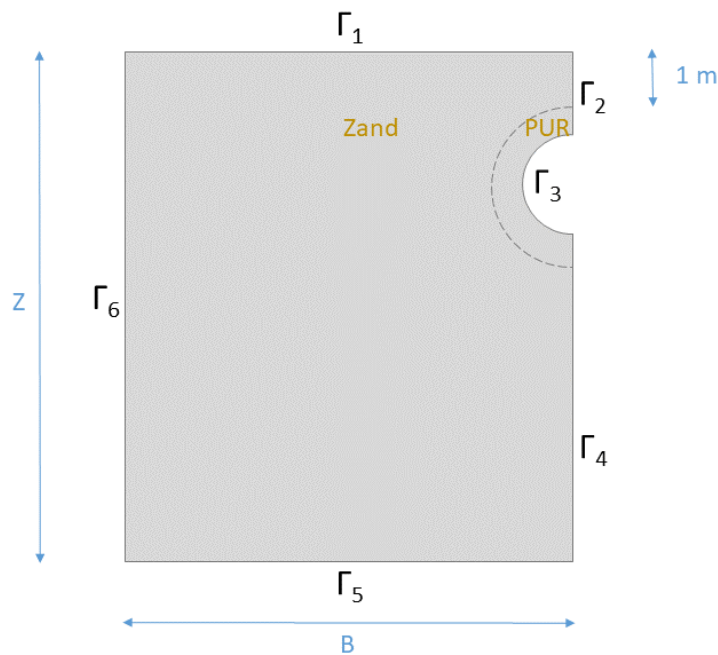
II.1 Aanpak: modeldomein, initiële voorwaarden en randvoorwaarden

Het warmtetransport van een geïsoleerde warmtenetleiding in een droge zandgrond tijdens een warme zomerperiode in de bodem is berekend met de numeriek eindige elementen methode. Hiervoor is gebruik gemaakt van het softwarepakket *HYDRUS 2D/3D* (Šimůnek, J. & Van Genuchten, M. T. (2008); Šimůnek e. a. (2018); Van Vossen e.a. (2019)).

Het gemodelleerde domein (Figuur II-1) is een 2-D bodemdoorsnede, loodrecht op de stroomrichting van een geïsoleerde warmtenetleiding (impliciet: een oneindig uitgestrekt domein in de stroomrichting.) De bovenkant van de warmteleiding bevindt zich 1 meter onder het oppervlak (1 meter dekking), in de rechterbovenhoek. Op de bovenrand (Γ_5) is een uniforme, in de tijd variërende temperatuur voorgeschreven. Vanwege de symmetrie van het probleem volstaat het om de helft van het domein te modelleren met een thermisch niet-doorlatende¹ verticale rand die de warmtenetleiding doorsnijdt (rand $\Gamma_{2,4}$). Op de warmtenetleiding (rand Γ_3) is een in de tijd constante temperatuur voorgeschreven. De verticale rand Γ_6 en de onderrand Γ_5 zijn thermisch niet-doorlatend. De invloed van deze randen op de uitkomsten wordt kleiner naarmate een groter modeldomein wordt gekozen. De aanbevolen waarden voor de breedte B en diepte Z van het domein zijn in een voorgaande modelleerstudie van Deltares en KWR bepaald als respectievelijk 24 en 46,5 maal de leidingdiameter (Van der Zwan e.a., 2019). Hoewel voor dezelfde B/Z verhouding is gekozen, is voor een ruimer domein van 13,5 m breed en 26 m diep gekozen om voldoende ruimte te accommoderen voor warmte-indringing vanaf het oppervlak.

Voor de bodem zijn de eigenschappen van het TMDz-type overgenomen uit (Van der Zwan e.a., 2019, Tabel II-), representatief voor een droge zandgrond met tegelbedekking in een gebied met gemiddelde graad van verstedelijking. Thermische eigenschappen van materialen zijn weergegeven in Tabel III-1. De eigenschappen van de warmtenetleiding zijn representatief voor een aanvoerleiding in het secundaire net: een DN50 leiding van staal (buitendiameter 60,3 mm), omhuld met een PUR-laag van 40 mm dikte en een PE-leiding met een leidingwand van 3 mm (Van der Zwan e.a., 2019). Er is een constante temperatuur van 70°C voorgeschreven op de rand (Γ_3). Het modelleren van een PE-leidingwand van 3 mm leidde tot te dicht op elkaar liggende knooppunten in het eindige elementen rooster in *HYDRUS*. Er is nagegaan dat de thermische weerstand van de isolatielaag (PUR + PE) bij conductief warmtetransport voor >99,5% wordt bepaald door het PUR-materiaal. De bijdrage van PE-leiding is verwaarloosbaar en is daarom buiten beschouwing gelaten in de berekeningen. Afkoeling van de warmtenetleiding is uitgesloten in het model; er is een oneindige warmtebron verondersteld. Dit benadert een praktijksituatie waarin de temperatuur min of meer constant is, vanwege een variërende doorstroomsnelheid afgestemd op de warmtevraag van consumenten.

¹ Een thermisch niet-doorlatende rand betekent dat de temperatuurafgeleide loodrecht op de rand gelijk is aan nul. Warmteuitwisseling over de rand is daardoor niet mogelijk en het temperatuurveld is spiegelsymmetrisch in de rand.



Figuur II-1 Geschematiseerd modeldomein (niet op schaal).

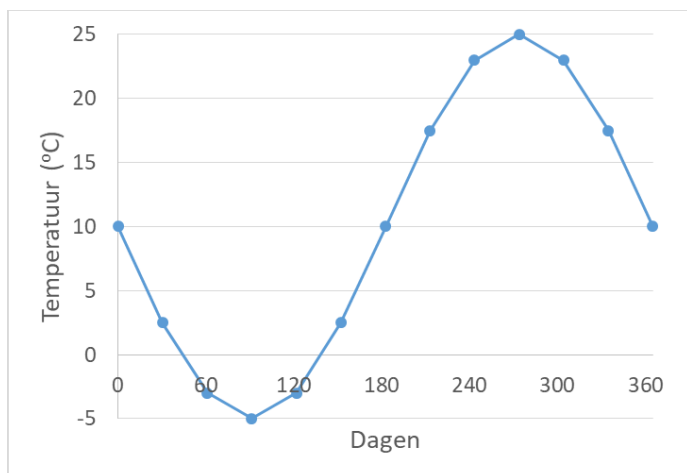
Tabel II-1. Thermische materiaaleigenschappen.

	C_p ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$) Warmtecapaciteit	λ ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$) Thermische conductiviteit	ρ ($kg\ m^{-3}$) Massadichtheid
Zand (droog)	800	1,4	1650
PUR	1470	0,024	90
PE	1880	0,47	950

Om de warmteontwikkeling te onderzoeken in de eerste jaren na aanleg, is een modelleerperiode van 3 jaar gebruikt. De modeltijd start op 1 september. De temperatuur aan het oppervlak varieert volgt een seizoencyclus:

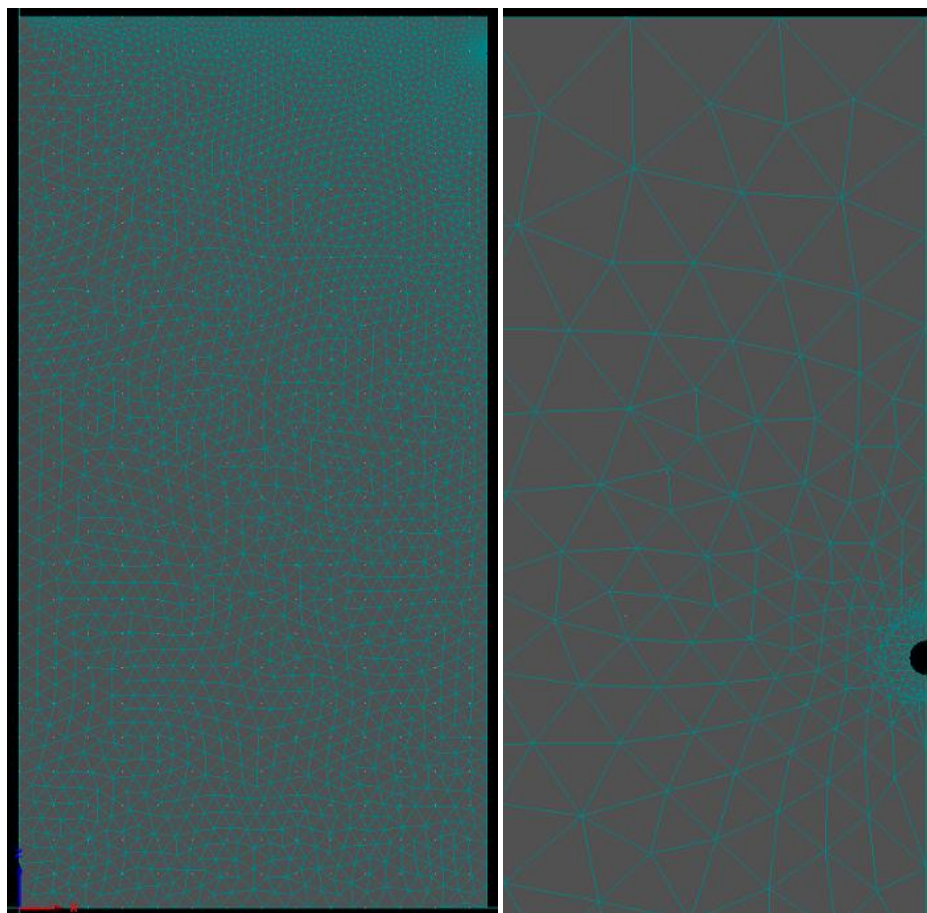
$$T(t) = T_0 - T_s \cos\left(\frac{2\pi t}{365}\right)$$

Met $T_0 = 10\ ^\circ C$, $T_s = 15\ ^\circ C$ en de tijd t in dagen. Dit resulteert in maximale oppervlaktetemperaturen van $25\ ^\circ C$ in juli (Figuur II- 2). De initiële conditie is gelijk gesteld aan $T_0 = 10\ ^\circ C$. Dit is een redelijke benadering voor West-Europa waar op een diepte van 25 meter een gelijkblijvende temperatuur van $9\ ^\circ C$ heerst, die niet meer wordt beïnvloed door de temperatuurschommelingen van jaargetijden (Wikipedia, 2020). Het oppervlak kan in het model oneindig veel warmte opnemen, zonder van temperatuur te veranderen. Dit komt overeen met een situatie waarin warmte uit de ondergrond instantaan wordt afgevoerd, bijvoorbeeld door luchtstroming.



Figuur II- 2 Gemiddelde dagtemperatuur toegekend aan de oppervlakte. Dagen vanaf 1 januari.

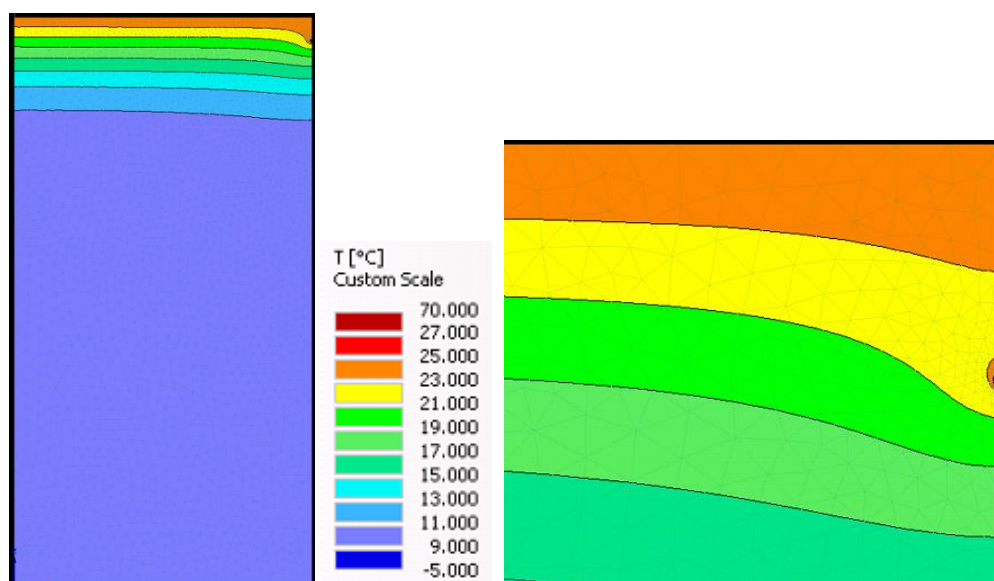
Het numerieke rooster (Figuur II- 3) bevat 5388 elementen; de gemiddelde elementgrootte is $0,065 \text{ m}^2$, vergelijkbaar met de gemiddelde elementgrootte van $0,067 \text{ m}^2$ aanbevolen op basis van een numerieke gevoeligheidsanalyse (Van der Zwan, e.a., 2019). Er is roosterverfijning toegepast nabij de warmtenetleiding waar de grootste temperatuurveranderingen zijn te verwachten (Figuur II- 3b).



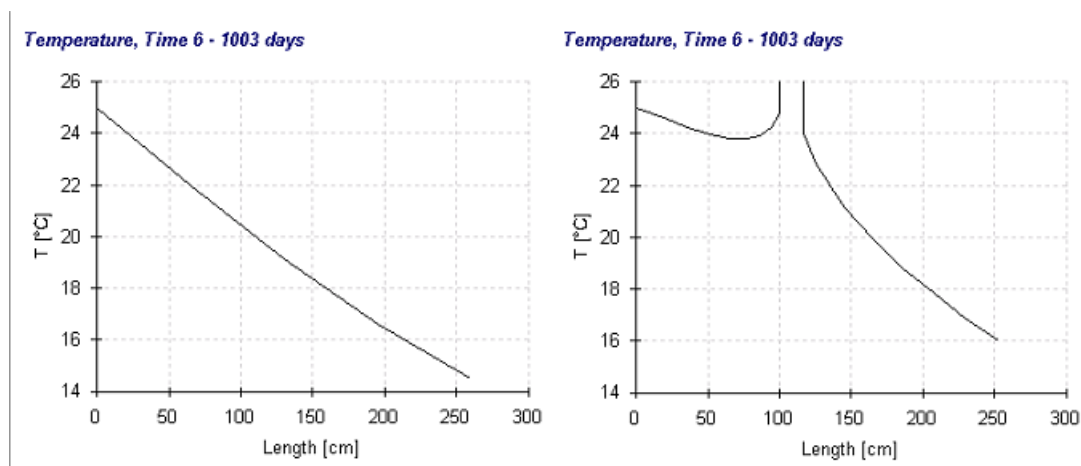
Figuur II- 3 (links) Eindige elementen rooster; (rechts) idem, ingezoomd op de warmtenetleiding in de linker bovenhoek.

II.II Resultaten

De analyse richt zich op de warmste maand, juli, in het derde jaar (dag 1003, oppervlaktetemperatuur 25 °C), omdat deze periode de grootste kans op overschrijdingen geeft. Figuur II- 4 en Figuur II- 5 tonen hoe het temperatuurverloop met de diepte wordt verstoord door de warmtenetleiding. Ten opzichte van de onverstoorde situatie (op de linkerrand 13,5 meter van de leiding) neemt, direct boven de leiding, de temperatuur in de eerste 50 cm af met ca. 0,5 °C, in plaats van met ruim 1 °C (Figuur II- 5). Op 2 m diepte is de temperatuur ruim 1,5 °C hoger, ten gevolge van de warmteleiding. In koelere perioden zijn vergelijkbare verstoringen van het temperatuurverloop berekend, maar zijn de absolute temperaturen en daarmee het risico op (te) hoge temperaturen minder hoog (niet getoond).



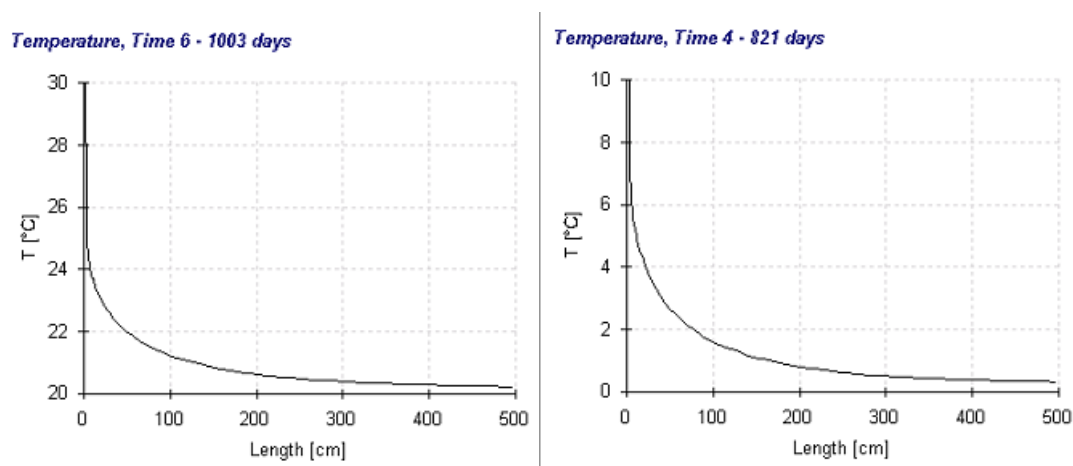
Figuur II- 4 Temperatuur in juli van jaar 3 (dag 1003 na start van het model). (Links) het gehele model domein; (midden) uitsnede rechterbovenhoek (2 m x 2m).



Figuur II- 5 Verticale profielen van de temperatuur in juli (na ongeveer 2,5 jaar, dag 1003) op de linker en rechter modelrand (linker en rechter figuur, respectievelijk).

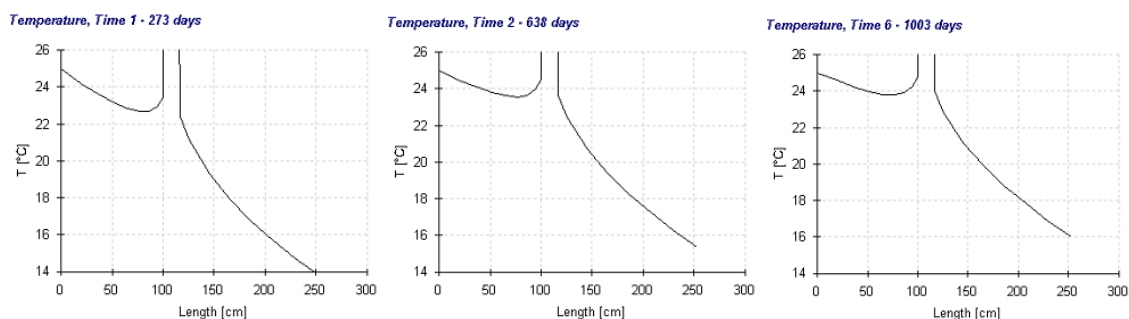
Om het temperatuurverloop in horizontale richting inzichtelijk te maken zijn horizontale profielen op 1,07 m diepte berekend (d.w.z. door de middellijn van de leiding). De temperatuuroename ten opzichte van de achtergrond is

1,3 °C op 1 meter afstand en 0,7 °C op 2 meter afstand van de leiding (Figuur II- 6a). In een koudere omgeving heeft de warmtenetleiding een groter effect, maar zijn de absolute temperaturen minder kritiek (Figuur II- 6b).



Figuur II- 6 Horizontaal profiel op 1,07 meter diepte van de temperatuur voor de maanden juli (links, dag 1003) en januari (rechts, dag 821). De afstand tot de warmtenetleiding neemt toe met de lengte ("Length").

Om het lange-termijn-effect van de aanwezigheid van een warmtenetleiding te onderzoeken zijn diepteprofielen van de temperatuur vergeleken op 1 juli in jaar 1 (dag 273), jaar 2 (dag 638) en jaar 3 (dag 1003, als hierboven). De minimumtemperatuur direct boven de leiding neemt toe van 22,8 °C naar 23,7 °C naar 23,9 °C over deze jaren. Hoewel de toename na 3 jaar sterk is afgevlakt, laten de resultaten zien de opwarming door de leiding een lange-termijn proces is.



Figuur II- 7 Verticale profielen van de temperatuur op de rechter zijrand in juli. Van boven naar onder is de temperatuur getoond voor jaar 1, (dag 273), jaar 2 (dag 638) en jaar 3 (dag 1003).

II.III Concluderende opmerkingen

Op basis van de modeleerresultaten wordt geconcludeerd dat de temperatuur van een droge zandbodem rond een geïsoleerd warmtenetleiding (70 °C, DN-50) circa 1°C opwarmt ten opzichte van de achtergrond op 1,5 meter afstand tijdens een warme zomer, 3 jaar na aanleg. Deze uitkomst is specifiek voor de gemodelleerde eigenschappen van de bodem, de warmtenetleiding en het versimpelde weermodel. Door de aanwezigheid van een permanente warmtebron is een afvlakkend opstapeleffect zichtbaar: de minimumtemperatuur direct boven de leiding op 1 juli neemt toe van 22,8 °C naar 23,7 °C naar 23,9 °C in de drie gemodelleerde jaren.

Op basis van de simpele berekeningen zijn geen conclusies te trekken over opwarming van een drinkwaterleiding of risico's op overschrijding van een grenswaarde van de drinkwatertemperatuur. Voor toekomstig onderzoek zijn een aantal vervolgstappen nodig:

- Opnemen van een drinkwaterleiding in het model voor een beter inzicht in de warmte-uitwisseling tussen warme en koude leidingen;
- Voor het modelleren van specifieke situatie is meer gedetailleerde kennis nodig van bijvoorbeeld de oppervlaktebedekking en de bodemopbouw;
- Implementeren van een dag/nachtcyclus van de oppervlaktetemperatuur;
- Modelleren van warmte-uitwisseling met het oppervlak. Mogelijk kan niet alle bodemwarmte die het oppervlak bereikt instantaan worden opgenomen in de lucht. De invloed van opwarming van de lucht kan met HYDRUS worden gemodelleerd met een gemengde randvoorwaarde, waarbij de warmteflux door het oppervlakte is gekoppeld aan een verandering van de oppervlaktetemperatuur.

Literatuur

Šimůnek, J. & Van Genuchten, M. T. (2008). *Modeling nonequilibrium flow and transport processes using HYDRUS*, *Vadose Zone Journal* 7:782.

Šimůnek, J., Van Genuchten, M. T. & Šjma, M., (2018a). *HYDRUS Technical Manual Version 3.0*. PC-Progress, Prague.

Van der Zwan, S., Blokker, E.J.M., Agudelo-Vera, C.M., Nugroho, D. (2020). The influence of subsurface heat sources on the drinking water temperature. Deltares-KWR-11201825-000-HYE-0008-2020.

Van Vossen, J., Stofberg, S., Agudelo-Vera, C. (2019). *Effectiviteit maatregelen tegen opwarming drinkwater in leidingen*. KWR 2019.080. KWR, Nieuwegein.

Wikipedia (2020). <https://nl.wikipedia.org/wiki/Geotherm> (geraadpleegd op 3 maart, 2020).