



KWR 2024.099 | September 2024

Warmtebeïnvloeding van aansluitleidingen door warmtenetten

Verkenning van een meetmethode

Colofon

Warmtebeïnvloeding van aansluitleidingen door warmtenetten

Verkenning van een meetmethode

KWR 2024.099 | September 2024

Opdrachtnummer

403936/008

Projectmanager

B. (Bram) Hillebrand MSc.

Opdrachtgever

DPWE

Auteur(s)

dr. ir. K.A. (Karel) van Laarhoven, dr. ir. A. (Amitosh) Dash, dr. M. (Mohamad) Zeidan

Kwaliteitsborger(s)

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

Verzonden naar

DPWE

Openbaarheid

Een jaar na publicatie van het rapport wordt dit openbaar.

Keywords

opwarming, aansluitleidingen, temperatuurmetingen, warmtenetten

Jaar van publicatie
2024

Meer informatie

Dr. ir. K.A. (Karel) van Laarhoven
T +31 (0)30 60 69 697
E amitosh.dash@kwrwater.nl

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

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

KWR

September 2024 ©

Alle rechten voorbehouden aan KWR. Niets uit deze uitgave mag - zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van KWR - 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.

Samenvatting

In de voorzieningsgebieden van de DWPE-bedrijven neemt het aantal warmtenetten toe. Om de waterkwaliteit te garanderen, moet worden nagegaan hoe groot de invloed van warmtenetleidingen op aansluitleidingen is en wat de technische haalbaarheid is van eventuele mitigerende maatregelen. Er is nog geen toegespitste methode om daadwerkelijke warmtebeïnvloeding in de praktijk te meten. In dit onderzoek zijn een meetmethodiek en meetapparatuur voor het opsporen van overmatige warmtebeïnvloeding van de aansluitleiding ontwikkeld. Eerste tests in het veld laten zien dat een warmtebeïnvloeding van enkele graden inderdaad voorkomt, en dat deze gemeten kan worden via de voorgestelde aanpak. Een inschatting van de warmtebeïnvloeding op basis van simulaties met een bodemtemperatuurmodel komt uit op een vergelijkbare warmtebeïnvloeding. Een eerste ruwe inschatting is dat er minimaal enkele tientallen centimeters afstand tussen aansluitleiding en warmte-aansluiting nodig is om minder dan 1 °C warmtebeïnvloeding te hebben.

Inhoud

Samenvatting	4
Inhoud	5
1 Inleiding	6
1.1 Aanleiding en doel	6
1.2 Aanpak en leeswijzer	7
2 Meetprincipe voor het vaststellen van warmtebeïnvloeding van aansluitleidingen	8
2.1 Uitgangspunten meetmethode	8
2.2 Meetapparatuur	8
2.3 Testen van de meetapparatuur	9
2.3.1 Meting aan de uitstroom van een mengkraan	9
2.3.2 Meting aan stilstaand water	10
2.3.3 Meting aan warmtebeïnvloeding met een föhn	10
2.3.4 Meting met gekoeld water	11
2.3.5 Discussie	13
3 Metingen aan warmtebeïnvloeding van aansluitleidingen bij huishoudens	15
3.1 Meetlocaties	15
3.2 Meetprotocol	15
3.3 Resultaten en discussie	16
3.3.1 Eén meting bij een huis met warmte-aansluiting nader bekeken	16
3.3.2 Terugkerend patroon bij verschillende huizen met een warmteleiding.	18
3.3.3 Beeld bij een huis zonder warmteleiding	20
4 Simulaties van warmtebeïnvloeding van aansluitleidingen met het bodemtemperatuurmodel	22
4.1 Modelopzet	22
4.2 Resultaten en discussie	23
5 Conclusies en aanbevelingen	25
5.1 Conclusies	25
5.2 Aanbevelingen	25
Referenties	26
I Gebruik van de meetapparatuur	27
II Meetseries bij woningen	28
III Specifieke modelinvoer voor simulaties huis P151	32

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en doel

In Nederland bestaan wetgeving, NEN-normen en praktijkcodes voor de meterkast (NEN 2768) en distributie in drinkwaterleidingen (o.a. Drinkwaterwet 2011, PCD 1-1:2015) en de drinkwaterinstallatie (NEN 1006; NEN-EN 806). Deze normen en richtlijnen zijn bedoeld om een veilige drinkwaterlevering aan de klant te garanderen. Voor aansluitleidingen zijn dergelijke normen niet geformuleerd. De vraag is of er technische afspraken nodig zijn voor aansluitleidingen, in het bijzonder voor aansluitleidingen in de buurt van warmtenetleidingen. In de voorzieningsgebieden van de DWPE-bedrijven neemt het aantal warmtenetten toe. Om te weten of actie nodig is, moet worden nagegaan hoe groot de invloed van warmtenetleidingen op aansluitleidingen is en wat de technische haalbaarheid is van eventuele acties.

Uit eerder modellerwerk (Hillebrand en Blokker, 2020) blijkt dat stilstaand drinkwater in een aansluitleiding snel (in ca. 20 minuten) de omgevingstemperatuur (d.w.z. de plaatselijke temperatuur van de bodem) aanneemt. Bij watergebruik door de aansluiting is de warmtebeïnvloeding beperkt omdat de verblijftijd van het water in de aansluitleiding kort is. Bij typische huishoudelijke verbruikspatronen wordt ongeveer 25% van het verbruikte water beïnvloed onder invloed van stilstand in de aansluitleiding. Wanneer er ook een aansluiting op het warmtenet aanwezig is die in de buurt van de drinkwateraansluitleiding ligt, is het denkbaar dat dit leidt tot een hogere omgevingstemperatuur rond de aansluitleiding. Het zal van het samenspel van de precieze uitvoering van de warmteleiding en externe factoren (zoals het weer en bodemsoort) afhangen of hierbij de wettelijke eis van 25 °C aan de tap bij doorstroming bereikt zal worden.

Eerder experimenteel werk (Votel, 2022) liet zien dat het vaststellen van warmtebeïnvloeding met behulp van metingen niet eenvoudig is. De aan de tap gemeten tijdseries van de temperatuur van stromend water bleken moeilijk te interpreteren en te vertalen naar de invloed van de warmteleiding. Dit komt vooral door het gebrek aan inzicht in de invloed van de binneninstallatie op de watertemperatuur op weg naar de tap. Ook bleek het niet triviaal om de opwarming van het drinkwater door de meetopstelling te voorkomen. Om warmtebeïnvloeding in de praktijk te meten is een toegespitste methode nodig.

Het doel van het hier gerapporteerde onderzoek is om meer praktisch inzicht te verkrijgen in de warmtebeïnvloeding van warmteleidingen op het drinkwater in aansluitleidingen. Met een toegespitste meetopstelling, ondersteund met een bodemtemperatuurmodel (van Esch, 2022, van Summeren en Zeidan, 2024) wordt onderzocht of het mogelijk is om warmtebeïnvloeding van drinkwater in aansluitleidingen door warmte-aansluitleidingen vast te stellen. Dit geeft drinkwaterbedrijven een methode om problemen met warmte-aansluitleidingen in het veld vast te stellen. Ook geeft dit een beeld van de concrete warmtebeïnvloeding die optreedt in de praktijk. Tenslotte geeft dit een inschatting van de benodigde minimale afstand tussen warmte- en drinkwateraansluitleidingen om temperatuur-overschrijdingen te vermijden.

1.2 Aanpak en leeswijzer

Er is een meetopstelling ontwikkeld waarmee warmtebeïnvloeding van aansluitleidingen kan worden vastgesteld aan de hand van debiet- en temperatuurmetingen in de meterkast van een huishouden (in de meterkast om invloed van de binneninstallatie op metingen uit te sluiten). Het ontwerp van de opstelling en de eerste tests van de functionaliteit zijn beschreven in Hoofdstuk 2. De opstelling is toegepast bij een aantal huishoudens in het voorzieningsgebied van Evides. De opzet en uitkomsten van deze metingen zijn beschreven in Hoofdstuk 3. Eén van de locaties uit de meetcampagne is doorgerekend met een bodemtemperatuurmodel om de meetuitkomsten beter te begrijpen en een beeld te krijgen van het aandeel van de warmte-aansluiting in de opwarming van drinkwater ten opzichte van overige relevante factoren. Dit is beschreven in Hoofdstuk 4. De conclusies en aanbevelingen van dit onderzoek zijn beschreven in Hoofdstuk 5.

2 Meetprincipe voor het vaststellen van warmtebeïnvloeding van aansluitleidingen

2.1 Uitgangspunten meetmethode

Voor het opstellen van een ontwerp voor de meetapparatuur zijn de volgende uitgangspunten voor een meetmethode gekozen:

- De kern van de aanpak is om een tijdserie te meten van de temperatuur van water dat in de meterkast wordt afgetapt na een periode van stilstand. Op die manier wordt eerst de temperatuur van het water dat stilstond in de meterkast gemeten, dan de temperatuur van het water dat stilstond in de aansluitleiding, en dan de temperatuur van water uit de hoofdleiding (dat niet noodzakelijk stil heeft gestaan). Vergelijking van de temperaturen van het water uit de aansluitleiding en de hoofdleiding geeft inzicht in warmtebeïnvloeding ter hoogte van de aansluitleiding.
- Daarnaast wordt ook het debiet bijgehouden (gelogd) gedurende de meting. Wanneer de diameters van de leidingen tot en met de dienstkraan bekend zijn, kan met informatie van het debiet worden herleid waar het water dat op een bepaald tijdstip wordt gemeten stil stond.
- Zowel de temperatuur als de volumestroom worden met hoge frequentie gemeten, zodat er meerdere meetpunten verkregen worden van het kleine volume water dat stilstond in de aansluitleiding.
- Er wordt gemeten vanaf een punt in de meterkast. Dit geeft een goede balans tussen enerzijds minimale beïnvloeding van de watertemperatuur vanaf het moment dat het de aansluitleiding verlaat en anderzijds de eenvoud om de meetopstelling aan te sluiten (niet nodig om te graven).
- De meting vereist een hoge mate van controle over het waterverbruik in het huis, om voldoende lange stilstand, gevolgd door een voldoende lange lage continue volumestroom te garanderen. Er wordt daarom gewerkt met een meetopstelling die van huis naar huis verplaatst kan worden voor een toegespitste meting (en wordt er bijvoorbeeld geen gebruik gemaakt van de data van een digitale watermeter bij regulier verbruik in de woning).

2.2 Meetapparatuur

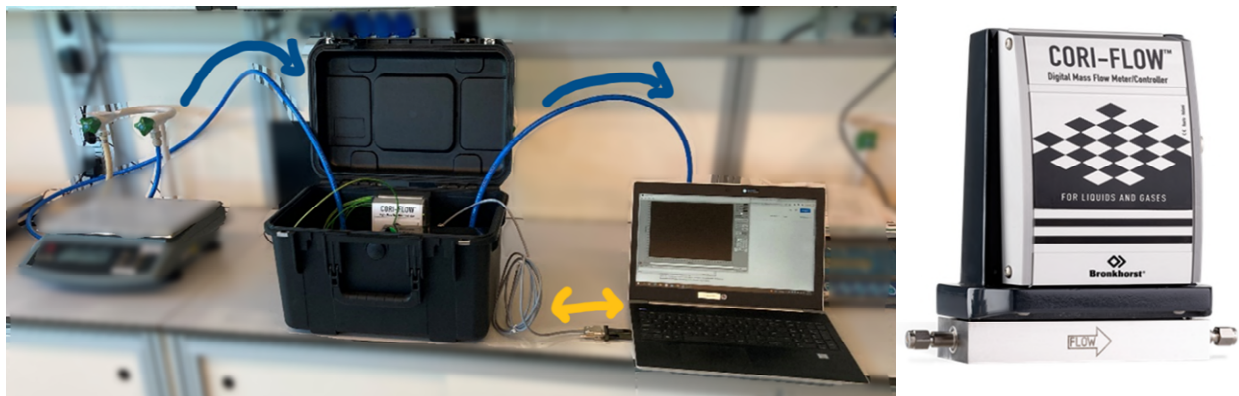
Figuur 1 toont een foto van de meetapparatuur die is ontworpen met oog op de uitgangspunten uit paragraaf 2.1. Het belangrijkste onderdeel is een *Coriolis flowmeter* (Bronkhorst, Cori-flow M55). Dit type debietmeter is bij uitstek geschikt voor hoogfrequente, simultane metingen van debiet en temperatuur. Het meetprincipe wordt als volgt beschreven in de handleiding van de sensor:

Elke Coriolis flowmeter heeft een of meer meetbuizen die door een exciter in trilling worden gebracht. Zodra de vloeistof in de meetbuis begint te stromen, zorgt deze oscillatie voor extra verdraaiing veroorzaakt door de traagheid van de vloeistof. Twee sensoren detecteren deze verandering van de trilling van de buis in tijd en ruimte als het "faseverschil". Dit verschil is een directe meting van de massastroom. De dichtheid van de vloeistof kan daarnaast ook worden bepaald uit de frequentie van de trilling van de meetbuizen. De temperatuur van de meetbuis wordt ook geregistreerd om de thermische invloeden te compenseren. De hiervan afgeleide procestemperatuur is beschikbaar als een aanvullend uitgangssignaal.

De overige onderdelen van de opstelling zijn:

- **Slangen** – het water wordt naar en van de debietmeter vervoerd met slangen van polyurethaan. Dit materiaal is gekozen omdat het een relatief lage thermische geleiding heeft, zodat de temperatuur van het water vanaf de aansluiting minimaal wordt beïnvloed. Om dezelfde reden wordt de aansluitslang kort gehouden, 1 m, net genoeg om de koffer comfortabel in de buurt van de meterkast te kunnen zetten. Een afsluiter op de afvoerslang helpt het debiet beter te beheersen.
- **Laptop** - De Coriolis flowmeter wordt uitgelezen met een laptop en een bijgeleverde USB-kabel. De applicaties FlowDDE en FlowPlot worden gebruikt om respectievelijk verbinding te maken tussen laptop en flowmeter en om de flowmeter vervolgens uit te lezen (de software en bijbehorende handleidingen zijn gratis beschikbaar op de website van Bronkhorst).
- **Assemblage** - Het geheel wordt van elektriciteit voorzien via een oplaadbare accu zodat de meting niet afhankelijk is van de aanwezigheid van een stopcontact ter plaatse van de meting. Het geheel is geassembleerd in een draagkoffer.

Een beschrijving van het gebruik van de meetapparatuur is opgenomen in Bijlage I.



Figuur 1: (Links) Meetkoffer tijdens gebruik. De blauwe pijlen tonen de richting van de stroming terwijl de gele pijl de dataverbinding met de laptop die de metingen vastlegt toont. (Rechts) De gebruiker Coriolis flowmeter met ingebouwde temperatuursensor.

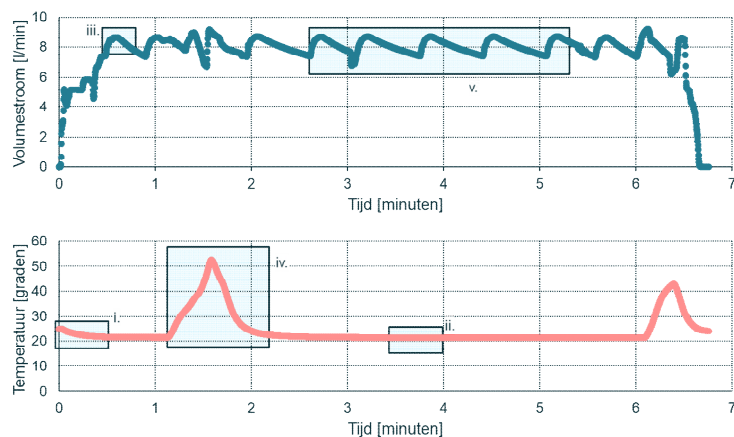
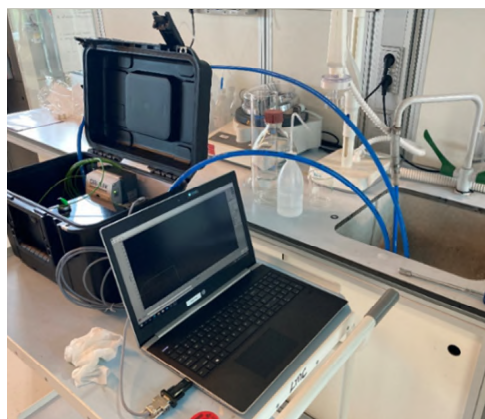
2.3 Testen van de meetapparatuur

Er zijn een aantal basale proeven met de opstelling uitgevoerd om een gevoel te krijgen voor het gedrag van de opstelling en de sensor. De belangrijkste observaties zijn hieronder beschreven, gevolgd door enkele algemene conclusies en aandachtspunten.

2.3.1 Meting aan de uitstroom van een mengkraan

Bij wijze van eerste proef is de opstelling aangesloten op een mengkraan, terwijl de kraan continu bediend werd (met een patroon dat tijdens deze ruwe proef niet is vastgelegd) om zowel het debiet als de temperatuur te veranderen. De opstelling en de bijbehorende meetdata zijn weergegeven in Figuur 2. De volgende observaties zijn in de data gemarkeerd:

- Het water koelt af in de eerste halve minuut. Dit wijst erop dat water in de drinkwaterinstallatie gedurende stilstand is opgewarmd.
- Uiteindelijk bereikt de watertemperatuur een stabiele waarde (ongeveer 21 °C).
- De maximaal haalbare volumestroom van één kraan is ongeveer 9 l/min.
- Bij het inmengen en uitmengen van warm water is de geleidelijke variatie in watertemperatuur zichtbaar.
- Veranderingen in debiet door plotselinge bewegingen in de stand van de kraan worden opgepikt in de debietmetingen, maar leiden niet tot temperatuurvariaties.

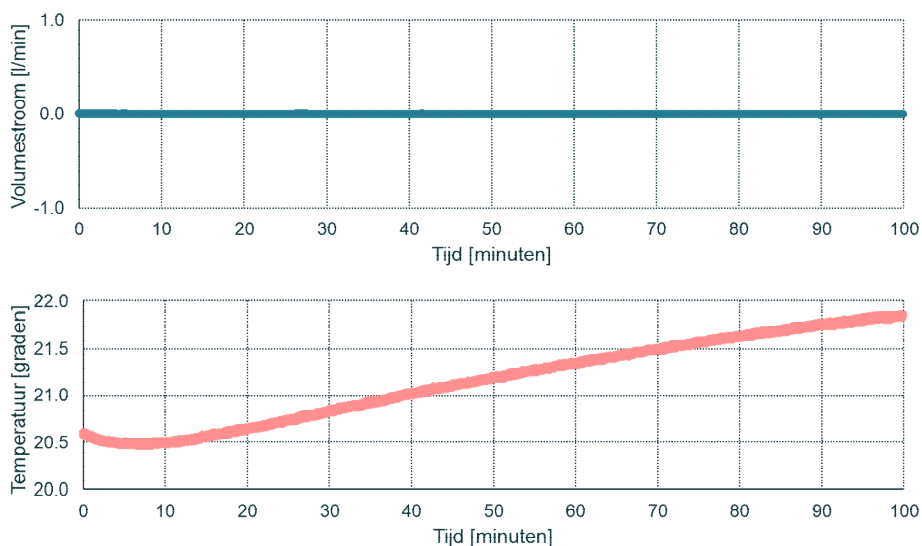


Figuur 2: (links) Meetapparatuur aangesloten op een mengkraan. (Rechts) Tijdsree van gemeten volumestroom (blauw) en temperatuur (rood) van het water uit de mengkraan.

2.3.2 Meting aan stilstaand water

Bij wijze van tweede proef is, na doorstroming, de waterstroom stilgezet terwijl de meting doorliep. De data vanaf het moment dat de flow stopgezet is, wordt getoond in Figuur 3. Tijdens stilstand neemt de gemeten temperatuur toe, in het begin sneller dan aan het eind. Dit duidt op opwarming van het water in de sensor door ofwel temperatuuruitwisseling met de omgeving, ofwel door warmteontwikkeling in de opstelling zelf. De omgevingstemperatuur buiten de koffer bleek tussen de 19 °C en 19.4 °C te liggen tijdens de proef. Dit suggereert warmteontwikkeling in de opstelling. Een mogelijkheid is dat de accu in de koffer een bron van extra warmte is.

Deze inherente warmtebeïnvloeding is belangrijk om in het achterhoofd te houden tijdens metingen. De exacte snelheid van de beïnvloeding is hier niet uitgebreid in kaart gebracht, maar bij proeven waarbij water enkele tientallen minuten stilstaat moet dus rekening gehouden worden met de mogelijkheid tot opwarming van enkele tienden van °C. Bij doorstroming is water maar zeer kort aanwezig in de koffer, waardoor de extra beïnvloeding van dat water beperkt zal zijn.



Figuur 3: Stijging van temperatuur gemeten tijdens een langdurige stilstand.

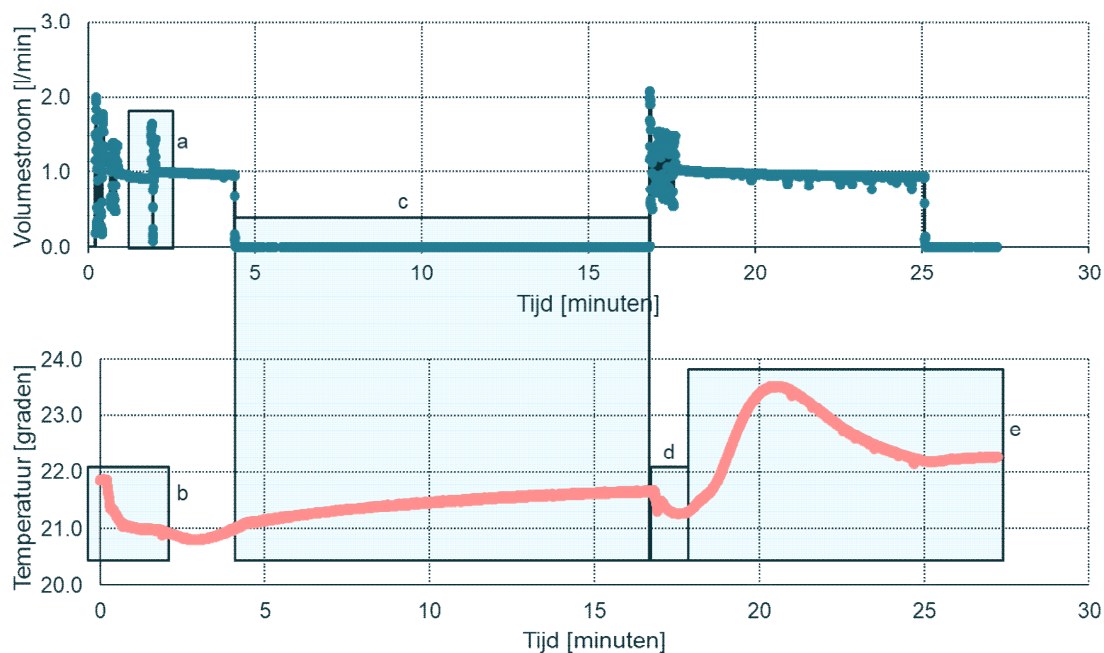
2.3.3 Meting aan warmtebeïnvloeding met een föhn

Bij wijze van derde proef is gemeten aan een waterstroom vanuit stilstand. De meting startte met het doorspoelen van het water dat daarvoor door de omgeving was opgewarmd (gedurende 100 minuten; deze proef volgde direct op de proef uit Paragraaf 2.3.2). Daarna werd het water weer stilgezet, en werden enkele centimeters leidingwerk

op enkele tientallen centimeters afstand van de kraan voor 5 minuten opgewarmd met een föhn (ingesteld op 50 °C). Daarna werd de waterstroom hervat. De gemeten data is weergegeven in Figuur 4. De volgende waarnemingen zijn gemarkeerd in de figuur:

- De kraan sputtert af en toe, zonder meetbare invloed op de temperatuur.
- De opgebouwde opwarming van de vorige proef wordt gelijk weggespoeld. De daling in temperatuur geeft aan dat er extra opwarming plaatsvindt in de koffer, ten opzicht van bijvoorbeeld de aansluitslang die loopt van de kraan naar de koffer.
- Tijdens een stilstandsperiode is er weer een stijging in temperatuur vanwege de directe omgeving van de flowmeter (de koffer).
- Wanneer de waterstroom wordt hervat, is opnieuw, net als bij b, een onmiddellijke daling in de temperatuur te zien.
- Voordat de minimale temperatuur van het leidingwater wordt bereikt, komt het met de föhn opgewarmde water aan in de sensor en wordt een hogere temperatuur gemeten. De stijging en daling in temperatuur verlopen geleidelijk, met een afgeronde piek. Dit wijst erop dat, hoewel slechts enkele centimeters leidingwerk werden verwarmd met de föhn, de warmte redelijk snel uitwaaiert via diffusie tijdens stilstand of disperseert tijdens stroming. Na het stilzetten van de waterstroom begint de temperatuur van het water dat stilstaat in de sensor weer te stijgen, maar langzamer dan bij de stilstand in (c).

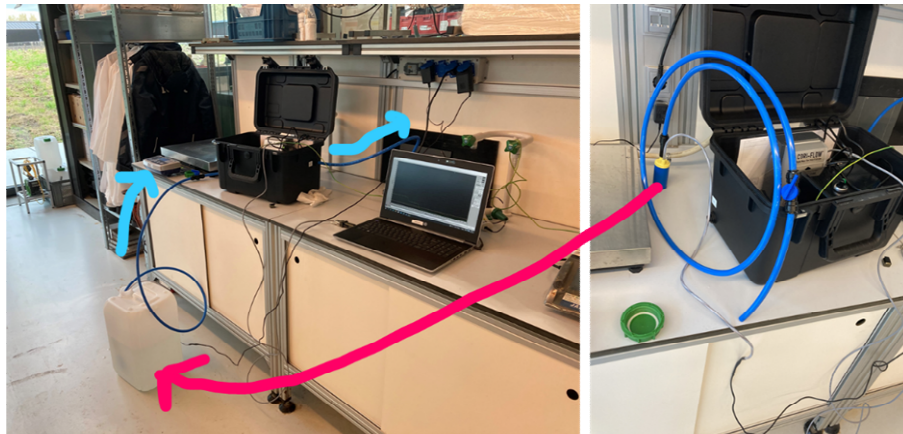
Hoewel deze proef niet onder sterk gecontroleerde omstandigheden is uitgevoerd, demonstreert deze dat het mogelijk is om ruimtelijke variaties in de temperatuur in leidingwerk te meten in de waterstroom. Ook zien we opnieuw beïnvloeding van de meting door de warmte in de koffer: 0,5 °C opwarming in de loop van 15 minuten.



Figuur 4: Meting aan warmtebeïnvloeding met een föhn.

2.3.4 Meting met gekoeld water

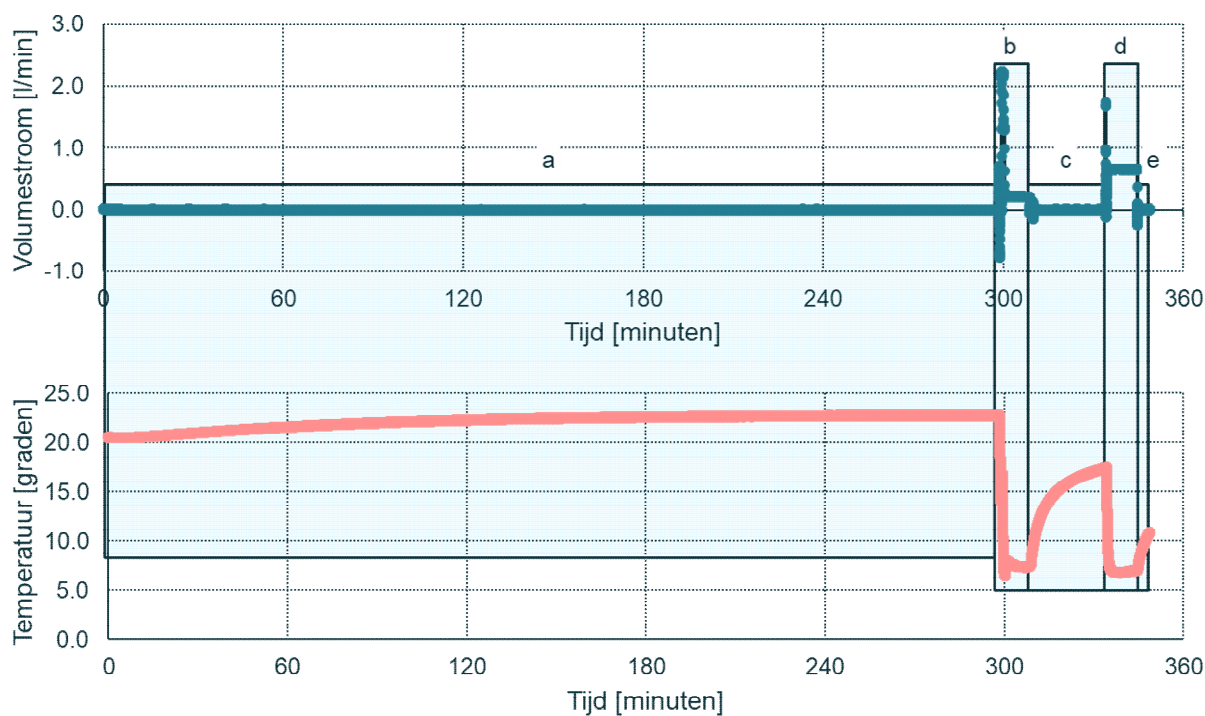
Een laatste meting is uitgevoerd met behulp van water dat 's nachts in een koelcel gekoeld is tot 4 °C, zodat de ingaande watertemperatuur bekend was en deze sterk verschilde van de omgevingstemperatuur. Het water werd in een jerrycan bewaard, en met een aquariumpomp door de opstelling gepomp. Vlak voor het begin van de proef is ijs door het water gemengd. De temperatuur van het water ligt dus tussen de 0 en de 4 °C in deze proef. Op de momenten dat het water voor langere tijd stilstond tijdens de proef, werd de jerrycan in de koelcel bewaard om warmtebeïnvloeding te voorkomen. De opstelling is weergegeven in Figuur 5.



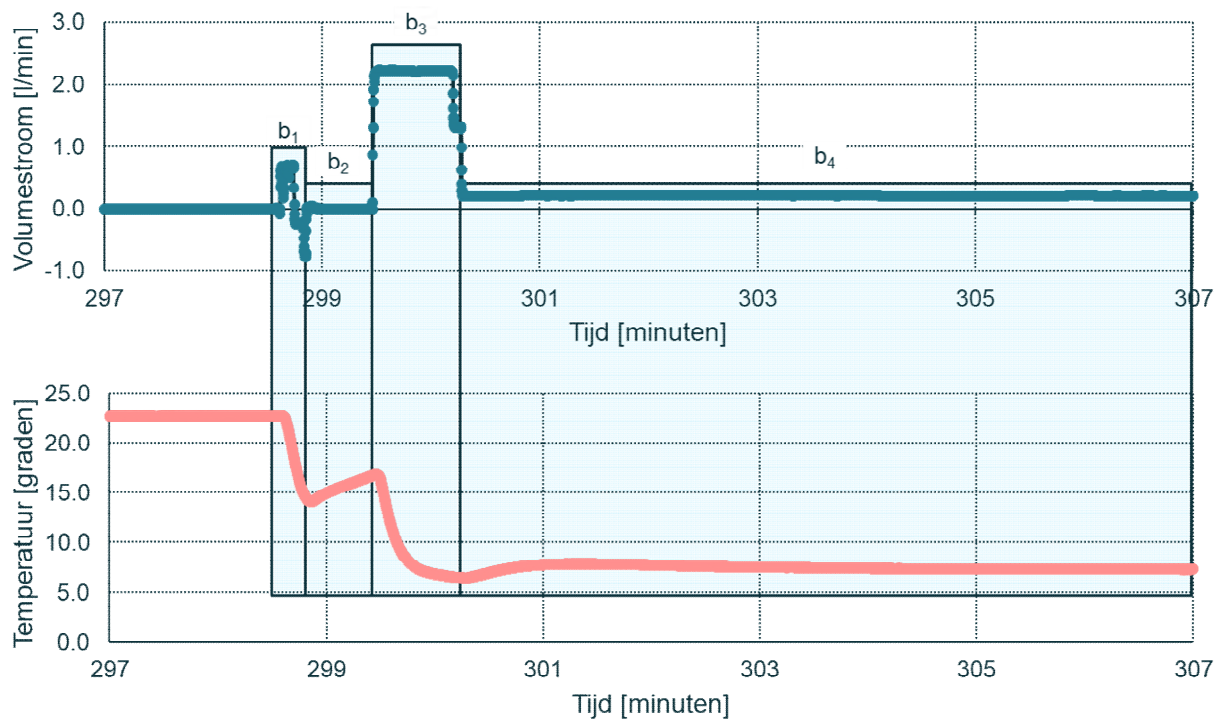
Figuur 5: Opstelling voor proef met gekoeld water. De pomp (rechts) wordt in de jerrycan ondergedompeld (rode pijl). Het water stroomt volgens de blauwe pijlen. Een afsluiter is aanwezig om de volumestroom te regelen.

De data die is verkregen tijdens de test is weergegeven in Figuur 6. In Figuur 7 worden een aantal fases uit de proef uitvergroot. Een aantal zaken vallen op tijdens de proef.

- Bij a in Figuur 6: er wordt na ongeveer 4 uur inderdaad een evenwichtstemperatuur bereikt (23 °C). Dat suggereert dat de warmtebeïnvloeding die zichtbaar is bij stilstand overeenkomt met warmte-uitwisseling met lucht in de koffer (die door de accu verwarmd wordt ten opzichte van de kamertemperatuur) en niet door oververhitting in het binnenwerk van de sensor (de verwachting is dat de temperatuur dan hoger zou oplopen, omdat het meetgedeelte van de sensor is geïsoleerd).
- Bij b1 en b3 in Figuur 7: na het starten van de waterstroom daalt de gemeten temperatuur onmiddellijk, maar het duurt 10-30 seconden voordat de daling een nieuw plateau bereikt. Dat duidt erop dat de sensor – ondanks de hoge meetfrequentie - die tijd nodig heeft om te acclimatiseren bij plotseling veranderende temperatuur (vermoedelijk de tijd die nodig is om de massa van het meetelement volledig van temperatuur te veranderen). Dit is van belang om in de gaten te houden bij het interpreteren van de praktijkmetingen.
- Bij b3 en b4 in Figuur 7: in b3, bij een debiet van 2 ml/min, gaat de temperatuur richting een plateau van 6,5 °C. In b4, na de overgang in debiet naar 0.2 ml/min stijgt de temperatuur naar een plateau van 7,5 °C. In beide gevallen ligt de temperatuur dus boven de verwachte 4 °C van het gekoelde water. Dit duidt op een warmtebeïnvloeding door de omgeving tijdens de stroming door de aansluitslang, ter grootte van ongeveer 15%-20% van het temperatuurverschil, met een grotere warmtebeïnvloeding bij de lagere stroomsnelheid, als gevolg van een langere verblijftijd.



Figuur 6: Globaal overzicht van de proef met gekoeld water.



Figuur 7: Verschillende fases van de proef met koud water.

2.3.5 Discussie

De proeven hebben uitgewezen dat er drie zaken zijn om rekening mee te houden bij het interpreteren van een meting:

- De meetopstelling beïnvloedt de temperatuur van het water. Deze beïnvloeding is binnen een minuut merkbaar bij stilstaand water, maar is minder dan 0,1 °C bij doorstroming.

- De sensor heeft enige tijd nodig om te acclimatiseren bij veranderende temperatuur. Plotselinge temperatuurovergangen in het stromende water zullen worden afgezwakt, en zullen naar verwachting niet te onderscheiden zijn van gradiënten in de temperatuur van het stromende water.
- Er is enige warmtebeïnvloeding bij de stroming van het water door de aansluitslang naar de sensor. Bij een warmere omgeving kan de temperatuur van het stromende water met 15%-20% van het temperatuurverschil stijgen.

Deze aspecten stellen een grens aan het detailniveau van de informatie die verkregen kan worden uit een meting aan een aansluitleiding. Ze vormen geen belemmering voor een informatieve meting in het geval dat er sprake is van substantiële warmtebeïnvloeding van een aansluitleiding.

In een later stadium zouden deze aspecten aan de hand van meer proeven nauwkeuriger kunnen worden uitgezocht en de opstelling zou kunnen worden aangepast om deze tegen te gaan (bijvoorbeeld met isolatie, ventilatie van de koffer). Ook zou kunnen worden gezocht naar een doorstroomsnelheid die een optimale balans geeft tussen, enerzijds, warmtebeïnvloeding in de aansluitslang (hoger debiet is beter) en, anderzijds, voldoende tijd om te acclimatiseren bij het meten van het beperkte volume water dat stilstaat in een aansluitleiding (lager debiet is beter).

3 Metingen aan warmtebeïnvloeding van aansluitleidingen bij huishoudens

3.1 Meetlocaties

In samenwerking met drinkwaterbedrijf Evides zijn er in Capelle aan den IJssel metingen uitgevoerd bij een aantal huizen van klanten die door Evides waren benaderd. Op 5 en 7 februari 2024 is er gemeten bij 4 huishoudens met stadsverwarming waarvan vanuit de tekeningen bekend is dat er een warmte-aansluiting (aanvoer en afvoer) parallel aan de aansluitleiding ligt. Op 1 mei is er opnieuw gemeten bij één van die huishoudens. Daarbij heeft een monteur van Evides tevens de aansluitleidingen vrij gegraven om de precieze liggingssituatie zo goed mogelijk vast te stellen en om de temperatuur van de warmte-aansluitleiding te meten, om zo de simulaties die zijn beschreven in Hoofdstuk 4 te voorzien van zo goed mogelijke invoerdata. Ook is er die dag gemeten bij een ander huishouden met een warmteleiding en bij één huishouden waarvan bekend is dat er geen warmteaansluiting is. Voor analyse van de metingen leverde Evides de specificaties van de aansluitleidingen (PE, binnendiameter van 19,6 mm, buitendiameter 25 mm) en van de warmte-aansluitingen (Staal, PUR isolatie, binnendiameter 25,7 mm, buitendiameter 90 mm, temperatuur 30 °C).

3.2 Meetprotocol

Al de deelnemende klanten hadden een gestandaardiseerde meterkast, waardoor aansluiting van de meetopstelling eenduidig kon worden uitgevoerd via het demonteren van een aftapkraantje op de hoofdkraan, net na de watermeter, zoals afgebeeld in Figuur 8.



Figuur 8. Meetopstelling in actie bij huis L13. (Links) Aansluiting van de opstelling op een aftapkraantje op de hoofdkraan. (Rechts) Opstelling in de hal, met afvoer naar buiten. Merk op dat de aansluitleiding vanaf de watermeter van de voordeur afwijkt, wat betekent dat de aansluitleiding enkele meters 'binnenshuis' zal liggen.

De algemene stappen die zijn gevolgd om de meetopstelling aan te sluiten en te bedienen zijn beschreven in Bijlage I. Met behulp van de meetopstelling werden experimenten uitgevoerd aan de hand van de volgende stappen met betrekking tot de precieze doorstroming van de aansluitleiding tijdens de meting:

- 1 Maak een inschatting van de inhoud van de aansluitleiding. Bepaal op basis daarvan hoeveel doorstroming tijdens de proef gemeten wordt.
- 2 Kies de gewenste stagnatieduur (5, 10, 15, 20 of 30 minuten) en laat die voorbijgaan. Tijdens deze stagnatieduur krijgt het water in de aansluitleiding de tijd om de temperatuur van de omgeving aan te nemen.
- 3 Start de doorstroming met een bepaald debiet totdat het bij stap 1 gekozen volume is gepasseerd.
- 4 Herhaal stappen 3 en 4 voor verschillende stagnatietijden, om zo inzicht in de snelheid van de opwarming in de aansluitleiding te verkrijgen.

Bij de vijf woningen zijn verschillende keuzes gemaakt qua doorstroomvolume, debiet en stagnatieduur. Deze zijn samengevat in Tabel 1.

Tabel 1. Keuzes qua invulling van de metingen bij de verschillende huishoudens. Alle aansluitleidingen hadden een binnendiameter van 19.6 mm.

Huis	Datum	Warmte-aansluiting?	Aansluitleiding Lengte [m]	Doorstroomtijd [min]	Debiet [l/min]	Stagnatietijden [min]
L12	5 feb 2024	Ja	4,5	7	0,7	5, 10, 20, 30
P179	5 feb 2024	Ja	6	7	0,6	5, 10, 20
G87	7 feb 2024	Ja	5,5	10	1	30, 15, 15
P151	7 feb 2024	Ja	11	13	1,6	30, 5, 20, 20
P151	1 mei 2024	Ja	11	13	1,6	30, 5, 15
P211	1 mei 2024	Ja	10,5	12	1,2	30, 5, 15, 15
B92	1 mei 2024	Nee	11,5	10	0,8	30, 5, 15, 15

3.3 Resultaten en discussie

3.3.1 Eén meting bij een huis met warmte-aansluiting nader bekeken

In Figuur 9 wordt als voorbeeld de meetserie getoond die is verkregen bij huis L12. In de volumestroomdata (blauwe lijn) zijn vijf perioden van doorstroming te herkennen: één aan het begin van de meting en vier die volgen op een gekozen periode van stilstand. Tijdens stilstand stijgt de temperatuur van het water in de sensor met steeds lager wordende snelheid, zoals eerder gezien bij de laboratoriumexperimenten. Tijdens de doorstroming wordt steeds een karakteristiek patroon in de temperatuur gemeten (uitvergroot in de onderste helft van de figuur): een kleine piek in temperatuur onmiddellijk na aanvang van de stroming (rode pijl), dan een daling die overgaat in een wat lagere piek (blauwe pijl), en dan een daling die aanhoudt tot het einde van de doorstroming (waarna de temperatuur van het dan stilstaande water in de sensor weer begint te stijgen).

In Figuur 9 is bij de vergroting ook een as toegevoegd met een inschatting van de afstand tot de flowmeter waarop het water stilstond vóór aanvang van de waterstroom. Daarbij is aangenomen dat het volume in de aansluitslang van de meetopstelling verwaarloosbaar is (ongeveer 0.05 liter, overeenkomstig met de eerste 2 seconden vanaf het moment dat de waterstroom begon). Ook is aangenomen dat de diameter van het leidingwerk tot en met de hoofdkraan dezelfde binnendiameter heeft als de PE-aansluitleiding (19.6 mm). Op basis van de ligging van de meterkast is ingeschat dat er tussen de 1 m en 2 m aan leidingwerk 'binnenshuis' ligt (zie ook Figuur 8). Dat water komt het eerst aan bij de sensor, en deze grens is aangegeven met de blauwe balk. Vervolgens komt het water dat stilstond in de aansluitleiding aan bij de sensor. De lengte van de aansluitleiding vanaf de gevel naar de hoofdleiding is 4.5 meter, aangegeven met de groene balk. Nadat dat water gepasseerd is, volgt er water dat zich tijdens de stilstand in het distributienet bevond.

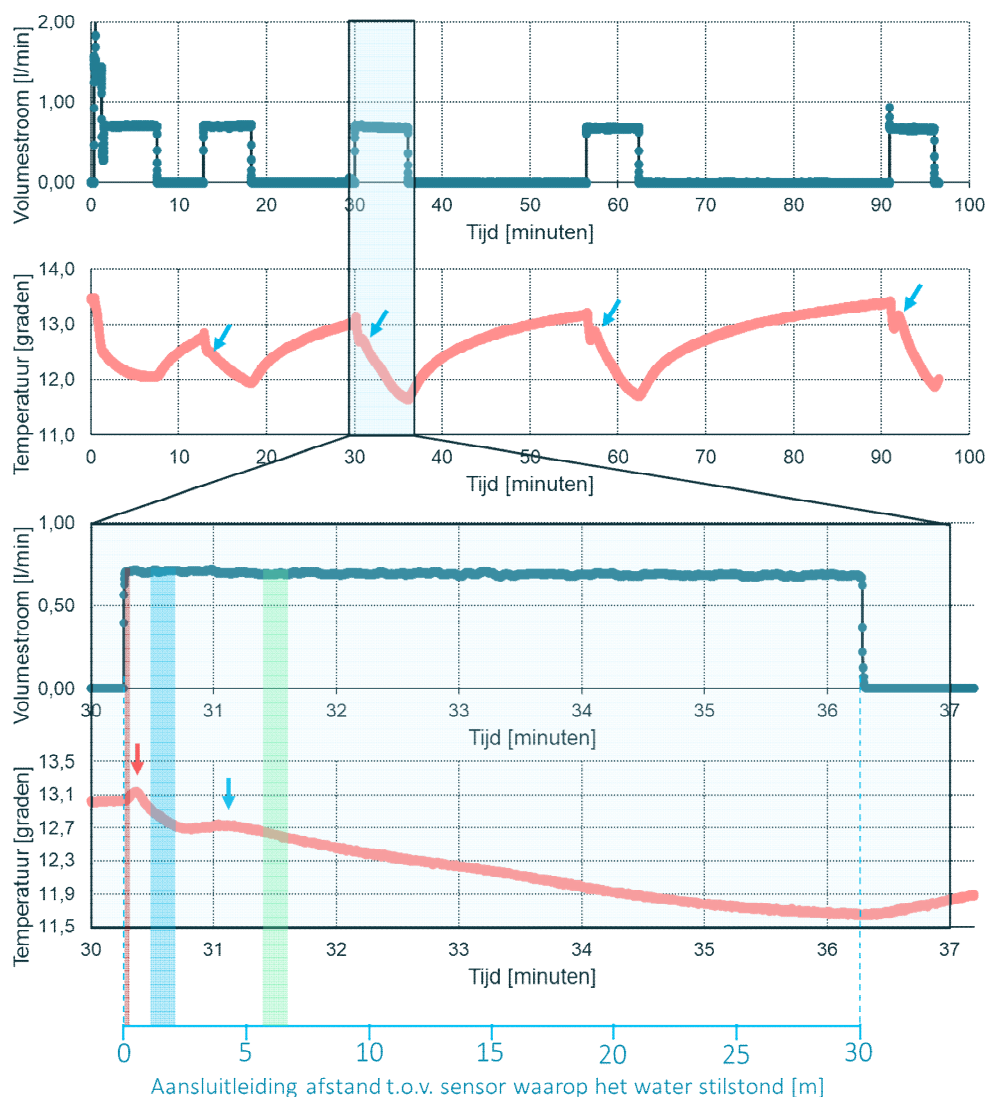
Hieruit volgt het volgende beeld:

- De eerste piek (rode pijl) betreft water uit de drinkwaterinstallatie dat tijdens stilstand daar nog iets warmer is geworden dan het water in de sensor.

- De tweede piek (blauwe pijl) is water dat stilstond in de aansluitleiding en daar is opgewarmd ten opzichte van de temperatuur die het had in het distributienet, vlak voordat het stil kwam te staan in de aansluitleiding.
- De minuten aanhoudende daling vanaf de groene balk duidt erop dat het water dat nu vanaf de hoofdleiding door de aansluitleiding naar de sensor stroomt in eerste instantie wordt opgewarmd door de aansluitleiding. Dit is als volgt uit te leggen:
 - tijdens stilstand is de aansluitleiding opgewarmd;
 - bij hervatten van de doorstroming stroomt ten eerste het opgewarmde water dat in de aansluitleiding stond weg;
 - bij hervatten van de stroming stroomt ten tweede nieuw (koudere) water vanuit het distributienet de aansluitleiding in;
 - het nieuwe water uit het distributienet wordt bij het doorstromen van de aansluitleiding richting meetopstelling enigszins opgewarmd omdat de aansluitleiding en de omliggende opgewarmde bodem wat van hun eigen warmte afgeven aan het kouder water;
 - door deze warmteafgiften koelen de aansluitleiding en de omliggende bodem wel wat af, waardoor het temperatuurverschil met opvolgend water uit het distributienet kleiner wordt en dit effect steeds minder wordt.

Cruciaal is hierbij het inzicht uit de lab-experimenten dat de sensor zelf 10 tot 20 seconden nodig heeft om te acclimatiseren aan een nieuwe temperatuur (zie Paragraaf 2.3.4), terwijl de daling van het water dat uit het distributienet afkomstig is minutenlang aanhoudt. De volledige afkoeling van de aansluitleiding gaat dus gepaard met een merkbare opwarming van water vanuit het distributienet dat nooit in de aansluitleiding heeft stilgestaan.

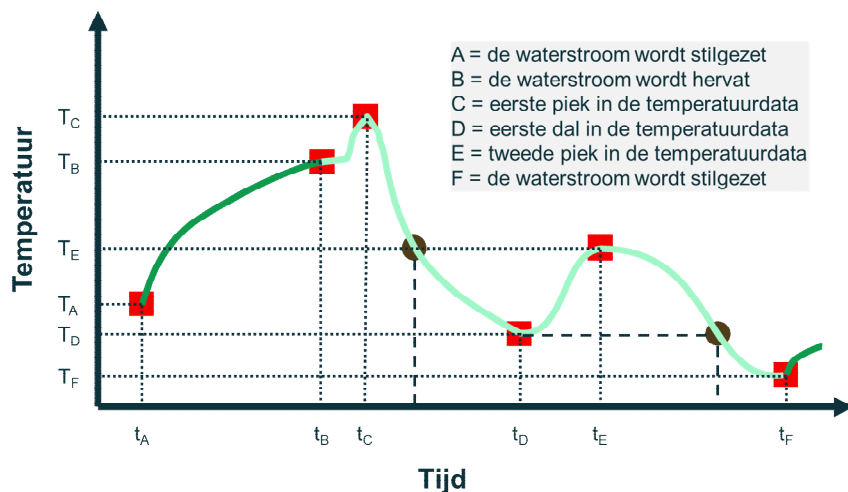
Hoewel de overgangen in temperatuur vloeiend zijn en geen plotselinge overgangen vertonen die zouden kunnen worden gerelateerd aan overgangen in het systeem, suggereren deze resultaten dus dat warmtebeïnvloeding van de aansluitleiding te detecteren is met deze meetmethode.



Figuur 9: Meetdata verkregen bij huis L12. Na enige doorstroming van het systeem is het water vier keer stilgezet voor enige tijd (respectievelijk 5, 10, 20 en 30 minuten), gevolgd door 7 minuten doorstroming. De uitvergroting toont het karakteristieke patroon in de temperatuur dat steeds terugkomt tijdens de doorstroming: een initiële, kleine piek in temperatuur (rode pijl), dan een daling en stijging naar een tweede piek (blauwe pijlen), en dan daling totdat de stroming wordt stopgezet. De rode balk geeft het gedeelte van de meting weer waarin water dat stilstond in de aansluitleiding werd gemeten. De blauwe en groene doorzichtige balken geven een inschatting van de grenzen waartussen gemeten wordt aan water dat stilstond in de aansluitleiding.

3.3.2 Terugkerend patroon bij verschillende huizen met een warmteleiding.

Het patroon in de temperatuurdata dat hierboven is beschreven blijkt terug te komen bij ieder huis met een warmteaansluiting. De corresponderende grafieken vergelijkbaar met Figuur 9 zijn opgenomen in Bijlage II. In Figuur 10 is weergegeven hoe het patroon kan worden samengevat aan de hand van een aantal combinaties van momenten (t) en bijbehorende temperaturen (T) tijdens de meting.



Figuur 10: schematisering van het typische patroon van de temperatuurdata bij een warmtebeïnvloedingsmeting bij een huis met een warmteaansluiting. De markeringen op de assen geven tijdstippen (t) en temperaturen (T) op een aantal relevante momenten tijdens de meting (A t/m F). Interpretatie van de temperaturen: T_A = willekeurige begintemperatuur, T_B = verhoogde temperatuur vanwege opwarming van het water in de sensor tijdens stilstand, T_C = temperatuur van water dat stilstond in de meterkast, T_D = temperatuur van water dat stilstond ergens in de fundering, T_E = temperatuur van water dat stilstond en opgewarmd werd in de aansluitleiding, T_F = temperatuur van water dat door het distributienet stroomde en niet recent heeft stilgestaan.

Voor de metingen van 5 en 7 februari zijn de belangrijkste parameters uit Figuur 10 samengevat in Tabel 2. Hier is x_E de afstand in leidinglengte tussen de twee locaties waar het water waarvoor de piektemperaturen T_C en T_E gemeten werden stilstond. Daarbij is de aanname dat de positie van T_C bij benadering samenvalt met locatie waar de aansluitleiding aansluit op de drinkwaterinstallatie in de meterkast. Deze x_E is ingeschat via:

$$x_E = \frac{(t_E - t_C) \cdot Q}{\pi r^2}$$

Met Q het debiet tijdens de meting en r de inwendige straal van de aansluitleiding.

Tabel 2. Samenvatting van metingen bij vier adressen.

Woning	Stagnatietijd $t_b - t_a$ [min]	T_E [°C]	Warmtebeïnvloeding $T_F - T_E$ [°C]	x_E [m]
L12	5,2	12,5	-0,6	1,6
	11,5	12,7	-1,1	1,6
	20,2	12,9	-1,1	1,9
	28,4	13,2	-1,2	2,0
P179	6,2	12,3	-1,4	3,6
	10,7	12,4	-1,6	4,0
	20,7	13,1	-2,1	3,5
G87	30,4	13,6	-2,6	2,6
	14,6	12,7	-1,7	2,4
	15,2	13,0	-1,3	2,4
P151	30,5	13,8	-3,2	4,1
	5,2	11,9	-1,2	4,6
	20,2	13,1	-2,6	4,5
	21,2	12,9	-2,8	5,4

Enkele van de belangrijkste observaties bij Tabel 2 zijn:

- In alle gevallen ligt x_E op een afstand die overeenkomt met een punt op de aansluitleiding. Voor ieder van deze huizen zien we dus opwarming van het water in de aansluitleiding ten opzichte van het water in de hoofdleiding.
- De hoogte van T_E , de hoogste temperatuur die gemeten wordt in het water afkomstig uit de aansluitleiding, lijkt te schalen met de stagnatietijd, $t_b - t_a$, de tijd die het water stilgestaan heeft (ook gemarkeerd met de steeds

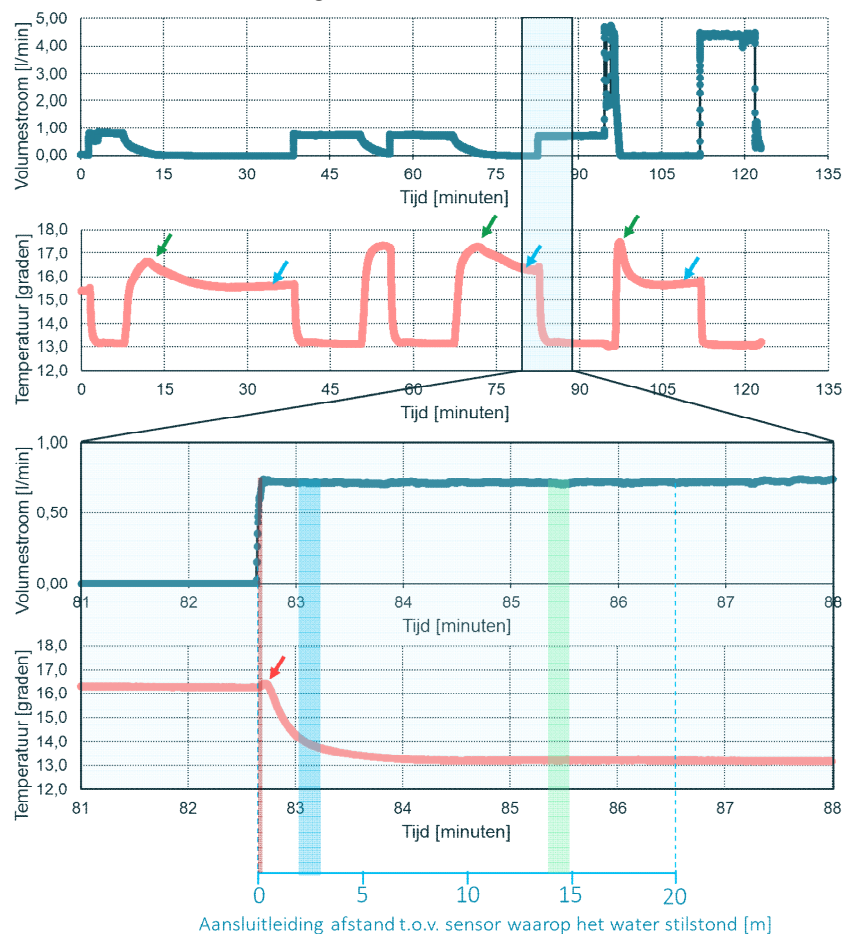
hoger liggende blauwe pijlen in het bovenste gedeelte van Figuur 9). Zodra de waterstroom stilgezet wordt, duurt het dus meer dan 30 minuten voordat het water in de aansluitleiding maximaal is opgewarmd. Dit komt overeen met het model van Hillebrand en Blokker (2020) die een opwarmtijd van 30-60 minuten voorspellen voor dit soort leidingen. Het kan niet uit de data worden herleid hoelang het duurt voordat de maximale temperatuur wordt bereikt.

- De warmtebeïnvloeding – het verschil $T_F - T_E$, het grootste gemeten verschil in de temperatuur van water uit aansluitleiding en hoofdleiding – is in alle gevallen negatief, wat duidt op opwarming van het water in de aansluitleiding. De verschillen lopen van met -0.5 tot -3.2 °C, en grotere verschillen vallen samen met langere stagnatietijden (zie vorig punt) en met een langere aansluitleiding.

Een observatie bij de grafieken in Bijlage II is dat de daling na de tweede piek in een meting nooit stabiel wordt. Dat wijst erop dat er aan het eind van de meting nog steeds warmte-uitwisseling plaatsvond tussen het stromende water en de aansluitleiding. Hierdoor is geen goede inschatting te maken van de temperatuur van het water in de distributieleiding; T_F is een overschatting.

3.3.3 Beeld bij een huis zonder warmteleiding

De metingen weergegeven in Figuur 11 zijn verkregen bij huis B92, waarvan bekend is dat er geen warmte-aansluiting is. Tijdens deze proef was er een probleem met het stilzetten van de waterstroom, waardoor deze steeds geleidelijk in plaats van abrupt tot stilstand kwam. Desalniettemin wordt stilstand wel bereikt en kan de waterstroom ook abrupt gestart worden, waardoor de experimenten vanaf dat punt goed te vergelijken zijn met de metingen bij huizen met een warmte-aansluiting.



Figuur 11. Meetdata verkregen bij huis B92, een huis zonder warmteaansluiting. De blauwe en groene doorzichtige balken geven een inschatting van de grenzen waartussen gemeten wordt aan water dat stilstand in de aansluitleiding. De blauwe en groene pijlen laten markeren dat de gemeten temperatuur eerst stijgt en dan weer afneemt bij een geleidelijke afname van het debiet richting stilstand. De rode pijl markeert opwarming in de meterkast.

De belangrijkste observaties bij Figuur 11 zijn:

- Er is ook hier een kleine piek in de temperatuur van het water dat stilstond in de drinkwaterinstallatie, gemeten direct na het hervatten van de waterstroom (rode pijl).
- Er is geen tweede piek in de temperatuur van het water dat stilstond in de aansluitleiding. Dit versterkt de hypothese dat die piek in de andere metingen duidde op warmtebeïnvloeding door de warmte-aansluiting.
- De gemeten watertemperatuur daalt veel sneller naar een stabiel plateau van 13 °C. Dit duidt er op dat de temperatuur van het water dat vanuit het distributienet – dat door de aansluitleiding stroomt na het hervatten van de stroming – niet of veel minder sterk wordt beïnvloed door de aansluitleiding dan bij de andere metingen (zoals beschreven in Paragraaf 3.3.1). Dit duidt er op dat er geen of slechts een klein temperatuurverschil tussen distributienet en aansluitleiding is ontstaan na stilstand, wat betekent dat de aansluitleiding tijdens stilstand niet of nauwelijks is opgewarmd ten opzichte van de hoofdleiding.
- Na het stilzetten van de waterstroom neemt deze geleidelijk af. Daarbij schiet de gemeten temperatuur eerst omhoog (rode pijlen) en wanneer er uiteindelijk water stilstaat in de sensor koelt dat af naar een lager niveau (blauwe pijlen). Het is niet duidelijk hoe dit tot stand komt. De hogere temperaturen komen niet vanuit het water (dat had kort daarvoor een stabiele lage temperatuur) en komt niet vanuit de omgeving (bij stilstand koelt alles weer af). Het gaat mogelijk om een reactie van het meetelement in de debietmeter op snel afremmende stroming.

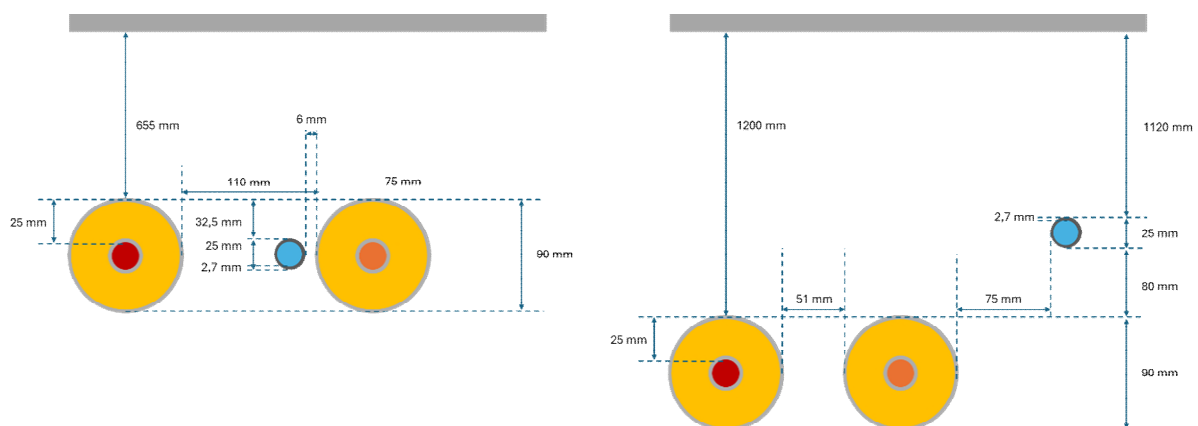
4 Simulaties van warmtebeïnvloeding van aansluitleidingen met het bodemtemperatuurmodel

Binnen het TKI-project ENGINE (van Esch, 2022) heeft Deltares i.s.m. KWR een bodemtemperatuurmodel ontwikkeld (BTM+) waarmee de warmte-uitwisseling tussen de bovengrond, de bodem, warmte- en drinkwaterleidingen is te berekenen onder invloed van variërende weersomstandigheden en opgegeven bodemeigenschappen. Dit model rekent in het 2-D vlak loodrecht op de stroomrichting. Hoewel het model is ontwikkeld voor distributieleidingen, is deze zonder aanpassingen toepasbaar op aansluitleidingen en in het bijzonder geschikt voor water dat stilstaat of juist snel doorstroomt, zoals in aansluitleidingen vaak het geval is. Hieronder wordt dit model aangewend om de situatie tijdens de metingen bij huis P151 door te rekenen.

4.1 Modelopzet

De opbouw van de gebruikte COMSOL implementatie van het BTM+ model is toegelicht in (Zeidan en van Summeren, 2024). Voor deze simulaties is invoerdata toegevoegd om de situatie van huis P151 in het model uit te beelden. Op basis van de door Evides aangeleverde GIS-data en expertkennis konden de systeemspecificaties worden gekozen (afmetingen, leidingmateriaal en bodemopbouw). De exacte modelinvoer is opgenomen in bijlage III. Voor de weersomstandigheden werd data van KNMI-weerstation Rotterdam gebruikt. Om met name de liggingssituatie van het systeem met meer zekerheid te modeleren, is deze bepaald aan de hand van een proefsleuf in de voortuin van huis P151. Hierbij werd bevestigd dat de toplaag van de bodem zand betrof, met een deklaag van tegels. Daarnaast bleek een belangrijke aanscherping van de liggingsgeometrie mogelijk (zowel het verschil in diepteligging als het verschil in positie van de aansluitleiding ten opzichte van de warmte-aansluiting hebben waarschijnlijk een merkbaar effect op de warmte-beïnvloeding.). In Figuur 12 zijn de liggingssituaties op basis van de a priori inschatting op basis van GIS en de inschatting op basis van de proefsleuf weergegeven. De temperatuur van het water in de warmteleiding wordt op 30 °C gezet.

Er zijn drie berekeningen uitgevoerd om een gevoel te krijgen voor de invloed van de warmte-aansluiting: de situatie op basis van de eerste inschatting, de situatie op basis van de proefsleuf, en de situatie op basis van de proefsleuf maar dan zonder de aanwezigheid van de warmte-aansluiting.



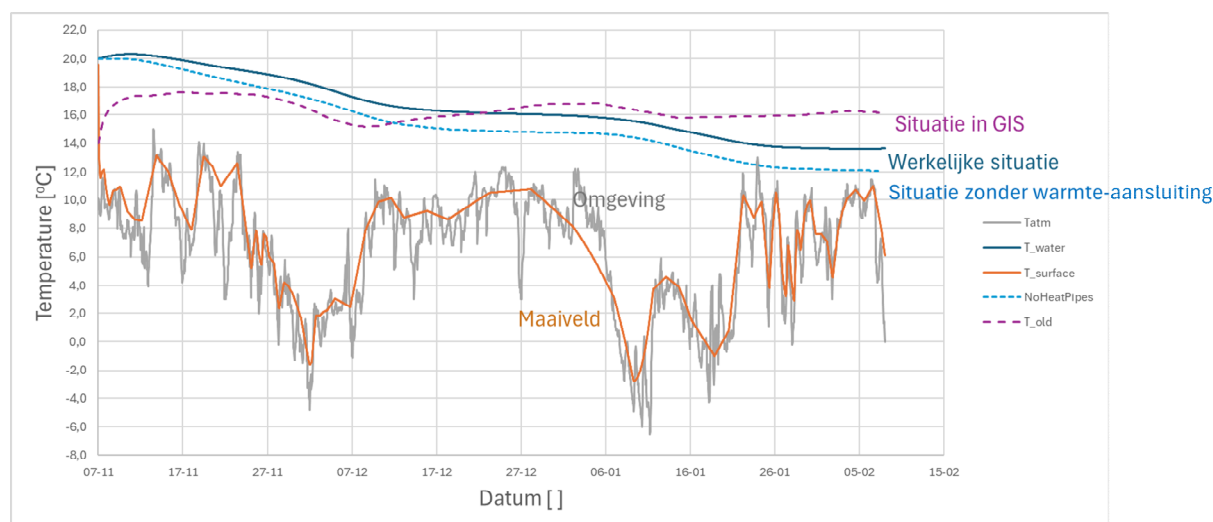
Figuur 12. Liggingssituatie van de aansluitleidingen van huis P151. (Links) inschatting op voorhand op basis van de beschikbare bedrijfsdata. (Rechts) dwarsprofiel op basis van metingen aan een proefsleuf. De aansluitleiding betreft PE, de warmte-aansluitleidingen zijn van staal met een inwendige PUR isolatie.

4.2 Resultaten en discussie

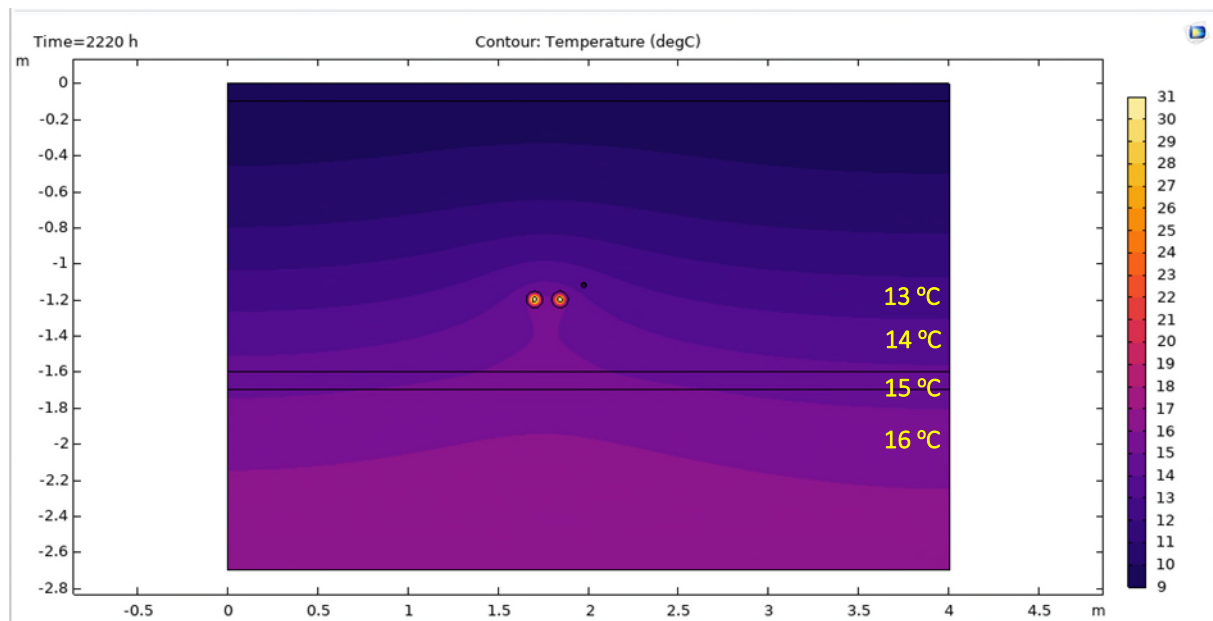
In Figuur 13 zijn de gesimuleerde tijdseries voor de verschillende situaties weergegeven. Simuleren op basis van GIS-data leidt tot een inschatting van een evenwichtstemperatuur van ongeveer 16 °C in de aansluitleiding. De werkelijke geometrie, op basis van de proefsleuf, leidt echter tot een inschatting van ongeveer 14 °C. In de hypothetische situatie waarin uit de werkelijke situatie de warmte-aansluiting wordt weggestreept, volgt een evenwichtstemperatuur van ongeveer 12 °C. Deze laatste temperatuur is tevens een redelijke inschatting voor de temperatuur van het water in de distributieleiding, aangenomen dat de distributieleiding en aansluitleiding ongeveer dezelfde diepteligging hebben (wat in deze situatie het geval is). Volgens deze inschatting heeft de warmtebeïnvloeding dus een omvang van maximaal 2 °C in deze situatie. Ook kan gesteld worden dat afwijkingen in de GIS-data leiden tot een afwijking van de ingeschatte warmtebeïnvloeding van 2 °C extra.

Tijdens de temperatuurmetingen op deze locatie op 7 februari 2024 (zie bijlage II, Figuur 18) is de hoogste temperatuur gemeten van het water uit de aansluitleiding, na 30 minuten stilstand, 13,7 °C en de bijbehorende laagst gemeten temperatuur van het water uit de distributieleiding, na 13 minuten doorstroming, 10,7 °C (waarbij moet worden opgemerkt dat de vorm van de meetserie suggereert dat die temperatuur nog werd beïnvloed door warmte-uitwisseling met de aansluitleiding en nog enkele tienden van °C verder zou dalen bij verdere doorstroming). De modelinschatting laat qua orde van grootte dus een vergelijkbaar verschil zien als de meting (Tabel 2, $T_F - T_E$), maar komt niet één op één overeen met de meetdata met een nauwkeurigheid minder dan 1 °C.

Uit de resultaten volgt een eerste ruwe inschatting van de afstanden waarover de warmte-aansluiting de drinkwatertemperatuur in de aansluitleiding beïnvloedt. In de extreme situatie die op voorhand uit het GIS werd ingeschat lag de aansluitleiding nagenoeg tegen de warmte-aansluiting (6 mm van wand tot wand), met een warmtebeïnvloeding van ongeveer 4 °C. Bij een afstand van ongeveer 133 mm van wand tot wand heerst een warmtebeïnvloeding van 2 °C. De warmtebeïnvloeding zal niet lineair afnemen met de afstand. In Figuur 14 is de temperatuurverdeling rond het leidingsysteem weergegeven. Daarin is te zien dat de aansluitleiding ofwel 10 cm hoger, ofwel 30 cm naar rechts gelegd moet worden om de warmtebeïnvloeding te reduceren naar 1 °C. Daarbij moet worden opgemerkt dat de oppervlaktetemperatuur in de doorgeredende situatie het systeem afkoelt (de bovengrond is kouder in februari). Omdat de aanwezigheid van warmtebeïnvloeding met name in de zomer onwenselijk is, heeft het vergroten van de horizontale afstand (of zelfs dieper leggen) waarschijnlijk de voorkeur. Er moeten andere situaties doorgeredend worden om daar beter inzicht in te krijgen.



Figuur 13. Modelling van de situatie bij huis P151. De watertemperatuur in de aansluitleiding bij lange stilstand op 7 februari 2024 is berekend voor drie situaties: de situatie zoals weergegeven in de informatiesystemen van drinkwaterbedrijf en warmteleidingbeheerder (paars, stippellijn), de situatie zoals aangetroffen in een proefsleuf (donkerblauw, doorgetrokken), en de hypothetische situatie zoals aangetroffen maar met de warmte-aansluiting weggestreept (lichtblauw, stippellijn). Om de invloed van de voorgeschiedenis van de situatie op 7 februari goed in te schatten het systeem voor de drie voorliggende maanden doorgeredend op basis van KNMI-weerdata (grijs).



Figuur 14. Contourplot van de temperatuurverdeling rond het doorgerekende systeem van aansluitleidingen, uitgerekend voor 'de werkelijke situatie' (donderblauwe lijn in Figuur 13).

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies

Een meetmethodiek is ontwikkeld voor het opsporen van warmtebeïnvloeding van de aansluitleiding. Eerste tests in het veld laten zien dat warmtebeïnvloeding van enkele °C voorkomt, en dat deze gemeten kan worden via de voorgestelde aanpak. Een inschatting van de warmtebeïnvloeding op basis van simulaties met het bodemtemperatuurmodel (situatie mét warmteleiding tegen situatie zonder warmteleiding) komt uit op een vergelijkbare warmtebeïnvloeding. Een eerste ruwe inschatting is dat er tientallen cm afstand tussen drinkwateraansluitleiding en warmte-aansluitleiding nodig zijn om minder dan 1 °C opwarming te krijgen.

5.2 Aanbevelingen

- Wanneer te grote opwarming van drinkwater als gevolg van een warmtebron bij de aansluitleiding wordt vermoed, wordt aanbevolen deze vermoedens te bevestigen met de hier ontwikkelde meetmethode. Het wordt aanbevolen om simulaties met het bodemtemperatuurmodel alleen in te zetten bij de duiding van klachten wanneer de precieze liggingssituatie bevestigd kan worden.
- De interpretatie van de meetresultaten gebeurde in dit project door kwalitatieve relaties te leggen met fysische processen. Het is aan te bevelen om een meer kwantitatieve beschouwing op te zetten rond het verloop van de watertemperatuur bij doorstroming van aansluitleiding en installatie tijdens de meting, bijvoorbeeld met de modellen gebruikt in (Hillebrand et al., 2020).
- Om te grote opwarming in nieuw aan te leggen leidingen te voorkomen zou een uitgebreide scenariostudie met het bodemtemperatuurmodel gebruikt kunnen worden om de correlatie tussen liggingssituatie en opwarming in kaart te brengen, aan de hand waarvan richtlijnen voor aanleg (minimale afstanden) kunnen worden onderbouwd. De ontwikkelde meetmethode kan een rol spelen in het valideren van de bevindingen door systemen overeenkomstig met de scenario's (bij mensen thuis of nagebouwd in een proefopstelling) door te meten en de gemeten warmtebeïnvloeding te vergelijken met de voorspelde warmtebeïnvloeding.
- Verschillende metingen lieten een substantiële verandering van de temperatuur zien tijdens doorstroming van leidingen met kleine diameters over enkele meters. Dit suggereert dat de binneninstallatie een doorslaggevende rol zal hebben waar het gaat over het al dan niet bereiken van de 25 °C aan de tap. Deze suggestie is in strijd met een eerdere modelstudie (Hillebrand *et al.*, 2020). Het is aan te bevelen hier meer inzicht in te verkrijgen met behulp van toegespitste metingen om het model te valideren (bijvoorbeeld door onder gecontroleerde verbruiksomstandigheden de watertemperatuur bij de watermeter en bij de tap te monitoren voor enige tijd om de verandering tijdens doorstroming van de installatie bloot te leggen).

Referenties

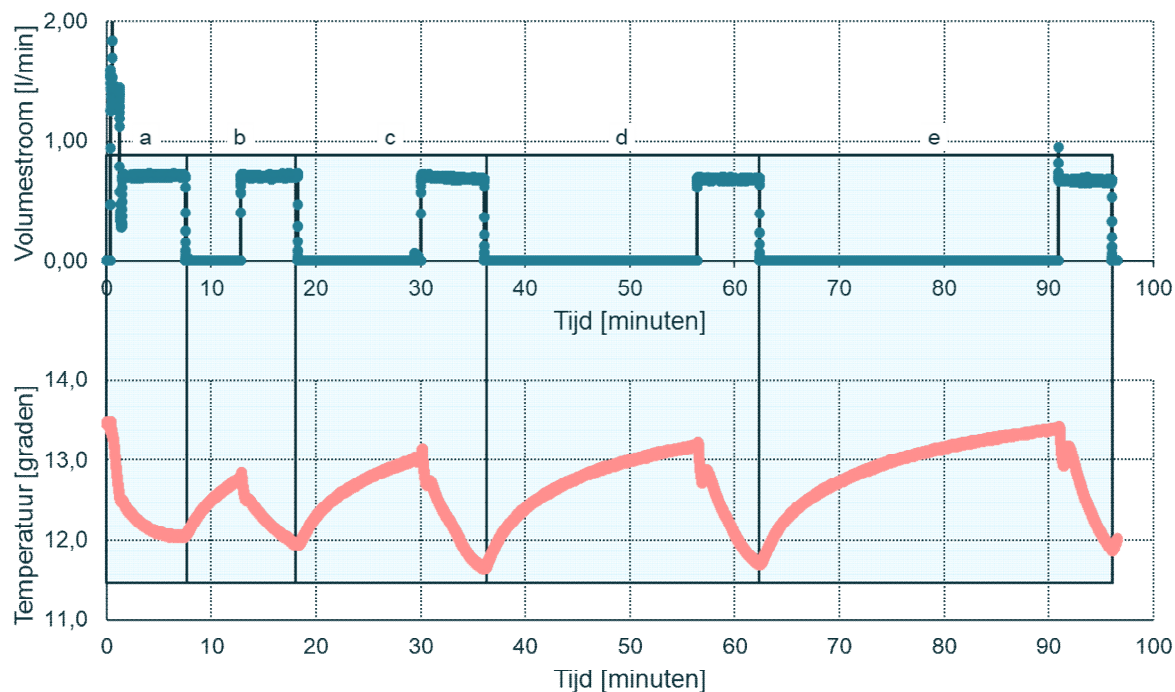
- Blokker, E.J.M., en Quan, P. (2022). "Invloed warmtenetten op drinkwatertemperatuur: inzicht in invloed onderlinge afstanden". Rapport KWR 2022.121, KWR Water Research Institute, Nieuwegein.
- Hillebrand, B., Blokker, E.J.M., en Van Summeren, J. (2020). "Modellering van de opwarming van drinkwater in drinkwaterinstallaties". Rapport KWR 2020.29, KWR Water Research Institute, Nieuwegein.
- NEN 1006. "Algemene voorschriften voor leidingwaterinstallaties."
- NEN 2768+A1:2018. "Meterruimten en bijbehorende bouwkundige voorzieningen in woningen."
- NEN-EN 806. "Eisen voor drinkwaterinstallaties in gebouwen"
- PCD 1-1: 2015. "Hygiënecode Drinkwater – Algemeen."
- van Esch, J.M. (2022) Engine, BTM+ model and expert tool. Rapport 11205555-006-GEO-0001-v2-engine, Deltares, Delft.
- Voitel, M. (2022). "Opwarming drinkwater ten gevolge van aansluitleidingen warmtenetten: Onderzoek meetmethoden." Rapport 22.011991. Waternet, Amsterdam (niet openbaar).
- Zeidan, M., en van Summeren, J.R.G. (2024). "Technical Use Document BTM+ COMSOL". Rapport BTO 2024.204(s), KWR water Research Institute, Nieuwegein (niet openbaar).

I Gebruik van de meetapparatuur

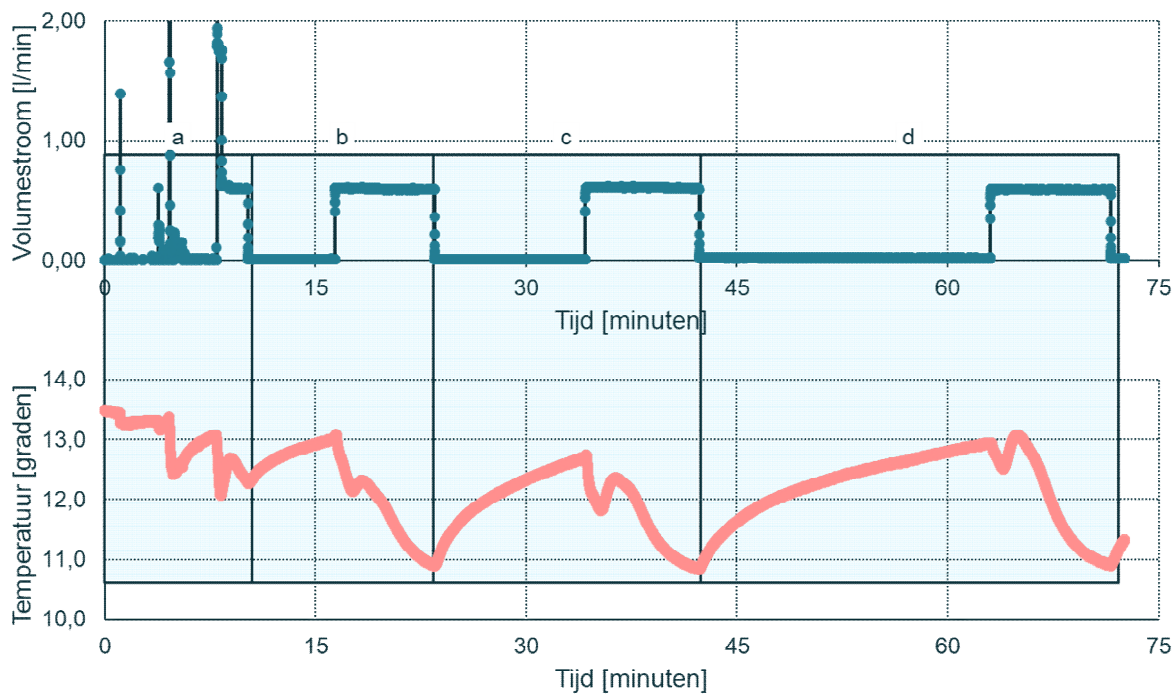
De algemene procedure om de meetapparatuur die is beschreven in Paragraaf 2.2 te gebruiken is als volgt:

1. Zet de opstelling klaar:
 - a. Open koffer, en plaats de aardingsklip aan een metalen leiding om aarding te krijgen.
 - b. Schakel accu aan (lamp op accu brandt groen) en start de laptop.
 - c. Maak een USB verbinding (RS232 poort) met een laptop met de programma's FlowDDE en FlowPlot daarop geïnstalleerd (deze software hoort bij de gebruikte flowmeter en bijbehorende handleidingen zijn gratis beschikbaar op de website van Bronkhorst).
 - d. Positioneer de uitvoerslang zodanig dat water zonder problemen uit de opstelling weg kan lopen (op straat of in een emmer). Bevestig de schroefklem op de uitvoerslang om daar later de waterstroom mee te beheersen.
 - e. Maak een aansluiting van de aansluitslang op de aansluiting in de meterkast, ná de hoofdkraan (in dit project bracht een monteur van Evides deze verbinding tot stand door een aftapkraan net na de hoofdkraan gedeeltelijk te demonteren en de aansluitslang daarop te verbinden met specifieke verloopstukjes).
2. Zet de meetsoftware aan:
 - a. Start FlowDDE. In dit programma, ga naar "Communication > Communication settings" en bevestig dat de Baud rate 38400 is. Daarna ga naar "Communication > Open communication". Als alles goed is ziet men het bericht "Server is active and ready for any client", dat wil zeggen dat de metingen begonnen kunnen worden.
 - b. Start FlowPlot. Ga eerst naar "Select Parameters". Voor de eerste meting kies "Measure" en voor de tweede "Temperature" en geef ze allebei bijbehorende kleuren om ze netje op het scherm te kunnen visualiseren. Dit programma geeft vanaf dan real-time de meetwaarden van de flowmeter weer.
 - c. Ga dan naar "Extra > Options > File locations". Vink de optie "Save plotdata to spreadsheet file" aan om ervoor te zorgen dat de gemeten data daadwerkelijk opslaan wordt.
 - d. Ga dan naar "Instrument Settings". Bij "Basic > Fluid settings > Capacity and unity", kies "Volumetric flow rate" voor "Unit type" en eenheden "L/min".
 - e. Daarna kan de "Start" knop op het scherm gedrukt worden en op het scherm ziet men twee lijnen – één voor volumestroom en één voor temperatuur. Allebei worden als functie van tijd getoond. De temperatuur wordt met zijn absolute waarde getoond terwijl de volumestroom als een percentage van de maximale waarde (100% = 10 l/min voor water).
3. Metingen:
 - a. Voordat de stroming begonnen wordt, druk op de "#" knop op de flowmeter om deze te initialiseren.
 - b. Laat water door de opstelling lopen via een stromingsprotocol naar keuze, terwijl de metingen gelogd worden door de software. De waterstroom kan worden gestart via de hoofdkraan, en de snelheid van de waterstroom kan worden bijgesteld via de schroefklem op de uitvoerslang.
4. Afsluiten:
 - a. Stop de stroming.
 - b. Druk op "Stop" in FlowPlot en sluit FlowPlot af.
 - c. Ga naar FlowDDE, kies "Communication > Close communication", sluit FlowDDE af.
 - d. Verwijder de USB kabel, sluit accu af, koppel buizen af, herstel de waterverbinding en verwijder de klip voor aarding.
 - e. Pak de koffer en de laptop weer in.

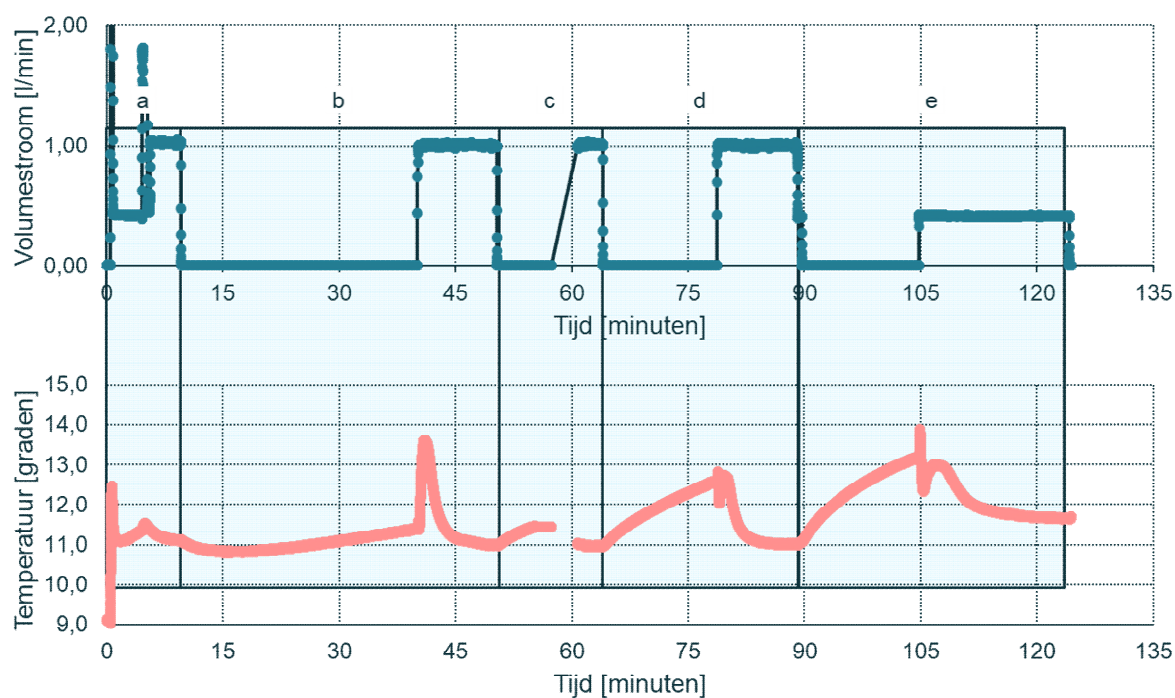
II Meetseries bij woningen



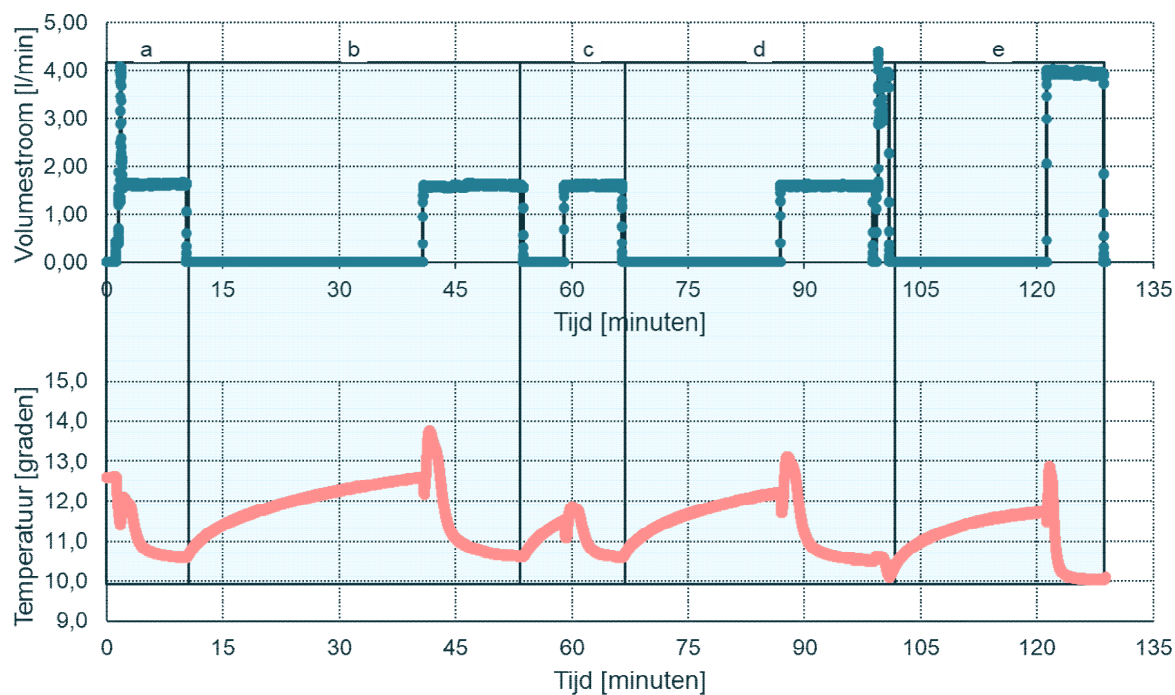
Figuur 15: Globaal overzicht van de gemeten data bij huis L12. Blok a markeert voorbereidende activiteiten; blokken b t/m e markeren verschillende deelmetingen van de temperatuur van waterstromen die volgen op steeds een andere periode van stilstand.



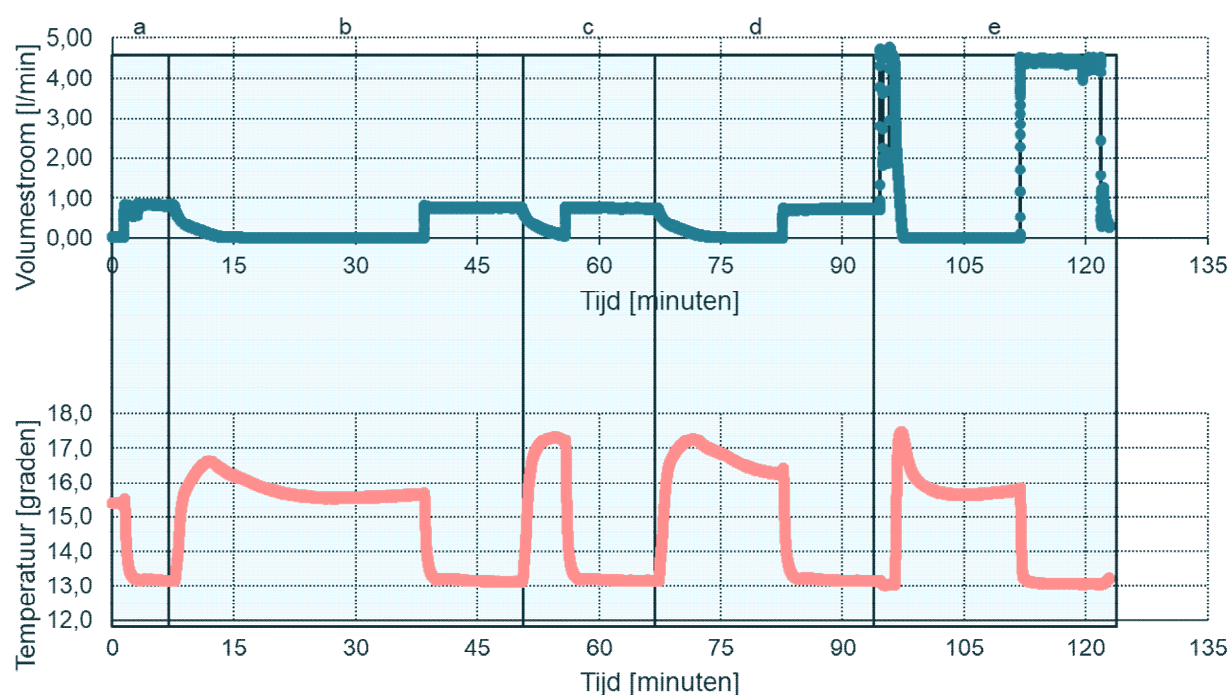
Figuur 16: Globaal overzicht van de gemeten data bij huis P179. Blok a markeert voorbereidende activiteiten; blokken b t/m d markeren verschillende deelmetingen van de temperatuur van waterstromen die volgen op steeds een andere periode van stilstand.



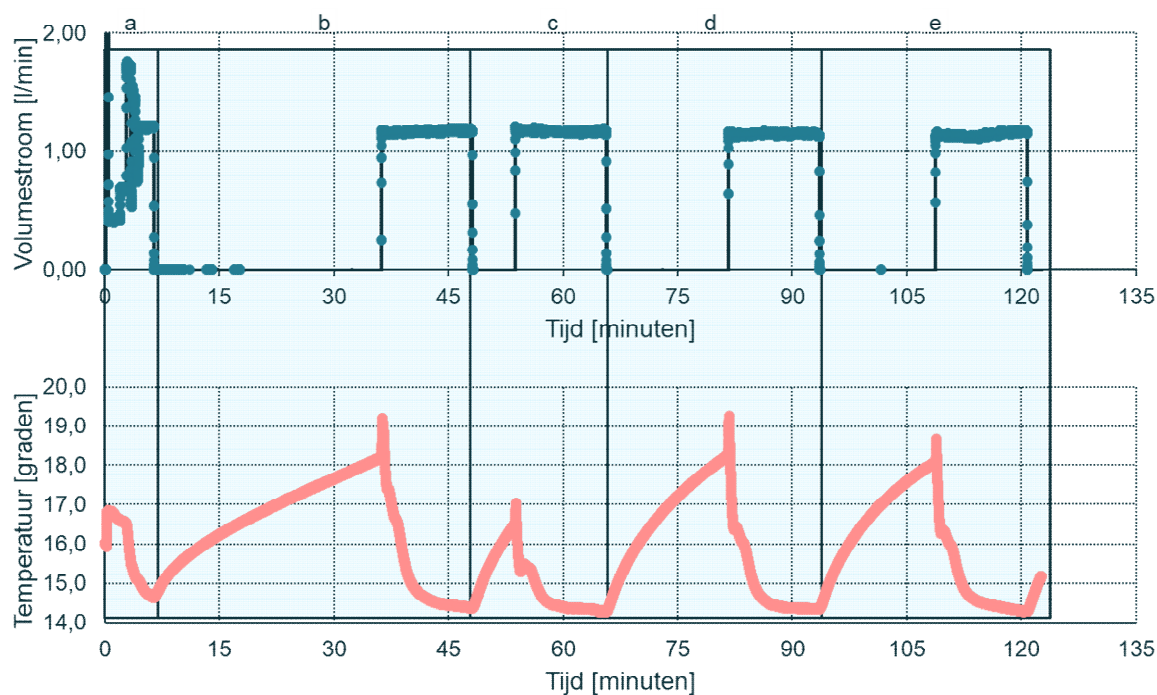
Figuur 17: Globaal overzicht van de gemeten data bij huis G87. Blok a markeert voorbereidende activiteiten; blokken b t/m e markeren verschillende deelmetingen van de temperatuur van waterstromen die volgen op steeds een andere periode van stilstand. Tijdens blok c mist data omdat de verbinding tussen laptop en sensor een tijd verstoord werd.



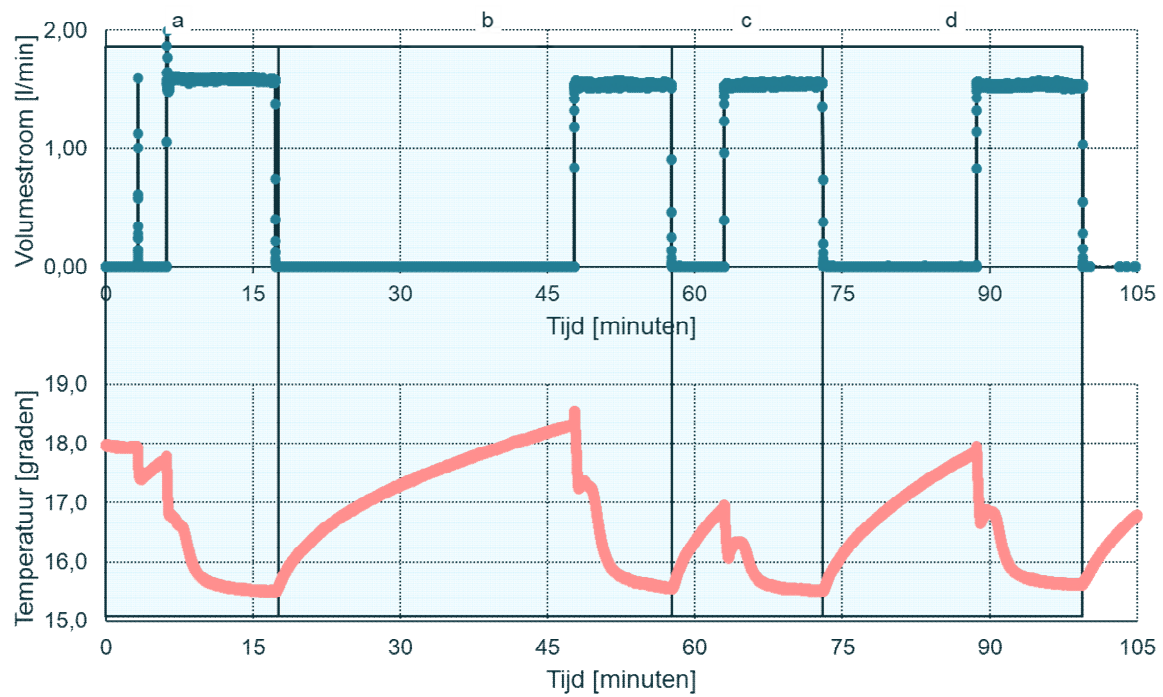
Figuur 18: Globaal overzicht van de gemeten data bij huis P151 (op 7 februari 2024). Blok a markeert voorbereidende activiteiten; blokken b t/m e markeren verschillende deelmetingen van de temperatuur van waterstromen die volgen op steeds een andere periode van stilstand.



Figuur 19: Globaal overzicht van de gemeten data bij huis B92. Blok a markeert voorbereidende activiteiten; blokken b t/m e markeren verschillende deelmetingen van de temperatuur van waterstromen die volgen op steeds een andere periode van stilstand.



Figuur 20: Globaal overzicht van de gemeten data bij huis P211. Blok a markeert voorbereidende activiteiten; blokken b t/m e markeren verschillende deelmetingen van de temperatuur van waterstromen die volgen op steeds een andere periode van stilstand.



Figuur 21: Globaal overzicht van de gemeten data bij huis P151 (op 1 mei 2014). Blok a markeert voorbereidende activiteiten; blokken b t/m d markeren verschillende deelmetingen van de temperatuur van waterstromen die volgen op steeds een andere periode van stilstand.

III Specifieke modelinvoer voor simulaties huis P151

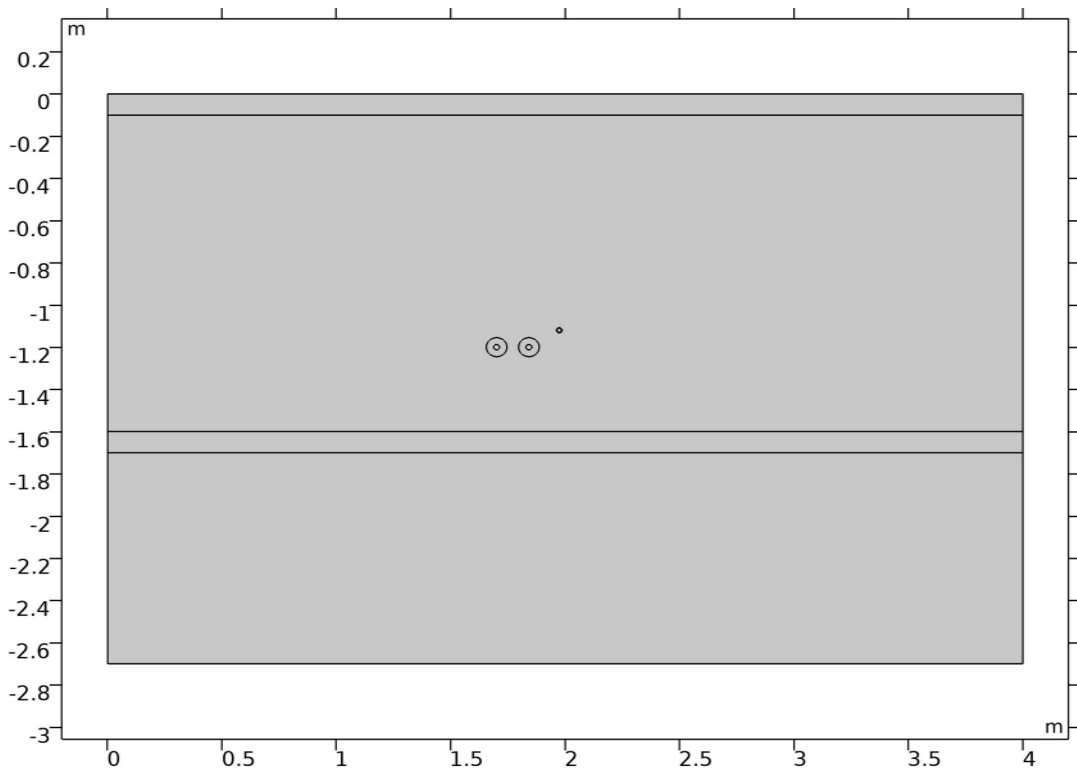
III.I Parameters

PARAMETERS

Name	Expression	Value	Description
a1	0.8	0.8	
a2	30	30	
a3	-10 [W/m^2]	-10 W/m ²	
ad	0.17372	0.17372	friction coefficient drag
alpha	0.12	0.12	alpha
Ca	1.013 [kJ/(kg)/degC]	1013 J/(kg·K)	
d1	25.7 [mm]	0.0257 m	inder diameter
D1	90 [mm]	0.09 m	outer-Diameter of Pipe 1
d2	19.6 [mm]	0.0196 m	
D2	25 [mm]	0.025 m	
d3	25.7 [mm]	0.0257 m	
D3	90 [mm]	0.09 m	
D4	450 [mm]/2	0.225 m	
D5	450 [mm]/2	0.225 m	
dis0	1[m]	1 m	
dis1	dis0 + 0.7	1.7 m	distance from baseline 0
dis2	dis3 + (45 + 75 + 12.5)[mm]	1.9735 m	
dis3	dis1 + (45 + 51 + 45)[mm]	1.841 m	
dis4	10.265[m]	10.265 m	
dis5	11.015[m]	11.015 m	
dt	3600 [s]	3600 s	
e4	130 [mm]	0.13 m	
e5	130 [mm]	0.13 m	
epsilon	0.95	0.95	
g	9.81 [m/s^2]	9.81 m/s ²	
gama	0.067[kPa/degC]	67 Pa/K	
gamaw	2.45 [MJ/kg]	2.45E6 J/kg	gama water
H	3 [m]	3 m	total ground Depth
h1	1.2 [m]	1.2 m	depth of pipe 1
h2	1.12 [m]	1.12 m	
h3	1.2 [m]	1.2 m	depth pipe 3
h4	1.1[m]	1.1 m	
h5	1.1 [m]	1.1 m	
hrl	10 [m]	10 m	
k	0.4	0.4	
k3	0.3 [W/(m*K)]	0.3 W/(m·K)	Soil thermal conductivity

Name	Expression	Value	Description
Num	3	3	number of pipes
pa	1.2 [kg/m ³]	1.2 kg/m ³	
Qf	0 [W/m ²]	0 W/m ²	Urban heat flux
ra	30 [s/m]	30 s/m	
raw	1000 [kg/m ³]	1000 kg/m ³	water density
rg	30 [s/m]	30 s/m	
rs	5.71429[s/m]	5.7143 s/m	
sigma	5.7e-08 [W/(m ² *K ⁴)]	5.7E-8 kg/(s ³ ·K ⁴)	Stefan Boltzmaans constant
Smax	0.48 [mm]	4.8E-4 m	
Smin	0 [mm]	0 m	
T_atm0	32	32	tempreture atm
T_RL0	20	20	tempreture RL
T_ss0	16	16	tempreture SS
W	4 [m]	4 m	total ground width
z0	1 [m]	1 m	
zm	10 [m]	10 m	

III.II Geometry



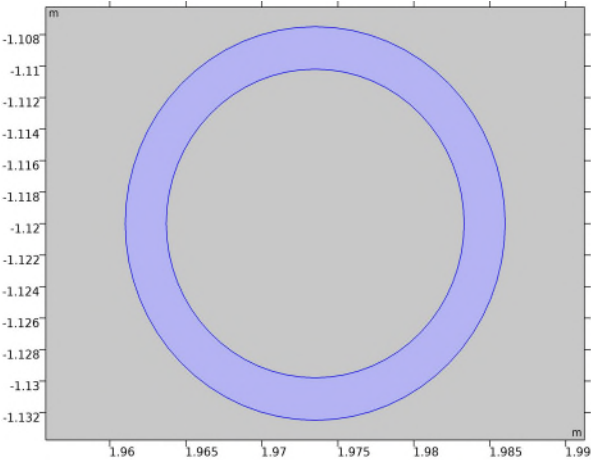
Geometry 1

UNITS

Length unit	m
Angular unit	deg

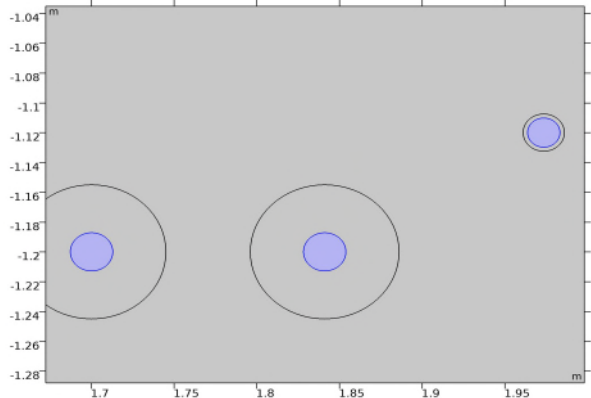
III.III Materials

PVC



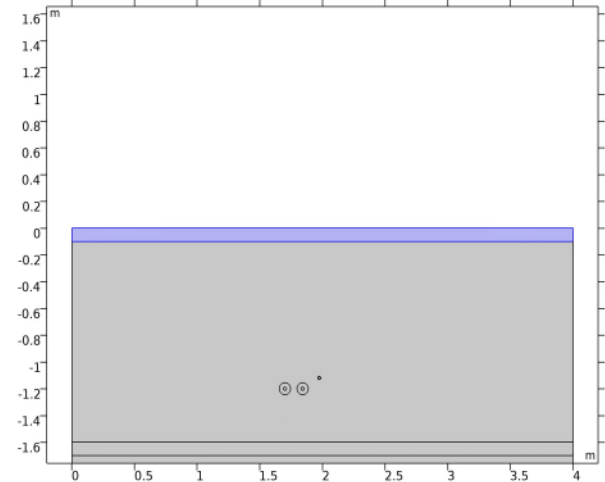
Geometric entity level	Domain
Selection	Geometry geom1: Dimension 2: Domain 9

Water, liquid



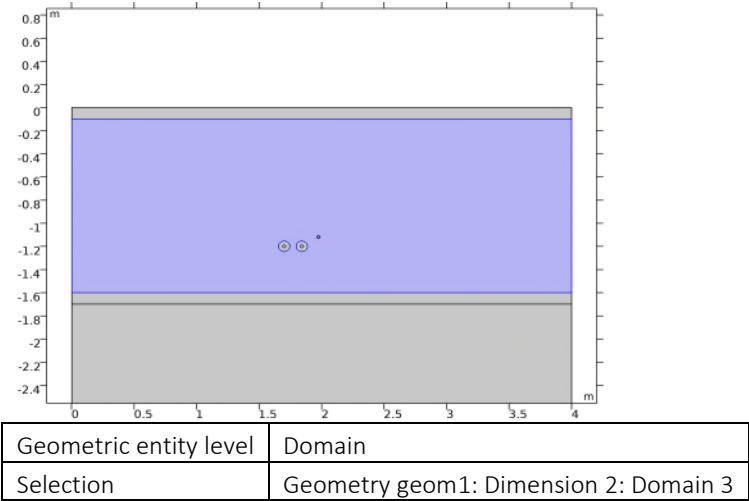
Geometric entity level	Domain
Selection	Geometry geom1: Dimension 2: Domains 6, 8, 10

GMDz

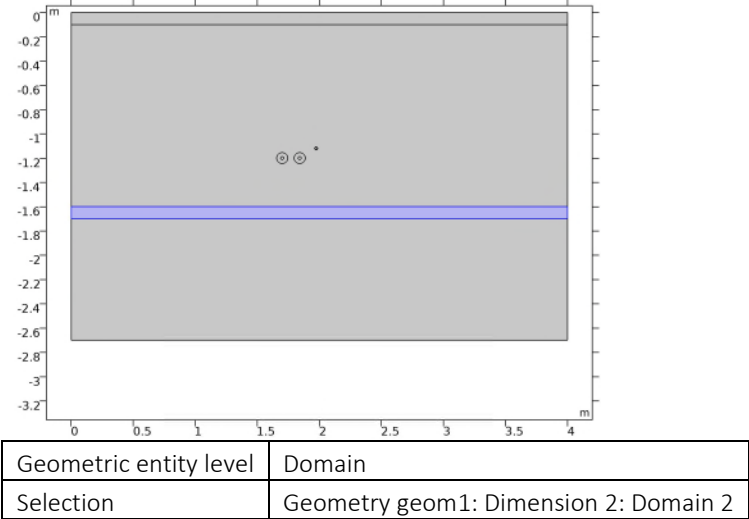


Geometric entity level	Domain
Selection	Geometry geom1: Dimension 2: Domain 4

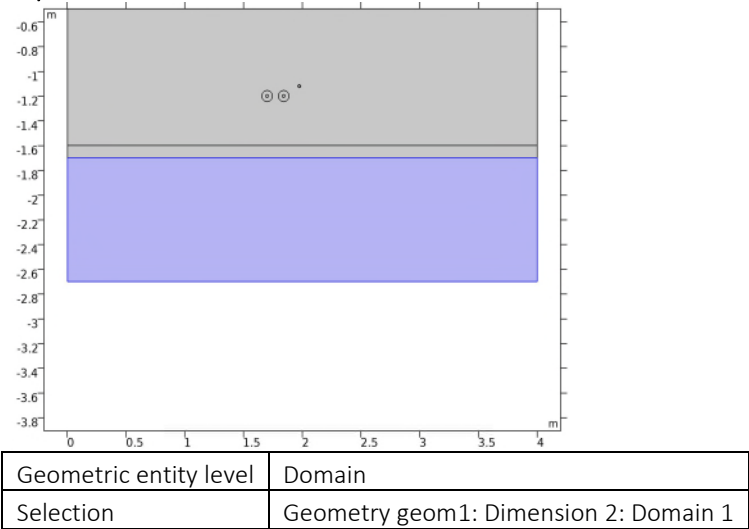
Sand



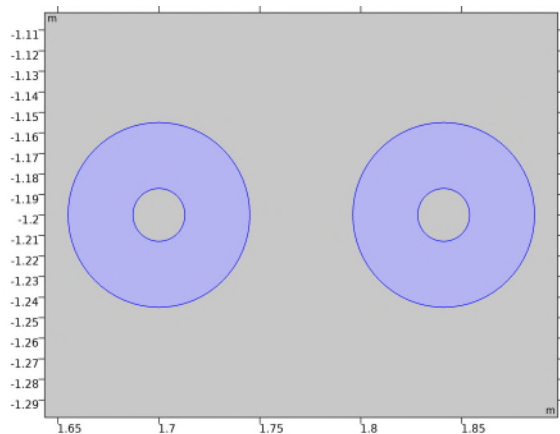
Peat



Clay



PURmix



Geometric entity level	Domain
Selection	Geometry geom1: Dimension 2: Domains 5, 7