

**Validatie water-
temperatuurmodel (WTM+)**
Voor effectbepaling TED-systemen
– Deelonderzoek Leeuwarden

KWR 2023.011

Door

dr. J.R.G. (Joost) van Summeren (KWR)

ir. A. (Andreas) Moerman (KWR)

24 januari 2023



Auteurs: dr. J.R.G. (Joost) van Summeren, ir. A. (Andreas) Moerman (KWR)
24 januari 2023

Kwaliteitsborger: dr. ir. E.J.M. (Mirjam) Blokker (KWR)

KWR 2023.011
Versie 1

Dit project is uitgevoerd als onderdeel van het Innovatieplan WarmingUP. Dit is mede mogelijk gemaakt door subsidie van de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) in het kader van de subsidieregeling Meerjarige Missiegedreven Innovatie Programma's (MMIP), bij RVO bekend onder projectnummer TEUE819001. WarmingUP geeft invulling aan MMIP-4 – Duurzame warmte en koude in gebouwde omgeving en levert daarmee een bijdrage aan Missie B – Een CO₂-vrije gebouwde omgeving in 2050.

Projectnummer
403185/003

Keywords
TED, thermische energie, potentieel

Jaar van publicatie
2023

Meer informatie
Andreas Moerman
T 030 6069 605
E andreas.moerman@kwrwater.nl

Januari 2023 ©

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden veeleevoudigd, 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 voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	4
1.1	Aanleiding	4
1.2	Doel	4
1.3	Begripsbepaling TED	5
1.4	Samenhang met andere WarmingUP-rapporten	6
1.5	Samenhang met andere onderzoeksprogramma's	6
2	Achtergrond drinkwater	7
2.1	Productie en distributie van (drink)water	7
2.2	Temperatuur van drinkwater	8
2.3	TED in relatie tot ongewenste opwarming van drinkwater	9
3	Gegevens en methode	10
3.1	WTM+ model	10
3.2	Case studies	12
3.3	Validatieprocedure	13
3.4	Gebruikte gegevens	14
3.5	Selectie validatiegebied	17
4	Validatieresultaten	21
4.1	Inleiding	21
4.2	Genormaliseerde opwarming	21
4.3	Thermische invloedssfeer	23
5	Discussie	27
6	Conclusies en aanbevelingen	29
6.1	Conclusies	29
6.2	Aanbevelingen voor vervolgonderzoek	29
7	Referenties	31

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Bijna 40% van het energiegebruik in Nederland wordt gebruikt voor de warmtevoorziening. Om de klimaatdoelstellingen van Parijs te halen is de noodzaak om de warmtevoorziening te verduurzamen dus hoog. Aquathermie kan een substantiële bijdrage leveren aan duurzame warmte (en koude) in de gebouwde omgeving. Door (1) de winning van warmte en koude uit het oppervlaktewater (TEO), drinkwater (TED) of afvalwater (TEA) te koppelen aan (2) laag thermische opslagsystemen in de bodem en (3) distributie via slimme warmtenetten kan aquathermie in potentie voorzien in 50% van de warmtevraag. Aquathermie wordt op verschillende plekken succesvol toegepast.

Wanneer warmte (of koude) aan het drinkwater wordt onttrokken door een TED-installatie, dan wordt het water in eerste instantie kouder (of warmer) en kan vervolgens benedenstrooms in het leidingnet weer opwarmen (of afkoelen) onder invloed van de bodemtemperatuur. Dit heeft een effect op de temperatuur van het drinkwater aan de tap, maar ook op temperatuur-gerelateerde waterkwaliteitsprocessen in het leidingnet (groei van microbiologie, uitloging van anorganische stoffen, etc.). Ook is er een effect op de bodemtemperatuur rond de benedenstroomse leidingen; deze zal afkoelen (of opwarmen) als gevolg van de warmte- (of koude-)onttrekking. Deze afkoeling (of opwarming) van de bodem vlak na de TED-installatie zorgt ervoor dat de opwarming (of afkoeling) van het drinkwater door de bodem vertraagd wordt.

Het uiteindelijke temperatuureffect wordt bepaald door zowel de temperatuur ter plaatse van de TED-installatie als de warmte-uitwisseling met de bodem rondom de leidingen benedenstrooms van het TED-systeem. Wat precies benedenstrooms is – en daarmee hoeveel invloed de bodem heeft – wordt bepaald door de lay-out van het leidingnet, de diameters van de leidingen en de drinkwatervraag. Wanneer in een voorzieningsgebied meerdere TED-installaties actief zouden zijn zal er sprake zijn van een dynamisch spel van opwarmen en afkoelen. Om de effecten op de waterkwaliteit te kunnen beschrijven voordat zo'n systeem wordt geïnstalleerd is het nodig om een gevalideerd model te hebben. Dit is van belang om bij toekomstige modelstudies (1) zicht te hebben op de betrouwbaarheid van de uitkomsten en (2) de juiste parameters te kunnen kiezen.

Met het gevalideerde model kan het effect van een of meer TED-installaties in een leidingnet worden gemodelleerd en kunnen voor- en nadelen van TED worden bepaald. Daarmee kan een goede afweging worden gemaakt voor de potentie van TED in de energietransitie. Hetzelfde model is ook geldig voor de grotere afvalwaterleidingen (persleidingen), zodat ook de potentie van TEA (thermische energie uit afvalwater) op dezelfde manier beoordeeld kan worden.

1.2 Doel

In voorgaande projecten heeft KWR watertemperatuurmodel *WTM+* ontwikkeld waarmee de temperatuur van het leidingwater tijdens distributie wordt voorspeld (Van der Zwan e.a. (2019); Blokker e.a. (in voorbereiding)). Het doel van het project beschreven in dit rapport is validatie van het *WTM+* model voor leidingdiameters die relevant zijn voor TED. Dit rapport beschrijft de validatie van het *WTM+* model met praktijkgegevens van het distributiegebied rond Leeuwarden (leveringsgebied Vitens). Vitens stelde hiervoor meetgegevens beschikbaar van de temperatuur en het verbruik in het distributienet

(sensoregegevens) en bij de pompstations (online meetgegevens), alsmede een hydraulisch leidingnetmodel. Hiermee is na te gaan in hoeverre de opwarming zoals berekend met het *WTM+* overeenkomt met de uit de meetgegevens afgeleide opwarming, en welke modelparameters de beste overeenkomst geven.

De in dit rapport beschreven case study Leeuwarden vormt de validatie van het *WTM+* samen met twee andere, onafhankelijk uitgevoerde case studies: Kralingen (Evides) en Almere (Vitens), uitgevoerd in TKI-project ENGINE (Van Esch (2022); Blokker e.a. (in voorbereiding))

1.3 Begripsbepaling TED

Onder het begrip TED (Thermische Energie uit Drinkwater) wordt thermische energie verstaan waarvan drinkwaterbedrijven (Figuur 1) bronhouder zijn. TED is daarbij onder te verdelen in de volgende brontypen:

- thermische energie uit drinkwater (reservoirs, transportleidingen, distributieleidingen);
- thermische energie uit ruwwater (transportleidingen voor voorgezuiverd ruwwater).



Figuur 1. Drinkwaterbedrijven in Nederland. Bron: Vewin Drinkwaterstatistieken 2017.

1.4 Samenhang met andere WarmingUP-rapporten

Dit rapport is onderdeel van project 3B van WarmingUP (Effecten van Aquathermie). Binnen dit project loopt ook een deelproject waarin de microbiologische effecten van TED op de drinkwaterkwaliteit bepaald worden¹. De uitkomsten van deze beide projecten (zijnde (1) betrouwbare bepaling van benedenstroomse temperatuureffecten en (2) microbiologische effecten in de warmtewisselaar van het TED-systeem) vormen samen de basis om betrouwbare uitspraken te kunnen doen over de effecten van TED-systemen op distributie van drinkwater.

1.5 Samenhang met andere onderzoeksprogramma's

Dit rapport (en het deelproject waarvoor het geschreven is) is nauw verwant aan het TKI-project ENGINE, gefinancierd vanuit het TKI Watertechnologie programma en projectpartners. De studie beschreven in dit rapport (case Leeuwarden) betreft een aanvullende analyse op het werk dat al voor TKI ENGINE uitgevoerd is. Samen met de beschrijving van de resultaten van TKI ENGINE (Blokker e.a. (in voorbereiding)) vormt dit project een brede basis voor de validatie van het *WTM+* model. De focus van TKI ENGINE was de validatie van het *WTM+* model onder invloed van bodemtemperatuur zoals deze door klimaat en ondergrondse warmtebronnen (zoals een warmtenet) worden beïnvloed. De onderzochte diameters van de drinkwaterleidingen in de cases aldaar waren 110 en 160 mm. De casestudie in WarmingUP is zonder de ondergrondse warmtebron, en betreft een grotere diameter (> 300 mm). TED-systemen worden typisch op deze grotere leidingdiameters geplaatst, gezien volumestromen in deze leidingen en de daarmee samenhangende potentie voor aquathermie uit drinkwater (TED).

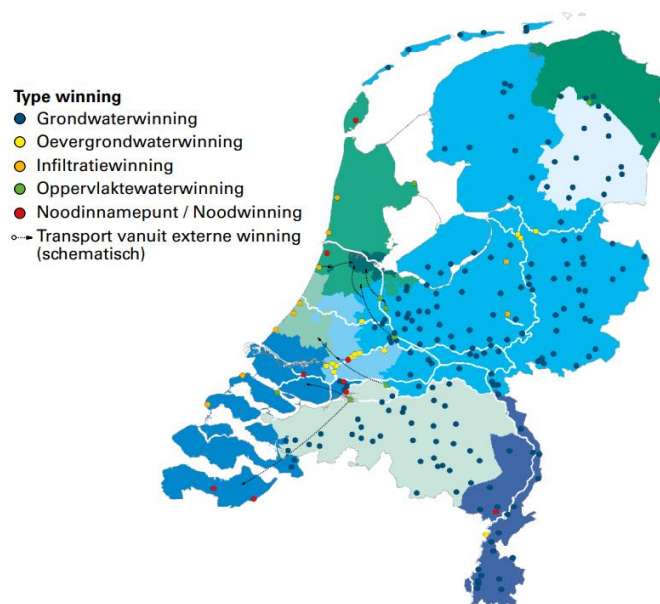
¹ Rapport KWR 2023.010, op moment van publicatie van dit rapport nog in voorbereiding.

2 Achtergrond drinkwater

2.1 Productie en distributie van (drink)water

Drinkwater wordt in Nederland gemaakt uit grondwater of (geïnfiltreerd) oppervlaktewater (Figuur 2). Na het zuiveringsproces vindt distributie van het drinkwater plaats via een leidingstelsel, bestaand uit transportleidingen (300 – 1500 mm)² die het drinkwater transporteren naar een ringstructuur van secundaire leidingen (160 – 300 mm). Deze leidingen voeden weer zogenaamde tertiaire leidingen (< 160 mm) die het water distribueren naar aansluitleidingen naar de klanten. Dit leidingstelsel heeft een totale lengte van ca. 120.000 km in Nederland. In 2019 werd 1.187 Mm³ drinkwater geproduceerd en gedistribueerd (Vewin, 2020).

Al dit water bevat thermische energie die middels een warmtewisselaar uit het water gewonnen kan worden, voordat het verder gedistribueerd wordt.



Figuur 2. Overzicht van waterwinningen ten behoeve van drinkwaterproductie. Bron: Vewin Statistiek 2017.

Bij zogenaamde infiltratiewinningen (Figuur 2) is sprake van transport van voorgezuiverd ruwwater vanuit een oppervlaktewaterwinning naar een infiltratiepunt, zoals de Waterleidingduinen bij Amsterdam. Dit gebeurt doorgaans middels grote leidingen en in grote hoeveelheden.

Voor de meeste leidingen geldt dat de volumestromen van drinkwater in het leidingnet gedurende een etmaal sterk fluctueren. Dit komt doordat het drinkwaterverbruik bij de klant de stroming in het leidingnet bepaalt en het drinkwaterverbruik fluctueert sterk over de dag. Voor de meeste leidingen geldt daarom dat er 's nachts bijna geen water door de leiding stroomt, terwijl er 's morgens tussen 7.00 en

² De genoemde spreiding van diameters is een indicatie. Het onderscheid dat wordt beschreven is een functioneel onderscheid, en valt alleen grofweg samen met onderscheid in diameter.

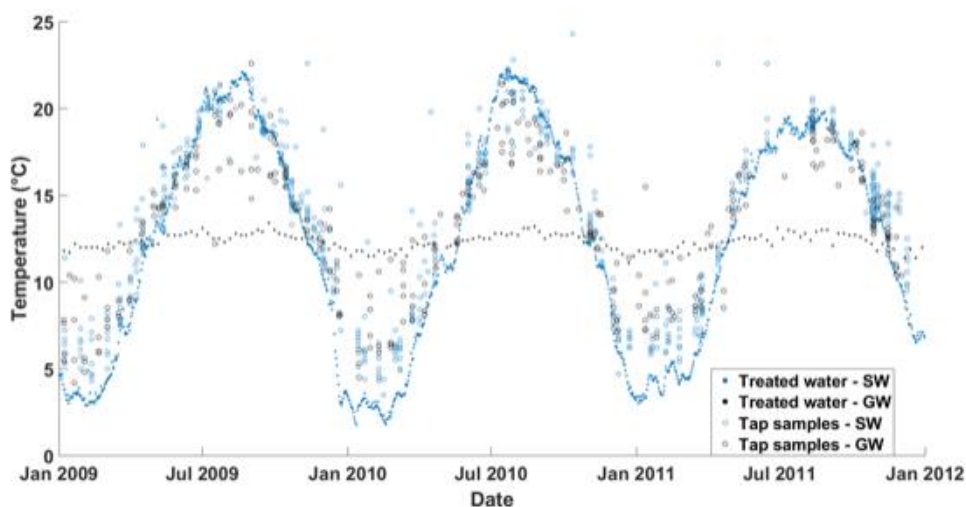
8.00 uur en 's avonds tussen 17.00 en 19.00 pieken in volumestromen optreden. Met name de avondpiek is in de zomer nog hoger vanwege o.a. het beregenen van tuinen met drinkwater.

Wanneer zich benedenstrooms van een waterleiding een buffer (reinwaterreservoir genoemd) bevindt, zal deze leiding een meer constante volumestroom hebben omdat het reservoir de fluctuaties benedenstrooms van het buffer opvangt. Een dergelijk constante bedrijfsvoering is doorgaans alleen het geval bij (zeer) grote transportleidingen, bijvoorbeeld voor het transport van grondwater of voorgezuiverd ruwwater naar een zuivering. Reinwaterreservoirs zijn doorgaans op locatie van een drinkwaterzuivering te vinden om een zuiveringsproces zo constant mogelijk te kunnen bedrijven. Op sommige locaties zijn ook reservoirs in het distributienet te vinden.

2.2 Temperatuur van drinkwater

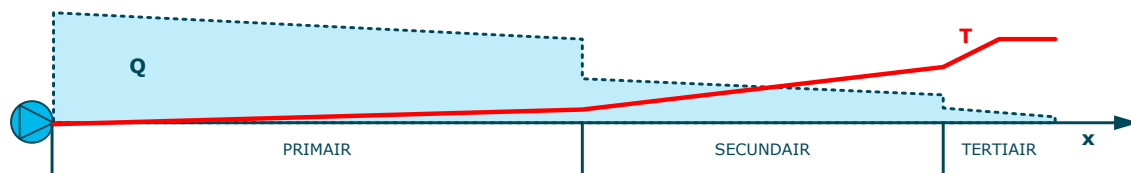
Om de mogelijkheden van TED goed te begrijpen is het allereerst van belang om begrip te hebben van de temperatuur van het drinkwater in het leidingnet tussen bron en klant. De temperatuur van het drinkwater is gedurende het transport in het drinkwaterleidingnet niet constant. Uit onderzoek is gebleken dat het drinkwater de bodemtemperatuur aangenomen heeft wanneer het de klant bereikt. Dit komt door de warmte-uitwisseling met de bodem tijdens het verblijf in het drinkwaterleidingnet. De invloed van de bodem op de drinkwatertemperatuur is het kleinst in grote transportleidingen en het grootst in de kleinere diameter leidingen in het distributienet. Afhankelijk van de bron (grondwater, oppervlaktewater) en het seizoen warmt het drinkwater op of koelt het af gedurende het verblijf in het drinkwaterleidingnet. Vanuit het perspectief van warmtelevering betekent dit dat het drinkwaterleidingnet in de zomer fungeert als een 'collector voor bodemenergie', en TED eigenlijk een manier is om bodemenergie te winnen.

Over het algemeen kan worden aangenomen dat het drinkwater dat aankomt bij de klant de bodemtemperatuur rondom de distributieleiding heeft aangenomen. Dit blijkt ook uit vergelijkingen tussen temperatuurmetingen aan de tap, voor zowel drinkwater gemaakt uit oppervlaktewater, als drinkwater gemaakt uit grondwater (Figuur 3, volgende pagina).



Figuur 3. Resultaat van temperatuurmetingen aan de tap gedurende een jaar. De lijnen geven de brontemperatuur aan gedurende het jaar. Voor grondwaterbronnen (GW) is deze temperatuur redelijk constant, voor oppervlaktewaterbronnen (SW) fluctueert deze temperatuur met de seizoenen. De figuur laat goed zien dat de brontemperatuurverschillen bij de klant ("tap samples") niet meer merkbaar zijn; de temperatuur van het water dat geleverd wordt aan de klant heeft de temperatuur van de bodem aangenomen (Agudelo Vera *et al.*, 2020).

Voor tertiaire drinkwaterleidingen kan dus aangenomen worden dat het drinkwater de bodemtemperatuur aangenomen heeft. Voor transportleidingen is de temperatuur afhankelijk van de bron (grondwater, oppervlaktewater) en de verblijftijd in het transportnet. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 4.



Figuur 4. Schematische weergave verloop volumestroom (Q) en temperatuur (T) in het leidingnet tussen (bovenstrooms) het pompstation en (benedenstrooms) de klant uitgaande van een zomerse dag waarbij het drinkwater opwarmt in het leidingnet.

2.3 TED in relatie tot ongewenste opwarming van drinkwater

Zoals uitgelegd in Sectie 2.2 is de temperatuur van de bodem bepalend voor de temperatuur waarmee het drinkwater aankomt bij de klant. Door klimaatverandering neemt de gemiddelde temperatuur toe. Als de zomers warmer worden, dan wordt ook de bodem in die zomers warmer. Studies van KWR hebben laten zien dat er in het distributienet hotspots aan te wijzen zijn; locaties waar het warmer is dan gemiddeld. Dit zijn bijvoorbeeld locaties die altijd in de volle zon liggen, onder asfalt of in de buurt van warmtebronnen, zoals warmtenetten. In deze hotspots is er anno 2022 al een risico dat de temperatuur van het drinkwater af en toe hoger is dan de wettelijke eis van 25 °C. Door de warme bodem is een eventueel positief koelend effect van een TED-installatie op temperatuur van het drinkwater in de zomer slechts lokaal en tijdelijk. TED is dus geen systematische “bron-tot-kraan-oplossing” voor ongewenste opwarming van drinkwater in de zomer door enerzijds klimaatverandering en anderzijds bronnen die warmte uitstralen in de bodem zoals (hogetemperatuur)warmtenetten. Dit betekent ook dat koude-onttrekking (opwarming) van drinkwater in de winter in zekere mate mogelijk is zonder negatieve effecten voor de waterkwaliteit. Dit punt is onderdeel van ander WarmingUP-onderzoek, zie Sectie 1.4.

3 Gegevens en methode

3.1 WTM+ model

3.1.1 Uitgangspunten model

Het watertemperatuurmodel, *WTM+* (uitbreiding van een eerdere versie, genaamd *WTM*), beschrijft de drinkwatertemperatuur in het distributienet als functie van de omliggende bodemtemperatuur, de thermische invloedssfeer (van het drinkwater op de bodem) en de hydraulica in het leidingnet (zie Blokker e.a. (in voorbereiding)) voor een beschrijving). Het model is tijdsafhankelijk en heeft één ruimtelijke dimensie (stromingsrichting).

In een voorgaand model, genaamd *WTM* (Blokker & Pieterse-Quirijns, 2013), was het uitgangspunt dat de bodem het drinkwater thermisch beïnvloedt, maar niet andersom. In veel gevallen is dit een redelijke eerste benadering. Toch zal, ondanks het relatief kleine volume bij distributieleidingen, het leidingwater in zekere mate de temperatuur van de omliggende bodem beïnvloeden, aangezien het leidingwater regelmatig ververst (met name tijdens verbruikspieken).

Het uitgebreide *WTM+* beschrijft deze wisselwerking tussen bodem en drinkwater als volgt:

1. Berekenen van de evenwichtstemperatuur $T_{boundary}$.
Dit is de evenwichtstemperatuur van drinkwater en omliggende bodem. Deze wordt berekend met een 2D-bodemtemperatuurmodel (*BTM+*).
2. Bepalen van de snelheid van temperatuurverandering.
Hierbij wordt aangenomen dat de drinkwaterleiding is omgeven door een bodemschil die als één thermische eenheid met het drinkwater varieert. Deze schil is te zien als een thermische weerstand en veroorzaakt dus tragere temperatuursveranderingen.

3.1.2 Modelbeschrijving

Voor een uitgebreide beschrijving van het *WTM+* wordt de lezer verwezen naar Blokker & Pieterse-Quirijns (2013) en Blokker e.a. (in voorbereiding). Hieronder worden de belangrijkste modelaannames en wiskundige definities gegeven.

Voor de dynamische warmteoverdracht tussen omgeving en stromend water in een leiding geldt:

$$\frac{dT_{water}}{d\tau} = k(T_{boundary} - T_{water}) \quad (1)$$

Waarin k de warmteoverdrachtssnelheid voortstelt en τ de verblijftijd van het water in de leiding. Met de randvoorwaarden $T_{water}(t=0)=T_{water,0}$ en $T(t=\infty)=T_{boundary}$, is de analytische oplossing:

$$T_{water}(t, \tau) = T_{boundary}(t) + (T_{water,0}(t) - T_{boundary}(t)) \cdot \exp(-k\tau(t)) \quad (2)$$

Met $T_{water,0}(t) - T_{boundary}(t)$ de drijvende kracht achter de temperatuursverandering van het drinkwater. Bovenstaande formulering beschrijft de drinkwatertemperatuur onder invloed van een thermisch isolerende buiswand en bodemschil. De warmteoverdrachtssnelheid hangt dan ook af van de eigenschappen van het water, de leidingwand en de omliggende bodemschil:

$$k = \frac{4 \cdot \alpha_{water}}{D_1^2 \left(\frac{1}{Nu} + \frac{\lambda_{water} \cdot \ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right)}{2\lambda_{pipe}} + \frac{\lambda_{water} \cdot \ln\left(\frac{D_3}{D_2}\right)}{2\lambda_{soil}} \right)} \quad (3)$$

Met D_1 en D_2 de binnen- en buitendiameter van de leiding, D_3 de diameter waar de evenwichtsvoorwaarde geldt (d.w.z. de buitendiameter van de leiding plus de omringende grond), Nu het Nusselt-getal (neemt toe met de mate van turbulentie), α_{water} de warmtediffusie-coëfficiënt, λ de warmtegeleidingscoëfficiënt van het water (subscript "water"), de leiding ("pipe") of bodem ("soil"). Verder geldt: $D_3 \equiv D_2 + 2 \cdot T_{Soil} \cdot D_1$ waarbij de grootte van de invloedssfeer rond de leiding (T_{Soil}) expliciet wordt gemaakt.

Voor een eenduidige interpretatie van de meetresultaten is het nuttig om de opwarming van het drinkwater te normaliseren:

$$\Delta TN(\tau + t) = 1 - \exp(-k\tau(t)) = \frac{T_{water}(\tau, t) - T_{water,0}(t)}{T_{boundary}(t) - T_{water,0}(t)} \quad (4)$$

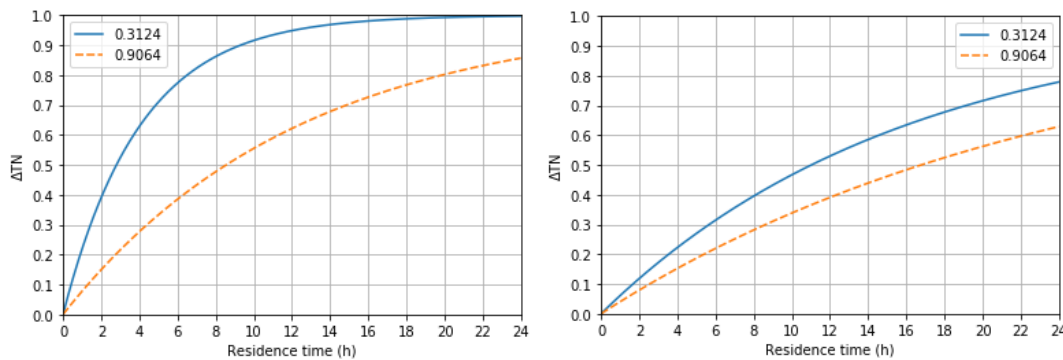
De term in de teller van de breuk is het verschil tussen de temperatuur aan het begin en eind van het stroomtraject—in deze studie een meting. De term in de noemer is het verschil tussen de gemodelleerde bodemtemperatuur en de temperatuur aan het begin van het stroomtraject. Via k hangt ΔTN onder meer af van D_1 en D_3 , waarbij een hogere D_3 -waarde overeenkomt met een tragere opwarming. In geval $T_{boundary}(t) \approx T_{water,0}(t)$ wordt ΔTN singulier. Het water heeft op dat moment aan het begin van het traject vrijwel dezelfde temperatuur als de bodem in het benedenstroomse traject. In dat geval zullen meetverschillen meer bepaald worden door meetonnauwkeurigheden dan door de werkelijke temperatuurverandering. Om grote onzekerheid in ΔTN te voorkomen, zijn meetpunten waarvoor geldt $|T_{boundary}(t) - T_{water,0}(t)| < 1^\circ\text{C}$ weggelaten uit de analyse.

Omschrijven van vergelijking (4) levert een uitdrukking van D_3 in termen van de genormaliseerde opwarming (ΔTN , bepaald uit metingen en een berekende bodemtemperatuur) en verblijftijd (τ , bepaald uit een hydraulisch model):

$$D_3 = D_2 \cdot \exp\left(\frac{2\lambda_{soil}}{\lambda_{water}} \left[\frac{-4\alpha_{water} \cdot \tau}{D_1^2 \cdot \ln(1 - \Delta TN)} - \frac{1}{Nu} - \frac{\lambda_{water} \cdot \ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right)}{2 \cdot \lambda_{pipe}} \right] \right) \quad (5)$$

Hiermee is een best-passende D_3 -waarde te berekenen, *ergo*, een validatie-waarde voor ieder afzonderlijk meetpunt.

Figuur 5 toont de genormaliseerde opwarming (ΔTN) als functie van de verblijftijd (τ), interne diameter (D_1) en Nusselt-getal (Nu). Hoewel de opwarming substantieel trager verloopt voor laminaire stroming (vergelijke linker- en rechterpaneel in Figuur 5), is dit effect verwaarloosbaar voor $Nu > 100$. Er is nagegaan dat de gemodelleerde stromingen in dit onderzoek turbulent zijn. Daarom is uitgegaan van turbulente stroming ($Nu = 441$).



Figuur 5. Genormaliseerde opwarming voor binnendiameter $D_1 = 312,4$ mm (blauwe curves) en $906,4$ mm (oranje curves). Links: Turbulente stroming $Nu = 441$; rechts: laminaire stroming ($Nu = 3,66$). De berekeningen zijn uitgevoerd zonder bodem-invloedsfeer: $D_3 = D_1$.

3.2 Case studies

De in dit rapport beschreven testcase vormt een aanvulling op twee andere cases die zijn uitgevoerd in het TKI-project ENGINE (Blokker e.a. (in voorbereiding)). Er is bewust gekozen voor drie cases in verschillende gebieden om een grote variatie in leidingdiameters, grondsoorten, en oppervlaktebedekking te omvatten (zie Tabel 1). Case 1 (Kralingen, Evides) bestond uit een enkele leiding (\varnothing 160 mm PVC) van ca. 1 km lang met een variatie in volumestromen en dus verblijftijden. Case 2 (Almere, Vitens) bestond uit een distributienet op verschillende locaties met een variatie in verblijftijden, waarbij de helft van de dataset (potentieel) werd beïnvloed door een stadsverwarmingsnet, en de andere helft niet.

Tabel 1. Overzicht van 3 testcases.

	1: Kralingen	2: Almere	3: Leeuwarden
Drinkwaterbedrijf	Evides	Vitens	Vitens
Traject	Enkele leiding	Distributienetwerk	Leidingtraject binnen een open leidingnet
Lengte leiding/traject (km)	0,9	Ca. 700	1,1
Leidingdiameter (mm)	160 (buiten) 152 (binnen)	63 t/m 400 Merendeel (51%) 110	300 tot 380
Meetduur	2 weken	1 dag	30 maanden
Aantal meetpunten	870	72	8.307 – 14.071 (afhankelijk van scenario, zie Tabel 3)
Nauwkeurig bekende parameters (vgl. 4, 5)	$D_1, D_2, \lambda_{soil}, \lambda_{water}, \lambda_{pipe}, \alpha_{water}, \tau, Nu, T_{boundary}, \Delta TN, T_{water}, T_{water,0}$	$D_1, D_2, \lambda_{soil}, \lambda_{water}, \lambda_{pipe}, \tau, Nu, T_{boundary}, \Delta TN, T_{water}, T_{water,0}$	$T_{water}, T_{water,0}$
Referentie	Blokker e.a. (in voorbereiding)	Blokker e.a. (in voorbereiding)	Voorliggend rapport

De validatie met case 1 en 2 bleek een uitdaging omdat sommige randvoorwaarden en modelparameters niet nauwkeurig konden worden bepaald en moesten worden geschat. Case 1 (Kralingen) gaf aan dat de belangrijkste parameter de bodemtemperatuur ($T_{boundary}$) is; en toont aan dat de $TSol = 0,5$ tot 1 (ofwel $D_3 = 2 \cdot D_1$ tot $3 \cdot D_1$). In case 2 leidde toepassing van een $TSol = 1$ tot een RMSE tussen gesimuleerde en gemeten temperaturen van $1,0$ °C. Case studie 2 liet zien dat lokale verschillen in $T_{boundary}$ een lokaal effect hebben op de drinkwatertemperatuur.

De toegevoegde waarde van case 3, ten opzichte van case 1 en 2, is de uitbreiding naar grotere diameters ($\varnothing 300$ - 380 mm) –een relevante diameter voor TED-installaties. Ook is het aantal datapunten veel groter (zie Tabel 1) en omvat de tijdreeks van 30 maanden verschillende seizoenen over meerdere jaren. Ten opzichte van case 1 en 2 zijn wel meer modelparameters ingeschat (met een hydraulisch model of gegevens van de omgeving) in plaats van gebaseerd op directe metingen (zie Tabel 1).

3.3 Validatieprocedure

De validatieprocedure bestaat uit de volgende stappen:

1. Bereken de verblijftijd van het water, τ , op evaluatietijdstip t_e
 - a. bereken met behulp van het hydraulisch leidingnetmodel voor elk leidingstuk van het traject met intervallen van een kwartier de stroomsnelheid;
 - a. bepaal de verblijftijd in het eerste leidingstuk uit de lengte van het leidingstuk en de snelheid die op dat tijdstip (t_e) geldt;
 - b. herhaal deze procedure voor opeenvolgende leidingstukken, waarbij het tijdstip steeds wordt opgehoogd met de individuele verblijftijd;
 - c. bereken de verblijftijd over het gehele traject (τ) is voor ieder tijdstip van de dag met een resolutie van 5 minuten. De verblijftijd is specifiek voor t_e , maar onafhankelijk van de datum (omdat het hydraulisch model dat ook is).
2. Bereken de genormaliseerde opwarming ΔTN met vgl. (4), met:
 - a. $T_{water,0}$: de gemeten temperatuur bij locatie A op evaluatietijdstip t_e ;
 - b. T_{water} : de gemeten temperatuur bij locatie B op tijdstip $t_e + \tau$;
 - c. $T_{boundary}$: de bodemtemperatuur gemodelleerd volgens het 1D-BTM met de modelparameters zoals in Tabel 2. Hierbij is tijdstip t_e gebruikt en nagegaan dat de invloed van het precieze tijdstip verwaarloosbaar klein is voor deze casestudy: de bodem varieert traag op temperatuurveranderingen aan het oppervlak.
3. Bereken op elke t_e een bijbehorende waarde voor D_3 ;
4. Bereken de gemiddelde D_3 -waarde over een evaluatieperiode en leidt daaruit een best-passende waarde voor D_3 en $TSol$ af.

Om de gevoeligheid van de resultaten te bepalen voor de bodemsoort, het type oppervlaktebedekking, en de leidingdiepte zijn vier modelscenario's gebruikt: DFLT, SOIL, SURF en PIPE (zie Tabel 2 voor parameterwaarden). De thermische eigenschappen die gekoppeld zijn aan de bodemsoort (Tabel 2) zijn overgenomen uit voorgaande studies (Van Esch, 2022). Parameters die gelijk zijn voor alle scenario's zijn: $\lambda_{water} = 0,57 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $\lambda_{pipe} = 0,16 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $\alpha_{water} = 0,14 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. De literatuur vertoont een grotere verscheidenheid aan thermische eigenschappen dan de precisie van de gebruikte waarden suggereert. De

bedoeling van de gevoeligheidsanalyse is om inzicht te geven hoe de thermische eigenschappen de modelresultaten beïnvloeden.

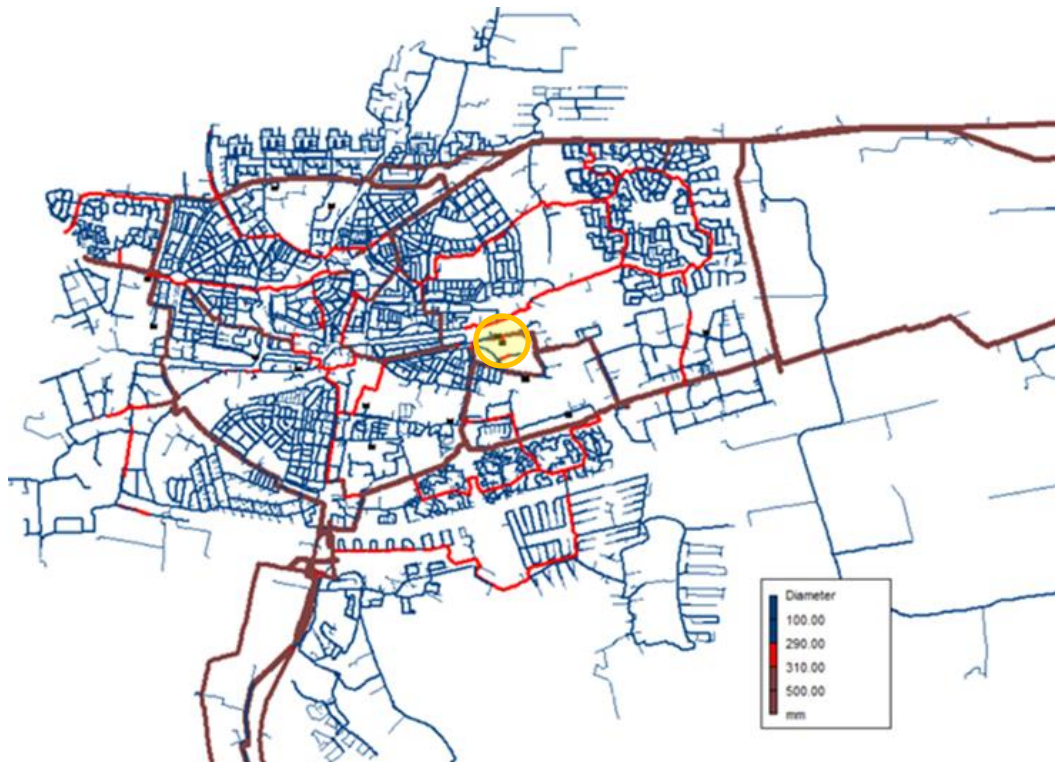
Tabel 2. Modelparameters voor 1D-BTM voor vier modelscenario's. Parameterwaarden zijn weergegeven voor het referentiescenario ("DFLT") en voor drie variaties ("SOIL", "SURF", "PIPE") indien deze afwijken van de referentie.

Grootheid	Symbol	DFLT	SOIL	SURF	PIPE	Eenheid
Omgevingstype 1D-BTM		TMZK	TMVz	GMVz	TMZK	
Thermische geleidbaarheid	λ_{soil}	1,38	1,6	1,6		$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Massadichtheid	ρ_{soil}	1650	1700	1700		$\text{kg}\cdot\text{m}^3$
Warmtecapaciteit	$C_{p_{\text{soil}}}$	1175	1000	1000		$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Albedo	α	0,12		0,19		-
Warmteopslag-coëfficiënt	a1	0,8		1,0		-
Warmteopslag-coëfficiënt	a2	30				S
Warmteopslag-coëfficiënt	a3	-100		-10		$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
Warmteopslag oppervlak	Q_f	100		100		$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
Maximale neerslagopslag	S_{max}	0,48		1,0		mm
Leidingdiepte	Z_{pipe}	1			1,2	m

3.4 Gebruikte gegevens

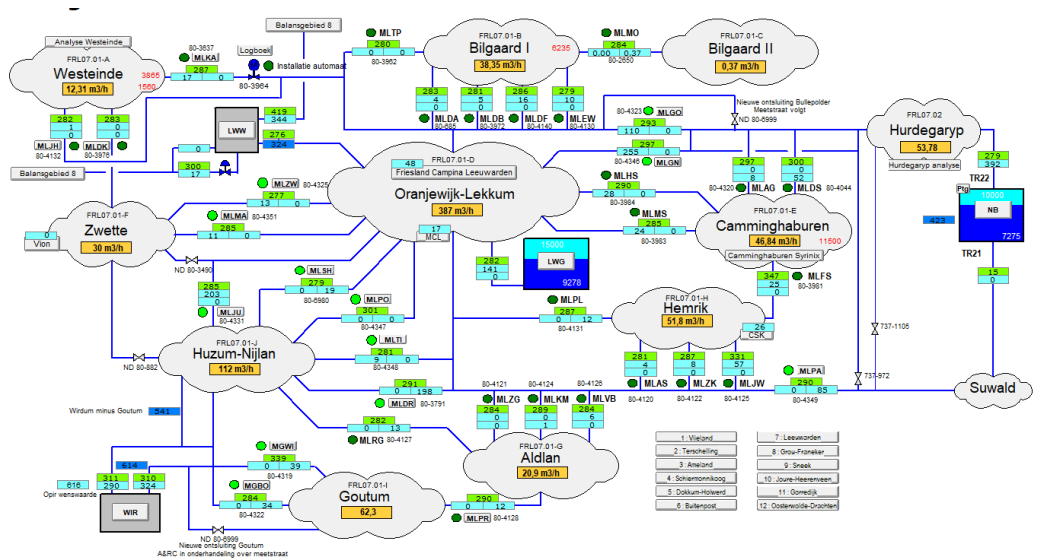
3.4.1 Leidingnetmodel Leeuwarden

Het hydraulisch leidingnetmodel van pilotgebied Leeuwarden en omgeving (Vitens) is weergegeven in Figuur 6. Het model (door KWR bewerkte EPANET-export vanuit InfoWorks) is dat van een gemiddelde dag in 2016. Het gebied wordt gevoed door P.S. Noardburgum enkele kilometers ten westen van Leeuwarden en door opjager Wirdum ten zuiden van de stad (beiden niet getoond). Er is een reinwaterkelder (geelomcirkeld in Figuur 6).



Figuur 6. Leidingnet van Leeuwarden en omgeving (Vitens) met diameters zoals aangegeven in de legenda. Geel-omcirkeld is de locatie van de reinwaterkelder.

Het leidingnet van Leeuwarden is opgedeeld in DMA's (District metered areas), zoals weergegeven in Figuur 7.



Figuur 7. Indeling van leidingnet Leeuwarden in DMA's.

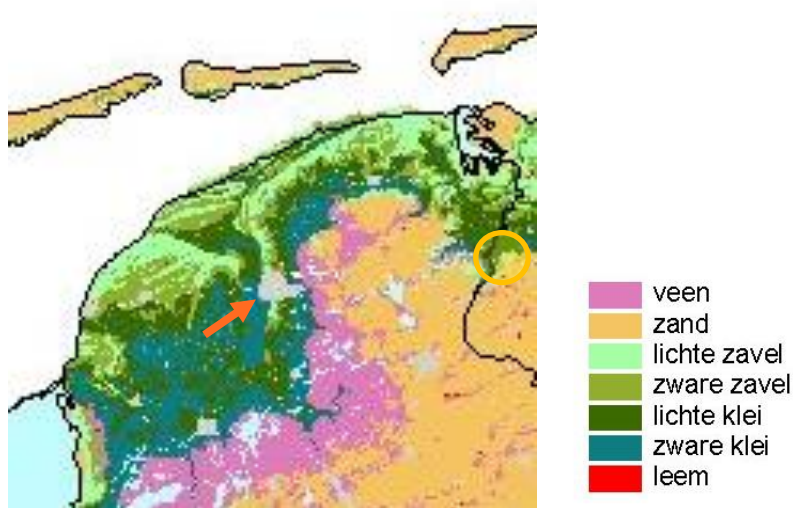
3.4.2 Meetgegevens van de temperatuur

Temperatuurmetingen zijn beschikbaar gesteld door Vitens. Het betreft (i) metingen van sensoren in het distributienet bij huishoudens/grootverbruikers, (ii) metingen op DMA-grenzen en (iii) online meetgegevens bij de voedingspunten (P.S. Noardburgum en opjager Wirdum).

In de eindanalyse zijn de meetgegevens van DMA-grenzen (locaties FR-MLDS en FR-MLHS) gebruikt in de periode 8 juli 2017 t/m 10 oktober 2020.

3.4.3 Grondsoortgegevens

De grondsoort in het casestudy-gebied is bepaald met de *Grondsoortenkaart 2006* van Wageningen University & Research (WUR), zie Figuur 8. Leeuwarden ligt op de grens van zware klei, lichte klei, lichte zavel en zware zavel (zavel is “grof zand” of “kiezelzand”), zie Figuur 8.



Figuur 8. Bodemsoorten in Friesland (bron: Grondsoortenkaart Wageningen University & Research, WUR; <https://www.wur.nl/nl/show/grondsoortenkaart.htm>, geraadpleegd op 23 november 2022). De stad Leeuwarden is aangegeven met de rode pijl.

3.4.4 Weergegevens

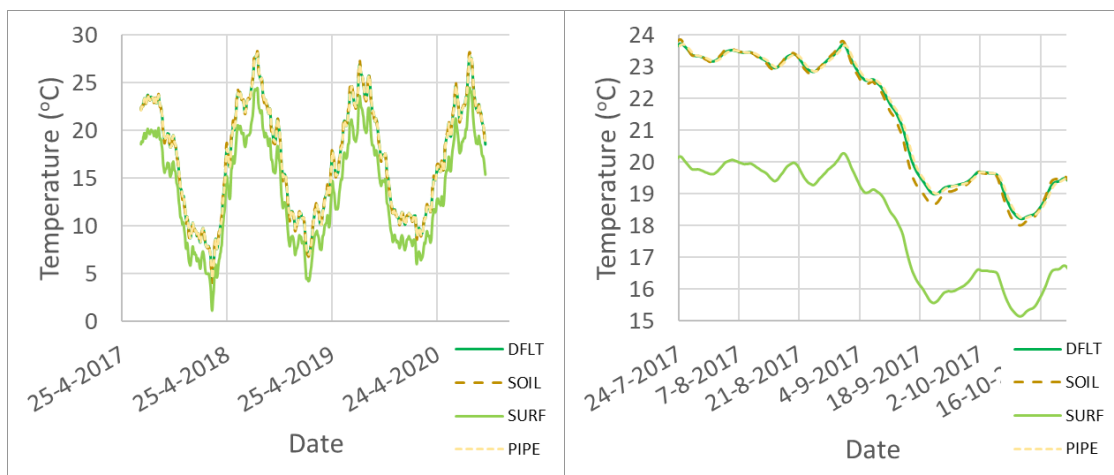
Weergegevens van het KNMI zijn gebruikt in de evaluatieperiode (8 juli 2017 t/m 3 januari 2020). Voor weerstation Leeuwarden. Het betreft gegevens van de luchttemperatuur, zonne-instraling, relatieve luchtvochtigheid op 1,5 m hoogte, neerslag (uursom) en windsnelheid (uurgemiddelde).

3.4.5 Bodemtemperatuurmodel 1D-BTM

Het *1D-BTM* bodemtemperatuurmodel (Van der Model (2002); Van der Molen e.a. (2008); Blokker & Pieterse-Quirijns (2013)) is gebruik om de bodemtemperatuur op de diepte van drinkwaterleidingen te bepalen. Het *1D-BTM* berekent de bodemtemperatuur als functie van de diepte en de tijd onder invloed van weersomstandigheden en voor een opgegeven bodembedekking, grondsoort, en een warmteflux die de stedelijke omgeving voorstelt. De invloed van weersomstandigheden is gemodelleerd met een micro-klimatologisch model (Van der Molen (2002); Van der Molen (2008); Blokker & Pieterse-Quirijns (2013)). De uitkomsten voor de vier modelscenario's staan in Figuur 9: vooral het verschil in bodembedekking (SURF-scenario) is van belang; het verschil in diepteligging (PIPE) en bodemsoort (SOIL) zijn minder invloedrijk.

Omdat het microklimaatmodel is gekalibreerd voor een zomerse situatie in de stad Rotterdam (Agudelo-Vera e.a., 2017), is het mogelijk dat de uitkomsten enigszins afwijken van de werkelijkheid:

- Mogelijk heeft het onderzoeksgebied in Leeuwarden een andere (lagere) graad van verstedelijking dan Rotterdam –en daarmee een andere (kleinere) bijdrage van de antropogene warmtebronnen Q_f aan de energievergelijking –met een afwijking (overschatting) van bodemtemperatuur tot gevolg.
- De antropogene warmtebronterm Q_f is tevens seizoensafhankelijk (Agudelo-Vera e.a., 2017),. Hoewel in deze studie de grootte van een mogelijk seizoenseffect in Leeuwarden niet is nagegaan.
- Nederlandse bodems zijn in de winter doorgaans vochtiger dan in de zomer. Dit heeft invloed op de massadichtheid en thermische eigenschappen van de bodem. Deze effecten zijn in kaart gebracht met de gevoeligheidsanalyse (zie Sectie 3.3 en 3.5.3);
- De invloed van vorstvorming is niet verdisconteerd in het model. Bij bevriezing komt energie vrij, wat betekent dat het model in vorstperiodes de bodemtemperaturen onderschat.



Figuur 9. Bodemtemperatuur berekend met model 1D-BTM. Links voor de hele evaluatieperiode; rechts voor 90 dagen in de zomer en het najaar van 2019.

3.5 Selectie validatiegebied

3.5.1 Selectie op basis van sensormetingen

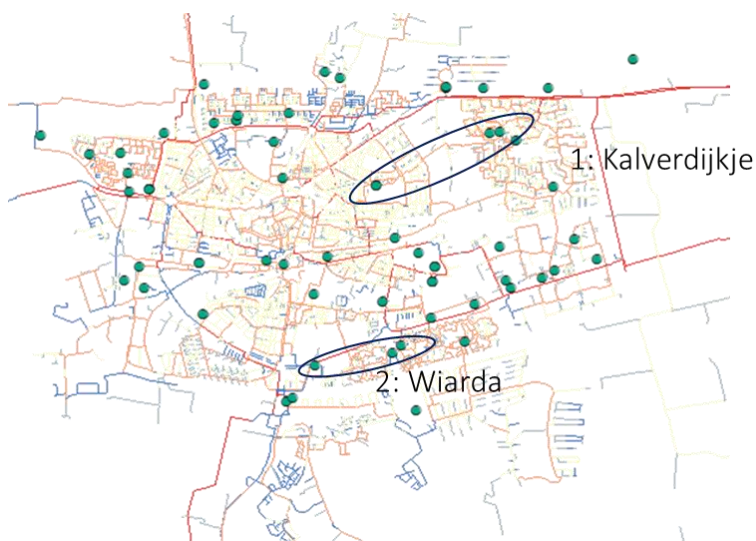
Een hoofdingrediënt van de validatie is een geschikt meettraject met bruikbare meetgegevens. Een eerste inventarisatie leidde niet tot succes, maar de selectieprocedure wordt hier beschreven vanwege de nuttige geleerde lessen.

In de eerste selectie is gekeken naar aangeleverde meetgegevens voor 76 sensoren verspreid over het gebied (Figuur 10). Er is gezocht naar trajecten die voldeden aan de volgende selectiecriteria:

1. monotone verdeling van leidingdiameters (bij voorkeur rond 300 mm);
2. eenduidige stroming met weinig bijmenging of stroomomkeringen;
3. aanwezigheid van een sensor aan het begin en eind van het traject met bruikbare meetgegevens;
4. een tijdreeks van minimaal een aantal maanden, bij voorkeur met een grote variatie aan verblijftijden (voor een validatie tegen een groot verblijftijdsbereik).

Twee trajecten voldeden aan de bovenstaande selectiecriteria, maar bleken in bij nader inzien niet te volstaan, om de volgende redenen:

- Voor het traject “Kalverdijkje” (zie Figuur 10) bleek dat de gemeten temperaturen bij de in- en uitgang³ van het traject in winterperiodes tot ca. 10 °C hoger werden dan zowel de gemodelleerde bodemtemperatuur als de gemeten temperatuur bij PS Noardburgum. Voor een normale situatie zonder sterke warmtebronnen is een dergelijk gedrag niet verklaarbaar. Volgens het hydraulisch model bestaat het water dat dit traject bereikt uit een combinatie van water uit PS Noardburgum, opjager Wirdum dat ook deels in de reinwaterkelder kan hebben verbleven, afhankelijk van het moment van de dag. Daarop is ook de temperatuur van het water uit Wirdum bekeken, maar dit bood geen verklaring voor de hoge gemeten temperaturen in Kalverdijkje tijdens winterperiodes. Bij navraag bij Vitens bleek dat (i) de sensorlocaties niet precies overeenkwamen met de gedocumenteerde locaties en (ii) niet kon worden uitgesloten dat de temperatuurmetingen werden beïnvloed door de temperatuur in de gebouwen waarin deze sensoren waren geïnstalleerd. Beide zaken corrumpen criterium 3, op basis waarvan werd besloten dit traject af te wijzen voor verder analyse.
- Het beste alternatief leek traject “Wiarda”⁴ (zie Figuur 10). De locatie van de sensor aan het eind van het traject bleek echter niet direct verbonden met een leiding in het model (corruptie criterium 3). Daarnaast bleek over het traject op meerdere locaties kleine fracties water af te splitsen en weer bij te mengen, volgens het hydraulisch leidingnetmodel (corruptie criterium 2). Ook deze dataset is afgewezen voor verdere analyse.



Figuur 10. Locaties van sensoren (groene stippen) geïnstalleerd door Vitens in het distributiegebied van Leeuwarden.

3.5.2 Selectie op basis van metingen DMA-grenzen

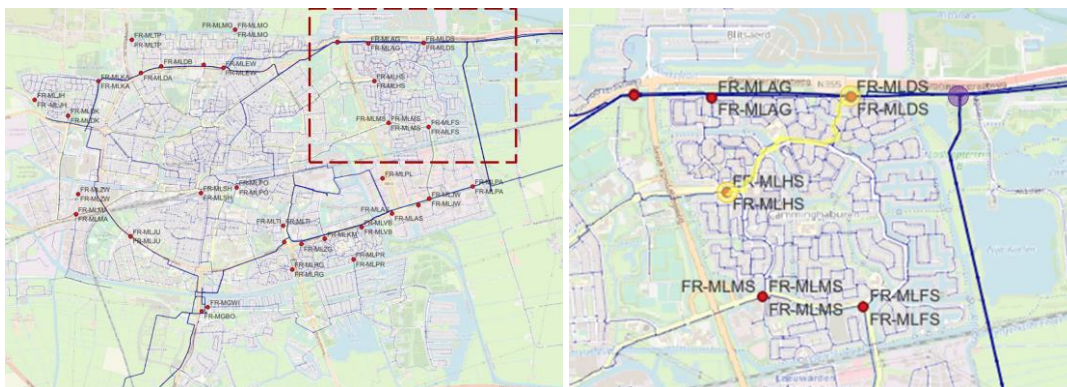
Omdat de sensorgegevens geen geschikte validatieset boden, is met Vitens gekeken naar temperatuurmetingen op DMA-grenzen. Een voordeel ten opzichte van de sensoren in het distributienet is dat er geen onduidelijkheid is over de locatie van de sensoren: deze meten de temperatuur van het drinkwater in de distributieleidingen.

Het leidingtraject in de wijk Cammingaburen (Figuur 11) voldeed aan bovengenoemde vier selectiecriteria. Het bevindt zich tussen de sensoren FR-MLDS en FR-MLHS. Dit gebied wordt primair gevoed door PS Noardburgum, uit het oosten, hoewel enige bijmenging vanuit het zuiden plaatsvindt op de leidingsplitsing aangegeven met de paarse stip in Figuur 11. Bijmenging vanuit een andere bron

³ Sensoren FR-MOLMF en FR-MOLCL.

⁴ Sensoren FR-MGBO-TM01 en FR-MLDR-TM01.

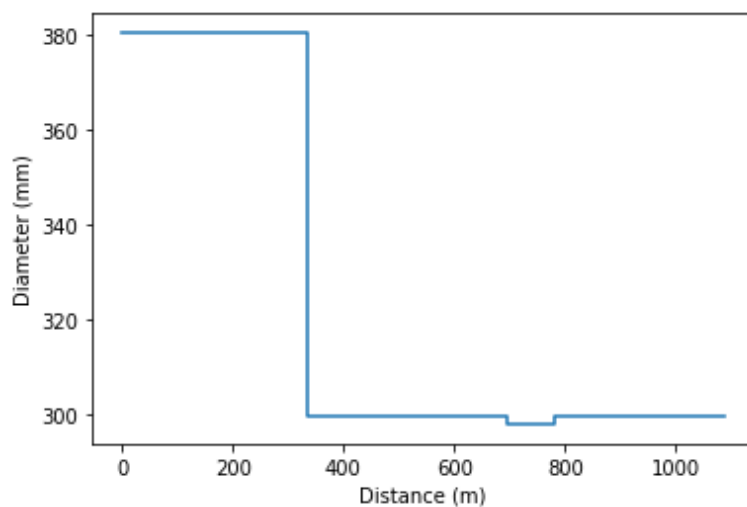
beïnvloedt mogelijk de temperatuur aan het begin van het traject, maar dit heeft geen invloed op het temperatuurverloop binnen het traject, zoals onderzocht in dit project.



Figuur 11. Leidingtraject in Cammingaburen. Links de locatie in Leeuwarden. Rechts is het traject geel-gemarkeerd en zijn de meetpunten aan het begin (FR-MLDS) en eind (FR-ML-HS) aangegeven. De paarse stip geeft een leidingsplitstiging weer waar (volgens het hydraulisch model) bijmenging plaatsvindt vanuit het zuiden.

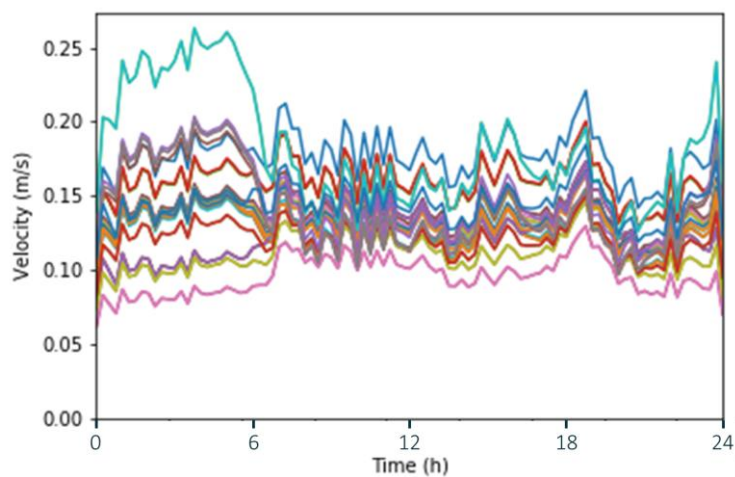
3.5.3 CAM-traject

Verblijftijden op elk kwartier van de dag zijn berekend met de leidingdiameters en stroomsnelheden van individuele leidingstukken (zie Sectie 3.3, punt 1). Leidingdiameters hebben een kleine variatie binnen het traject, afnemend van ca. 380 mm (van ca. 0 tot 350 m) naar ca. 300 mm (350 – 1100 m) (Figuur 12).



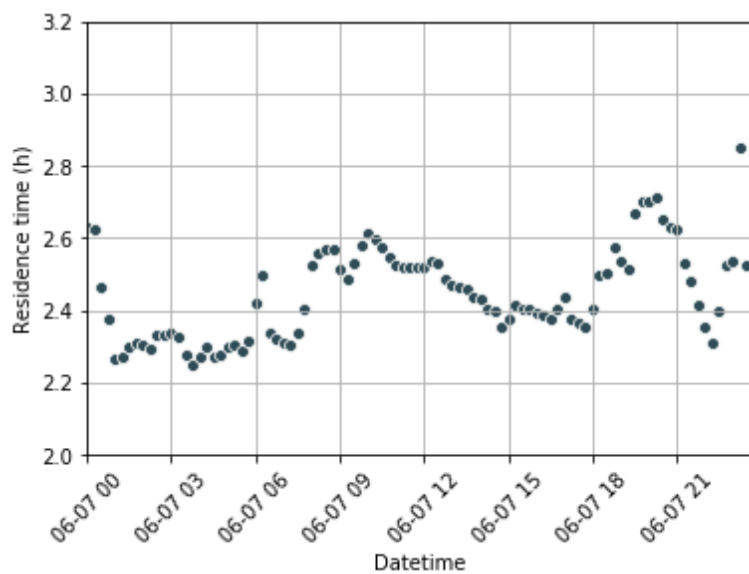
Figuur 12. Diameters van leidingtraject CAM. Het startpunt ligt bij "Distance" = 0 m.

Stroomsnelheden per leidingstuk zijn weergegeven in Figuur 13. Opvallend is dat er grosso modo geen grote snelheidsverschillen zijn tussen dag en nacht, zoals gangbaar in veel leidingnetten.



Figuur 13. Snelheden op individuele leidingstukken van leidingtraject CAM.

De berekende verblijftijden zijn weergegeven in Figuur 14. Deze varieert tussen 2,2 en 2,9 uur en is het laagst in de nachtperiode.

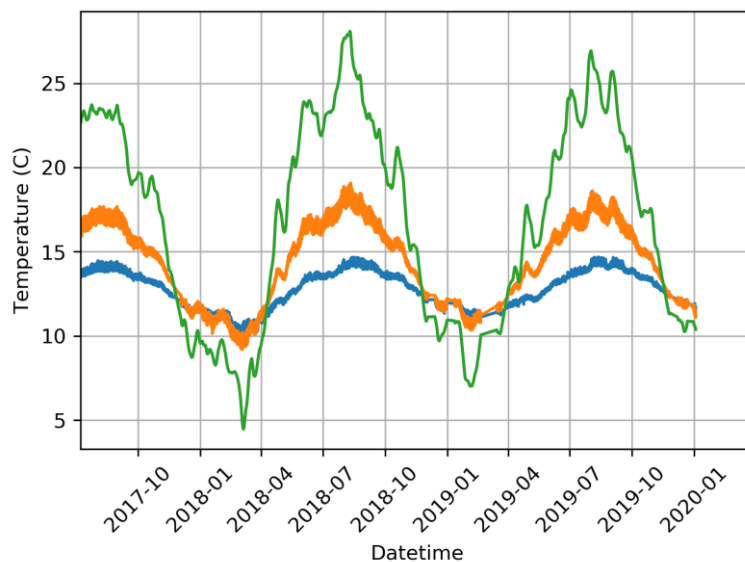


Figuur 14. Verblijftijden als functie van het tijdstip van de dag.

4 Validatieresultaten

4.1 Inleiding

Gemeten en temperaturen aan het begin en eind van het traject zijn weergegeven in Figuur 15 (blauwe en oranje curves), samen met de berekende bodemtemperatuur op 1 m diepte (groene curve). Tijdens de evaluatieperiode (8 juli 2017 – 3 januari 2020) zijn seizoensinvloeden duidelijk herkenbaar (drie zomers; twee winters). Globaal ligt de temperatuur gemeten op het eind van het traject tussen die aan het begin en de bodemtemperatuur in en kruisen de drie lijnen op dezelfde momenten. Dit suggereert dat het leidingwater tijdens het doorstromen van het traject (verder) de bodemtemperatuur aanneemt. Dit effect is duidelijker tijdens de zomer (opwarming) dan tijdens de winter waarin de temperatuur tijdens het traject nauwelijks lijkt af te koelen, terwijl de gemodelleerde bodemtemperatuur substantieel lager is dan de gemeten drinkwatertemperaturen. Een mogelijke oorzaak is een onderschatting van de berekende bodemtemperatuur vanwege de afwezigheid van vorstvorming in het model en/of de kalibratie voor de zomerperiode in Rotterdam (zie Sectie 3.4.5).



Figuur 15. Watertemperatuur gemeten aan begin (FR-MLDS; blauwe curve) en eind (FR-MLHS; oranje curve) van traject CAM en bodemtemperatuur berekend met bodemtemperatuurmodel 1D-BTM (groene curve). De schijnbare variatie in lijndikte in de blauwe en oranje curves worden veroorzaakt door dagelijkse temperatuursvariaties.

4.2 Genormaliseerde opwarming

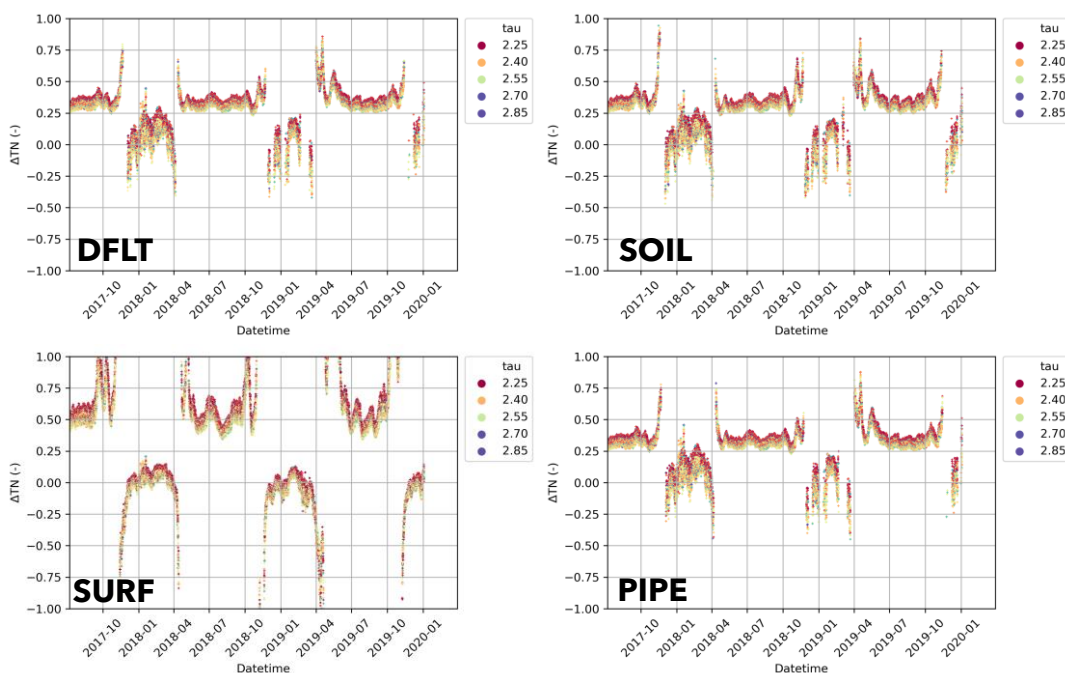
De genormaliseerde temperatuursveranderingen ΔTN zijn berekend volgens vergelijking (4). Figuur 16 toont de resultaten voor de vier modelscenario's (*DFLT*, *SOIL*, *SURF*, *PIPE*, Sectie 3.3). Rond december en april zijn de gegevens discontinu vanwege het toegepaste filter (Sectie 3.1.2).

Voor het default-scenario liggen de ΔTN -waarden in de zomer ruwweg tussen $\Delta TN = 0,25$ en $0,45$, met uitschieters naar boven in periodes dichtbij de singulariteiten ($T_{\text{boundary}}(t) \approx T_{\text{water},0}(t)$). Tijdens de zomerperiode vertonen de ΔTN -waarden enige variatie die bestaat uit (i) een tijdsafhankelijke variatie, (ii) een stijging dichtbij de singulariteiten (voor- of nadat het filter actief is) en (iii) een gradatie van hogere

ΔTN -waarden voor kortere verblijftijden (zie kleurcodering in Figuur 16). De verblijftijdsafhankelijkheid hangt samen met gemeten temperaturen die (op het eind van het traject) in het algemeen hoger zijn in de nacht dan overdag en het feit dat de verblijftijd 's nachts het kortst is (Figuur 14). Dit verband is tegenintuïtief: kortere verblijftijden geven immers minder gelegenheid tot opwarming (d.w.z. lagere ΔTN). Dit suggereert een andere invloedfactor, bijvoorbeeld een nachtelijke antropogene warmtebron, maar de reden voor dit verband is niet nagegaan in dit onderzoek. Er wordt hier volstaan met de conclusie dat dagelijkse temperatuurvariaties een flink deel van de variatie in ΔTN -waarden veroorzaken.

In de winter wijkt ΔTN sterk af van de zomer: het toont veel sterkere variaties en de waarden zijn lager, in de meeste gevallen tussen $\Delta TN = -0,25$ en $0,25$. Zoals eerder uitgelegd, is het bodemtemperatuurmodel gekalibreerd voor de zomerperiode en bevat het geen vorstvorming, waardoor minder vertrouwen wordt gehecht aan de uitkomsten voor de winter. Deze worden weggelaten uit de verdere analyse.

De modeluitkomsten van de scenario's *SOIL* en *PIPE* wijken nauwelijks af van die van scenario *DFLT* (Figuur 16). Dit is consistent met de vergelijkbare bodemtemperaturen (Figuur 9). Het scenario *SURF*, met het gras-oppervlak en vochtig zand, wijkt wel substantieel af van *DFLT*, met substantieel hogere ΔTN -waarden in de zomer (tussen ca. $0,25$ en $0,65$) en lagere waarden in de winter. Dit verband volgt direct uit de koelere bodemtemperaturen voor het scenario met gras in plaats van tegels (Figuur 9): de gemeten opwarming van het drinkwater (in de zomer) is in absolute zin hetzelfde als in het tegel-scenario, maar ten opzichte van de koelere (gemodelleerde) bodem is deze hoger.



Figuur 16. Berekende genormaliseerde opwarming ΔTN voor scenario's *DFLT*, *SOIL*, *SURF* en *PIPE* zoals aangegeven met de labels. Kleuren weerspiegelen de verblijftijd zoals weergegeven met de kleurcodering in de legenda.

4.3 Thermische invloedssfeer

De D_3 -waarden, berekend volgens vergelijking (5), zijn getoond in Figuur 17. Gemiddelden en standaarddeviaties zijn gekwantificeerd voor de zomers van 2017, 2018 en 2019, individueel en gecombineerd (zie Tabel 3). Uit vergelijking (5) volgt dat een sterkere opwarming (hogere ΔTN) kan worden beschreven met een kleinere thermische invloedssfeer (lagere D_3).

Invloed leidingdiameter

Het leidingtraject bestaat deels (voor ca. 1/3) uit leidingen van 380 mm binnendiameter en voor de rest (ca. 2/3) uit leidingen van 297 mm binnendiameter (300 mm nominaal). De berekeningen zijn uitgevoerd met beide diameterwaarden ($D_1 = 297$ mm en $D_1 = 380$ mm), met als rationale dat de “beste” validatiewaarde voor D_3 en $TSol$ tussen de twee uitkomsten inligt en dichterbij de uitkomst voor $D_1 = 297$ dan voor $D_1 = 380$ mm.

De resultaten laten zien dat voor de grotere leidingdiameter ($D_1 = 380$ mm) de thermische buffer absoluut gezien groter is (hogere D_3 -waarde, Figuur 17, Tabel 3), maar in relatieve zin kleiner (lagere $TSol$, Tabel 3). De interpretatie hierbij is dat een kleinere relatieve thermische buffer ($TSol$) volstaat om de gemeten temperaturen te beschrijven, aangezien het grotere watervolume in de dikkere leiding van zichzelf ook al als een thermische buffer werkt.

Invloed diepteligging

De invloed van de diepere ligging op de thermische invloedssfeer is nihil ($TSol$ -verschil van 0,1%): vergelijk scenario DFLT en PIPE ($Z_{pipe} = 1,00$ m, respectievelijk 1,20 m) in Figuur 17 en Tabel 3).

Deze sterke overeenkomst is consistent met de zeer kleine verschillen in de gemodelleerde bodemtemperaturen (Figuur 9) en genormaliseerde opwarming (ΔTN , Figuur 16).

Invloed bodemsoort

In het scenario met vochtig zand (*SOIL*) is de thermische geleidbaarheid 1,23 maal hoger en het product van massadichtheid en warmtecapaciteit 1,11 maal hoger ten opzichte van referentiemodel *DFLT* (zie Tabel 2). Dit betekent dat de thermische response van de bodem op veranderingen aan het oppervlak *sneller* zullen zijn, maar met een *lagere amplitude*. Dit verklaart de bodemtemperatuur die in het *SOIL*-scenario iets grilliger lijkt te verlopen dan in het *DFLT*-scenario (Figuur 9). Als gevolg hiervan is een lagere genormaliseerde opwarming –een klein effect dat niet duidelijk waarneembaar is in de ΔTN -waarden in Figuur 16) –en een grotere thermische buffer, zoals blijkt uit de hogere waarden voor D_3 en $TSol$ (zie Figuur 17 en Tabel 3).

Invloed oppervlaktedekking

De thermische invloedssfeer berekend in het scenario met gras (*SURF*) is substantieel kleiner t.o.v. de tegel-scenario's: $TSol = -0,059$ (*SURF*) vs. $0,123$ (*SOIL*) voor $D_1 = 297$ mm en $TSol = -0,085$ (*SURF*) vs. $0,014$ (*SOIL*) voor $D_1 = 380$ mm (zie Figuur 17 en Tabel 3). Dit is consistent met de lagere bodemtemperaturen (Figuur 9) en hogere genormaliseerde opwarming (ΔTN , Figuur 16) in de zomer. Anders gezegd: een kleinere thermische invloedssfeer volstaat om de gemeten drinkwatertemperaturen te beschrijven in de relatief koelere zomerse bodem van het gras-scenario.

Invloed seizoenseffecten

De berekende D_3 gemiddeldes vertonen slechts een beperkte (<10%) variatie tussen de zomers van 2017, 2018 en 2019 in de acht gemodelleerde scenario's. Deze variatie is lager dan de standaarddeviatie in de tijdreeksen. Dit laat zien dat de D_3 -waarden (en de daarvan afgeleide $TSol$ -waarden) relatief ongevoelig zijn voor de zomer in kwestie.

Invloed verblijftijd

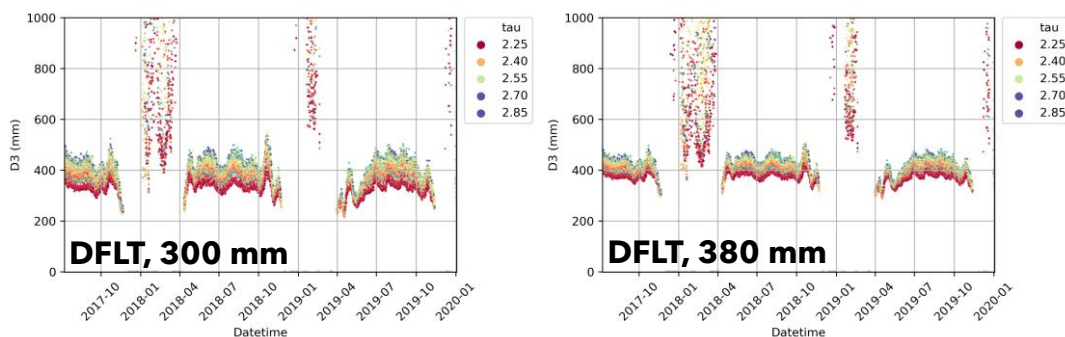
De verblijftijden zijn in dit onderzoek afgeleid uit de snelheden van een hydraulische leidingnetmodel. Voor de werkelijke verblijftijdwaarden zijn snelheidsmetingen nodig die niet beschikbaar waren voor deze case study. De invloed van onzekerheid in de verblijftijd op de uitkomsten is nagegaan m.b.v. vergelijking (5). Uitgaande van de parameters uit het referentiescenario en een verblijftijd van 2,5 uur en $\Delta TN=0,25$ geldt dat een toename (afname) van de verblijftijd met 10% de waarde van $TSol$ verandert met +20% (-19%).

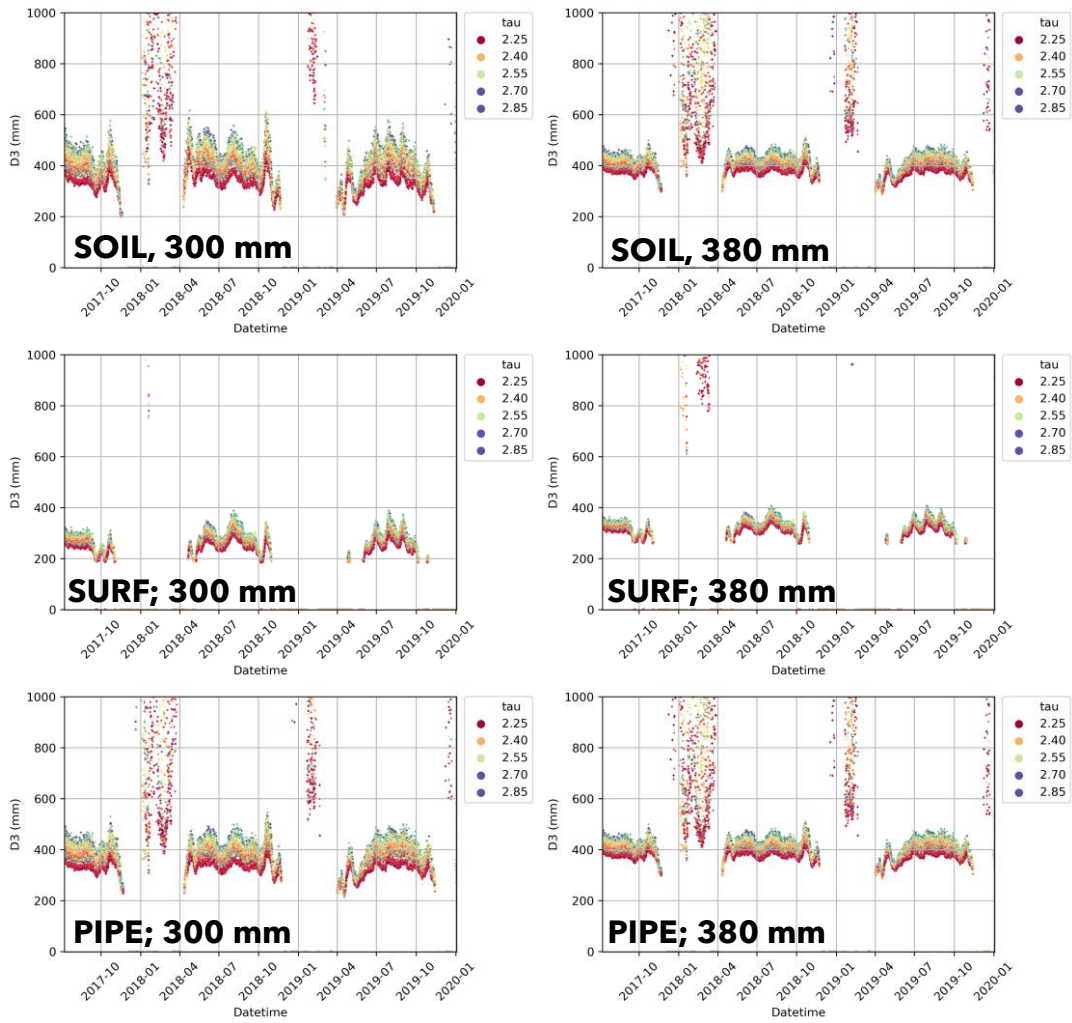
Validatiewaarde $TSol$

De acht onderzochte scenario's geven elk een andere validatiewaarde voor $TSol$. Dit geeft een nuttig beeld van de afhankelijkheden, maar is ook reden om terug te komen op de vraag welke hiervan het meeste waardevol is voor validatiedoeleinden. Het referentiescenario geldt a priori als meest realistisch, maar daarbij worden op basis van de modelresultaten (a posteriori) nog de volgende opmerking gemaakt:

- Zoals eerder opgemerkt, zal –gezien de werkelijke trajectlengtes– de “beste” validatiewaarde tussen de twee eindsituaties voor $D_1 = 300$ mm en 380 mm inliggen en dichter bij 300 mm dan 380 mm.
- Het scenario met gras (SURF) heeft een negatieve $TSol$. Dit suggereert een onrealistische oplossing met een omgekeerd thermisch buffereffect. Deze conclusie stemt overeen met het feit dat Cammingaburen in werkelijkheid bestaat uit woonwijken met veel tegeloppervlak en geen grasrijke omgeving (Figuur 11).
- De rekenresultaten komen vrijwel overeen voor bodemsoort (zand-klei of vochtig zand) en diepteligging (-1,20 m of -1,00 m).
- In scenario's (DFLT, SOIL, SURF) is $TSol$ gelijk aan $0,097 \pm 0,09$; $0,123 \pm 0,12$; $0,097 \pm 0,09$ (berekend met een nominale leidingdiameter van 300 mm over het hele traject, Tabel 3). De berekeningen met een diameter van 380 mm geven lagere waarden (ruwweg $TSol = 0,01 \pm 0,05$).
- In verband met de onzekerheid van de (uit een hydraulisch model berekende) verblijftijden, dient nog rekening gehouden te worden met een extra onzekerheid: ruwweg 20% toename in $TSol$, voor 10% langere verblijftijd.

Het bovenstaande in acht nemende, wordt geconcludeerd dat $TSol$ -waardes tussen 0 en 0,3 aannemelijk zijn, met een meest waarschijnlijke waarde van 0,1. Hierbij is uitgegaan van een zomerse situatie (vanwege de aannames in het bodemtemperatuurmodel 1D-BTM) en is variatie toegestaan in bodemsoort (klei-zand of vochtig zand) en diepteligging (-1,00 tot -1,20 m).





Figuur 17. Berekende D_3 -waarden voor scenario's DFLT, SOIL, SURF en PIPE en nominale binnendiameter van 300 mm ($D_1 = 297$ mm) en 380 mm ($D_1 = 380$ mm), zoals aangegeven met de labels. Kleuren weerspiegelen de verblijftijd zoals aangegeven met de kleurcodering in de legenda.

Tabel 3. Berekende D_3 -waardes: gemiddelde waarde ("gem"), standaarddeviatie ("stdev") en aantal meetpunten ("n"). D_3 -waardes zijn berekend voor drie zomerperiodes (2017, 2018, 2019), de drie zomers gecombineerd "comb") en de daarmee corresponderende T_{Sol} -waarden zijn weergegeven onder aanname van nominale diameter 300 mm (" T_{Sol300} "; $D_1=297$ mm) en 380 mm (" T_{Sol380} "; $D_1 = 380$ mm).

scenario	DFLT (D1=297 mm)					DFLT (D1=380 mm)				
zomer	2017	2018	2019	comb	T_{Sol}	2017	2018	2019	comb	T_{Sol}
gem	376.5	383.6	358.7	369.6	0.097	404.4	409.1	392.2	401.5	0.008
stdev	48.7	47.1	57.7	54.9	0.093	32.73	30.91	39.09	35.5	0.047
n	3261	5380	5414	14055	14055	3261	5380	5414	14055	14055
scenario	SOIL (D1=297 mm)					SOIL (D1=380 mm)				
zomer	2017	2018	2019	comb	T_{Sol}	2017	2018	2019	comb	T_{Sol}
gem	388.8	403.2	371.8	385.4	0.123	406.8	415.8	395.3	405.8	0.014
stdev	59.9	65.6	70.0	69.5	0.117	39.29	41.86	45.94	43.9	0.058
n	3172	5386	5397	13955	13955	3171	5386	5397	13954	13954
scenario	SURF (D1=297 mm)					SURF (D1=380 mm)				
zomer	2017	2018	2019	comb	T_{Sol}	2017	2018	2019	comb	T_{Sol}
gem	271.7	279.6	277.2	277.1	-0.059	327.5	333.1	330.7	331	-0.085
stdev	23.2	33.2	35.9	32.6	0.055	17.27	24.1	27.09	24.1	0.032
n	1728	3556	3023	8307	8307	1728	3556	3044	8328	8328
scenario	PIPE (D1=297 mm)					PIPE (D1=380 mm)				
zomer	2017	2018	2019	comb	T_{Sol}	2017	2018	2019	comb	T_{Sol}
gem	378.2	383.4	359.1	370.0	0.097	405.5	409	392.5	401.8	0.009
stdev	47.9	47.2	58.2	55.2	0.093	32.14	31.01	39.45	35.6	0.047
n	3272	5388	5411	14071	14071	3261	5380	5414	14055	14055

5 Discussie

De meest aannemelijke validatiewaarde uit de case studie Leeuwarden beschreven in dit rapport is bepaald als $TSol = 0$ tot $0,3$, met een meest waarschijnlijke waarde van $0,1$. Dit is lager dan de waarden die zijn afgeleid in een onafhankelijk uitgevoerde studie (Blokker e.a. (in voorbereiding): $TSol = 0,5$ tot $1,0$ voor een enkele leiding van 160 mm (Kralingen, Evides) en $TSol = 1$ voor distributiegebied met leidingdiameters tussen 63 en 400 mm (waarvan de meeste (51%) 110 mm) (Almere, Vitens). Bij de twee andere case studies werd opgemerkt dat de metingen niet tot een hoge nauwkeurigheid konden leiden vanwege de lage ΔTN -waarden (Kralingen) en grote onzekerheid in $T_{boundary}$ (Almere). Gezien de verschillende opzet van de 3 case studies is niet goed te zeggen welk validatieresultaat het meest betrouwbaar is. Voordelen van de case study Leeuwarden ten opzicht van Kralingen en Almere zijn:

1. de lange meetperiode van 30 maanden (tegen 2 weken en 1 dag voor Kralingen en Almere, respectievelijk). Dit maakt de validatie statistisch significanter en draagt bij aan inzicht in variaties op verschillende tijdschalen (dagelijks, voorjaar-zomer-najaar, meerdere jaren);
2. het grote aantal meetpunten (8307 tot 14071, afhankelijk van het scenario) maakt een statistisch significante validatie mogelijk;
3. (t.o.v. Kralingen) het gaat om een echte situatie, waarin een dynamisch evenwicht is ontstaan, zonder manipulatie van verblijftijden.

Case study Kralingen heeft als voordeel dat de leiding geen splitsingen bevat en de volumestroom is gemeten; daarmee is geen twijfel over de stroomsnelheid of bijmenging van water. In de case study Leeuwarden is bijmenging op leidingsplitsingen niet uit te sluiten, hoewel dit niet waarschijnlijk wordt geacht, omdat secundaire leidingen in het distributienet meestal geen water van afsplitsende leidingen ontvangen, maar hieraan voeden. Verder is de variatie in verblijftijden beperkt en zijn deze verblijftijden afgeleid uit gemodelleerde snelheden, waar beter zou zijn hiervoor metingen te gebruiken en/of de gevoeligheid van stroomsnelheden na te gaan.

Het is onduidelijk waarom de $TSol$ -waarde voor case study Leeuwarden lager is dan voor Kralingen en Almere. De verschillen kunnen samenhangen met onnauwkeurige modelaannames (bijvoorbeeld verkeerd ingeschatte thermische bodemeigenschappen), maar met onvoorziene invloedfactoren die niet in het model zijn opgenomen (bijvoorbeeld een mogelijke afhankelijkheid van $TSol$ met de leidingdiameter). Voor uitsluitel en een kwantitatief inzicht in de werkelijke warmte-uitwisseling tussen leiding, bodem en klimatologische en omgevingsfactoren is meer onderzoek nodig, bijvoorbeeld met een meer volledige 3-D numerieke modelstudie (d.w.z. een beschrijving van het tijdsafhankelijke probleem van warmte-uitwisseling tussen stromend leidingwater, bodem en klimatologische omstandigheden).

De selectie van het onderzoeksgebied (Sectie 3.5) onderstreept het belang van duidelijkheid over de sensorlocatie, zowel geografisch (welke leiding) als positie (distributieleiding, aansluitleiding, meterkast, etc.). De sensoren in het *leidingnet* bleken te veel van bovengenoemde onzekerheden te bevatten om te gebruiken in dit project. Dit is spijtig, omdat de metingen in potentie veel informatiewaarde hebben. Er kon wel gebruik worden gemaakt van temperatuurmetingen op DMA-grenzen.

De lange aaneengesloten meetperiode (30 maanden, metingen op elk kwartier) maakt de validatie statistisch gezien significanter en draagt bij aan inzicht in variaties op verschillende tijdschalen (dagelijks, seizoenen, verschillende jaren). Het was alleen mogelijk de zomerperiode te analyseren, omdat het bodemtemperatuurmodel 1D-BTM is gevalideerd voor de zomersituatie (van Rotterdam) en de invloed

van vorstvorming afwezig is (Agudelo-Vera e.a., 2017). In voorliggend onderzoek is niet nagegaan hoe de microklimaat-modelparameters doorwerken in de gemodelleerd bodemtemperatuur.

De nauwkeurigheid van de temperatuurmetingen is niet bekend. Een onnauwkeurigheid van 0,1 °C is gangbaar voor temperatuursensoren in drinkwaterleidingen. De onnauwkeurigheid beïnvloedt, via de genormaliseerde opwarming ΔTN , de berekende thermische invloedssfeer (D_3 en $TSOI$). De invloed is het grootst indien de bodemtemperatuur en de gemeten temperatuur aan het begin van het traject dicht bij elkaar liggen. Door toepassen van de filteroperatie $|T_{boundary}(t) - T_{water,0}(t)| < 1^\circ\text{C}$ (zie Sectie 3.1.2) was het mogelijk om de minst betrouwbare rekenresultaten weg te laten uit de analyse.

De berekende $T_{boundary}$ is afhankelijk van aannames in oppervlaktetype, bodemeigenschappen, weergegevens en leidingdiepte. De invloed van oppervlaktetype, bodemeigenschappen en leidingdiepte is inzichtelijk gemaakt met een gevoeligheidsanalyse. De leidingdiepte is slechts globaal bekend o.b.v. generieke expertkennis: ca. 1 meter is gangbaar voor leidingen in het Vitens-gebied. De gevoeligheidsanalyse laat zien dat de invloed van 20 cm diepere ligging nihil is. Dit suggereert dat het ontbreken van specifieke kennis van de diepteligging onbelangrijk is, binnen deze marge. De gevoeligheid van de uitkomsten voor *ondiepere* ligging zal logischerwijs groter zijn dan voor *diepere* ligging, aangezien verticale temperatuurgradiënten het sterkst zijn nabij het oppervlak. Er is in dit onderzoek niet nagegaan bij welke (on)diepte de invloed kritisch wordt.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

In dit onderzoek is de temperatuurverandering van drinkwater in het distributienet onderzocht over een leidingtraject van 1,1 km met leidingdiameters van 300 tot 380 mm. De temperaturen, gemeten met sensoren op twee DMA-grenzen, is vergeleken met modelvoorspellingen op basis van het 1D bodemtemperatuurmodel *1D-BTM* (Agudelo-Vera e.a., 2017), waarin de invloed van meteorologische omstandigheden (KNMI-weergegevens) en de stedelijke omgeving (oppervlaktetype en bodemsoort) zijn verdisconteerd. Het doel hiervan is validatie van modelparameter *TSol* die in het watertemperatuurmodel *WTM+* wordt gebruikt om temperatuursveranderingen te beschrijven. *TSol* is voor te stellen als de grootte van de thermische invloedssfeer als gevolg van warmte-uitwisseling tussen het leidingwater en de omliggende bodem, ten opzichte van de diameter van de leiding. (er geldt $D_3 \equiv D_2 + 2 \cdot TSol \cdot D_1$).

Met de gevolgde methode bleek het mogelijk om *TSol* te bepalen en inzicht te verkrijgen in de invloed van diepteligging, bodemsoort, en oppervlaktetype op de uitkomsten:

- De meest waarschijnlijke waarde voor case studie Leeuwarden is $TSol = 0$ (berekend met $D_1 = 380$ mm, d.w.z. een overschatting van de gemiddelde diameter op het traject) tot 0,3 (berekend met $D_1 = 300$ mm; een onderschatting), met een meest waarschijnlijke waarde van 0,1.
- De invloed van een 20 cm diepere ligging (scenario PIPE), t.o.v. het referentiescenario met een diepteligging van 1 m, is nihil (marginale verschillen in $T_{boundary}$, leidend tot een *TSol*-toename van slechts 0,1%).
- Het aannemen van een vochtige zandbodem, i.p.v. een zand-kleibodem in het referentiescenario, resulteert in een *TSol*-toename van 27% ($D_1 = 300$ mm) tot 75% ($D_1 = 380$ mm).
- Het aannemen van een oppervlakbedekking van gras i.p.v. tegels zorgt voor lagere bodemtemperaturen in de zomer zodat een kleinere thermische invloedssfeer volstaat om de gemeten temperaturen te verklaren. Dit gaat gepaard met een onrealistische uitkomst: $TSol < 0$.
- Het verschil tussen de zomers van 2017, 2018 en 2019 op de grootte van de thermische invloedssfeer is beperkt: <10% verschil tussen de berekende D_3 -waarden waarvan de *TSol*-waarden zijn afgeleid. Tijdens de zomers is er meer variatie (bijvoorbeeld verschil tussen dag en nacht) dan in het gemiddelde van de zomers. Bij het vertalen van *TSol*-waardes naar veiligheidsmarges voor TED of veilige afstanden tussen leidingen is het raadzaam om rekening te houden met deze (dagelijkse) variatie.

De validatie is succesvol. Dit hangt samen met de locatie: het traject in Cammingaburen bevindt zich direct na de overgang van transportleidingen naar verdeelleidingen op een afstand van ca. 10 km van het voedingspunt (Noardburgum). De metingen laten zien dat op deze locatie het drinkwater nog lang niet de bodemtemperatuur heeft aangenomen.

6.2 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

Het gebruik van continue sensormetingen in Leeuwarden maakte het mogelijk om over een lange periode (30 maanden) ca. 10.000 validatieberekeningen uit te voeren. Dit biedt een belangrijke meerwaarde t.o.v. validatie met bewerkelijke proefsleuven met ingegraven temperatuurmeters. De gevolgde aanpak biedt dan ook veel potentie. Evengoed volgen uit dit onderzoek een aantal geleerde lessen. Voor een verdere verbetering van het inzicht en aanscherping van de validatie is het nodig het aantal metingen en analyses

uit te breiden naar meerdere locaties die een grotere variatie aan specifieke omstandigheden omvatten (leidingdiameter, schaduwvorming, bodemsoort, etc.). Hiervoor dient het aantal metingen en analyses te worden uitgebreid. Daarbij dient rekening te worden gehouden met de onderstaande aanbevelingen. Deze kunnen worden beschouwd als onderdeel van een protocol voor toekomstige metingen in leidingnetten:

- Bruikbare volumestroommetingen
Meet daadwerkelijk volumestromen. Het meten van volumestromen in het leidingnet maakt het mogelijk om de werkelijke verblijftijden te bepalen, in plaats van deze in te schatten met een hydraulisch leidingnetmodel.
- Betrouwbare sensormetingen van de watertemperatuur
Draag zorg voor duidelijkheid over (i) de geografische locatie van de sensor in het leidingnet, (ii) de positie van de sensor (in de drinkwaterleiding, op de buitenwand, in de meterkast, etc.) en (iii) de onnauwkeurigheid van de sensormetingen. Punten (i) en (ii) gelden vooral voor sensoren in het leidingnet; voor de metingen op DMA-grenzen zijn deze i.h.a. bekend.
- Metten van temperatuur en thermische eigenschappen bodem
De voorspellingen met het WTM+ zijn gevoelig voor T_{boundary} , bepaald met het 1D-BTM dat weer gevoelig is voor thermische eigenschappen van de bodem. De onzekerheid in T_{boundary} kan worden verkleind (en het 1D-BTM gevalideerd) door de bodemtemperatuur en thermische eigenschappen van de bodem te meten.
- Breid de metingen en analyse uit naar meer trajecten.
De validatie wordt veelomvattender indien deze een grotere variatie bevat aan leidingdiameters, verblijftijden, grondsoorten, etc. Binnen de door Vitens beschikbaar gestelde meetgegevens van Leeuwarden is het voortraject van Cammingaburen (vanaf P.S. Noardburgum) geschikt als vervolgstap.
- Onderzoek de invloed van (gemodelleerde) verblijftijden op de opwarming.
De invloed van onzekerheid in de verblijftijd op de uitkomsten is nagegaan m.b.v. vergelijking (5)
De gevoeligheid van de uitkomsten voor verblijftijden is in dit onderzoek globaal ingeschat door te onderzoeken hoe de invloedssfeer (TSol) afhangt van de totale verblijftijd. Een meer nauwkeurig aanpak is het aanpassen van de dagfactor in het leidingnetmodel en daarmee de verblijftijden van individuele leidingstukken bepalen. Een nog gerichtere aanpak is om de verblijftijden in te schatten met actuele volumestroommetingen⁵. De onzekerheid is op twee manieren verder te verkleinen:
 - Plaats een aantal volumestroommeters op tactische locaties om snelheden over het gehele traject in kaart te brengen. Reken de gemeten snelheden om naar verblijftijden voor elk leidingstuk in het leidingtraject en gebruik deze in de leidingnetanalyse.
 - Bepaal het verbruik in de DMA met een balansberekening o.b.v. alle in- en uitgaande waterstromen (voor de DAM Cammingaburen zijn deze reeds beschikbaar). Integreer dit verbruik in het leidingnetmodel om zo de gemodelleerde snelheden (en verblijftijden) nauwkeuriger te bepalen.

⁵ In tegenstelling tot de sensoren in het leidingnet loggen de sensoren op DMA-grenzen wel de volumestromen. Daarmee is de stroomsnelheid aan het begin en eind van het traject bekend, maar dit geeft nog geen volledig beeld voor het gehele traject.

7 Referenties

Agudelo-Vera, C.; Avvedimento, S.; Boxall, J.; Creaco, E.; de Kater, H.; Di Nardo, A.; Djukic, A.; Douterelo, I.; Fish, K.E.; Iglesias Rey, P.L.; Jacimovic, N.; Jacobs, H.E.; Kapelan, Z.; Martinez Solano, J.; Montoya Pachongo, C.; Piller, O.; Quintiliani, C.; Ručka, J.; Tuhovčák, L.; Blokker, M. (2020), *Drinking Water Temperature around the Globe: Understanding, Policies, Challenges and Opportunities*. Water 2020, 12, 1049, <https://doi.org/10.3390/w12041049>.

Agudelo-Vera, C., Blokker, M., De Kater, H., Lafort, R. (2017). *Identifying (subsurface) anthropogenic heat sources that influence temperature in the drinking water distribution system*. Drink. Water. Eng. Sci., 10, p.83-91, <https://doi.org/10.5194/dwes-10-83-2017>.

Blokker, E.J.M., Pan Q. (in voorbereiding). *Validation of an enhanced drinking water temperature model during distribution*.

Blokker, E.J.M., Pieterse-Quirijns, E.J. (2013). *Modelling temperature in the drinking water distribution system*. J. American Water Works Association, pE19-E28. <http://dx.doi.org/10.5942/jawwa.2013.105.0011>.

Geudens, P.J.J.G., Van Grootveld, J. (2017). *Drinkwaterstatistieken 2017*. Vewin, Den Haag.

Van der Molen, M.K. (2002). *Meteorological impacts of land use change in the maritime tropics*. Ph.D. thesis, Vrije Universiteit, Amsterdam.

Van der Molen, M., Kooij, M., Smulders, E.F.P.A., Heijman, S.G.J. (2008). *Warmteindringing in de bodem*, Rapport BTO 2008.053, 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*. Deltares rapport 11201825-000-HYE-0008.

Van Esch, J. M. (2022). *Engine – BTM+ model and Expert tool*. Deltares rapport 11205555-006-GEO-0001-v2-engine.

Vewin (2019). *Kerngegevens Drinkwater 2020*. Vewin, Den Haag.

Adres

Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht

Postadres

Postbus 80015
3508 TA Utrecht

Telefoon

088 866 42 56

E-mail

contact@warmingup.info

Website

www.warmingup.info