



Mirjam Blokker, KWR Watercycle Research Institute
 Ilse Pieterse-Quirijns, KWR Watercycle Research Institute

Model voor de berekening van de watertemperatuur in het leidingnet

Volgens het Waterleidingbesluit mag de temperatuur van het water in het leidingnet niet hoger zijn dan 25°C. Die temperatuur wordt bijna volledig bepaald door de temperatuur van de bodem waarin de leidingen zich bevinden: het water verblijft namelijk zo lang in het leidingnet dat het de bodemtemperatuur aanneemt. De bodemtemperatuur wordt bepaald door de buitentemperatuur, de straling van de zon en een combinatie van de warmtegeleiding en -capaciteit van de bodem. In warme jaren, zoals 2006, kan de watertemperatuur gedurende enkele dagen boven 25°C stijgen. Als gevolg van klimaatverandering kan dit vaker gaan optreden. Met voorspellingsmodellen kunnen waterbedrijven tijdens warme perioden onderbouwd maatregelen nemen en bovendien preventieve maatregelen nemen bij de aanleg van nieuwe leidingen. Binnen het bedrijfstakonderzoek wordt momenteel onderzocht welke gevolgen verhoogde temperaturen in het leidingnet kunnen hebben voor de microbiologische waterkwaliteit.

Bij een hoge buitentemperatuur kan de temperatuur van het drinkwater mogelijk opwarmen tot boven 25°C, waardoor het water aan de tapkraan niet meer voldoet aan de eisen in het Waterleidingbesluit. Hoewel bij reguliere inspectie vrijwel nooit een overschrijding van deze grens wordt geconstateerd, is op basis van onderzoek van de toenmalige Tilburgse WaterleidingMaatschappij (nu Brabant Water) in 2005 geconstateerd dat op sommige plaatsen in het leidingnet van Tilburg de temperatuur inderdaad de 25°C benadert. Gelijktijdige metingen van bodemtemperaturen en temperaturen in de leidingen toonden aan dat de watertemperatuur in de leidingen zeer snel de bodemtemperatuur benaderde; gedurende laag verbruik 's nachts was de watertemperatuur vrijwel gelijk aan de bodemtemperatuur¹⁾.

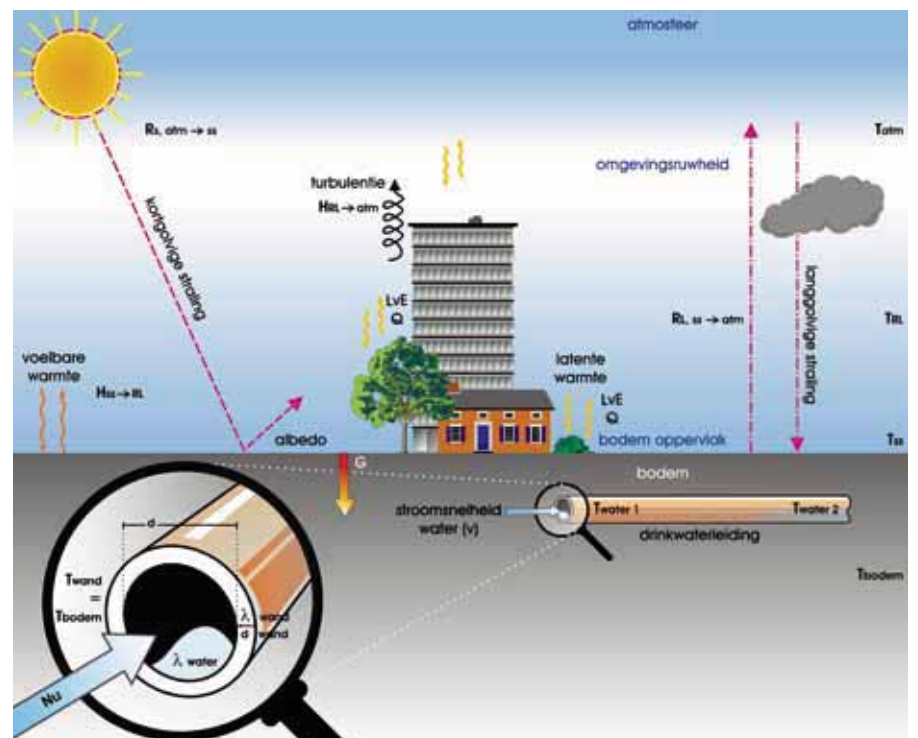
Afbeelding 1 toont schematisch welke factoren een rol spelen bij de opwarming van de bodem en het water. In eerder onderzoek is een model ontwikkeld dat de opwarming van de bodem goed kan voorspellen, op basis van de bodemeigenschappen warmtecapaciteit en warmtegeleidingcoëfficiënt en enkele weergegevens, zoals zonnestraling, temperatuur en wind²⁾. Ook houdt het model rekening met de bedekking van de bodem. Is die verhard of begroeid?

De mate van opwarming van het leidingwater is afhankelijk van de tijd dat het water in contact staat met de warme omgeving.

Ook het optreden van stroming van het water in de leiding speelt een rol bij de snelheid van opwarming: bij een hoge stroomsnelheid verloopt de opwarming sneller dan bij stilstaand water. De uiteindelijke temperatuur die het water bereikt, is

afhankelijk van de verblijftijd, die weer korter is bij een hogere stroomsnelheid. De opwarmingsnelheid is bovendien afhankelijk van de verhouding tussen het contactoppervlak tussen leiding en omgeving en het volume van het water dat door de leiding stroomt.

Afb. 1: Schematische weergave van de opwarming van het water in een leiding onder invloed van weersomstandigheden en bodemeigenschappen.



Wanneer die verhouding relatief groot is (een aansluitleiding), zal het water veel sneller de omgevingstemperatuur bereiken dan bij een kleine verhouding (een transportleiding). Om dit verder te kwantificeren, is een model opgesteld om de opwarming (of afkoeling) van het drinkwater in het leidingnet onder invloed van de bodemtemperatuur te voorspellen. In afbeelding 1 komt dit model overeen met het gedeelte in het vergrootglas.

Modelontwikkeling voor de drinkwatertemperatuur

Drinkwaterleidingen liggen in Nederland ongeveer één meter diep. De bodemtemperatuur verandert daar gedurende het jaar geleidelijk; voor het water dat door de leidingen stroomt, wordt de bodemtemperatuur op een gegeven dag als constant verondersteld. In de zomer vindt middels geleiding energietransport plaats van de bodem naar de binnenkant van de leidingwand. Hierbij zijn de geleidingscoëfficiënt van de wand (λ_{wand}) en de dikte van de wand (d_{wand}) de bepalende factoren. Vervolgens wordt de energie van de leidingwand naar het leidingwater overgedragen door convectie. De convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt (α) hangt onder andere af van de grootte van de volumestroom, de warmte-eigenschappen van het water en de diameter van de leiding.

De warmteoverdracht van de twee processen samen is te bepalen met de volgende formule:

$$\frac{dT_{water}}{dt} = \frac{2k}{\rho_{water} r C_{p,water}} (T_{buitenwand} - T_{water})$$

waarin T_{water} de temperatuur van het totale watervolume (K) is, $T_{buitenwand}$ de temperatuur aan de buitenkant van de leidingwand (welke gelijk is aan de bodemtemperatuur), r de radius van de leiding en k het totale warmtedoorgangcoëfficiënt ($W/m^2 \cdot K$):

$$k = \frac{1}{\frac{d_{wand}}{\lambda_{wand}} + \frac{1}{\alpha}}$$

In k liggen de waarden voor de parameters die de geleiding bepalen (λ_{wand} en d_{wand}) vast; dit zijn namelijk materiaaleigenschappen. De waarde voor α , die de convectie bepaalt, is te berekenen met het dimensieloze getal van Nusselt (Nu), de warmtegeleidingcoëfficiënt van het water (λ_{water}) en de inwendige diameter (d). In het getal van Nusselt zit de invloed van de stroming van het water op de warmteoverdracht verwerkt via het Reynoldsgetal. De grootte van het Reynoldsgetal is namelijk direct gerelateerd aan de stroomsnelheid van water.

Onder de voorwaarden dat op tijdstip $t = 0$ het water een gegeven begintemperatuur heeft ($T_{water}(t=0) = T_{water,0}$) en dat na oneindige tijd de watertemperatuur gelijk is aan de temperatuur van de buitenwand ($T(t=\infty) = T_{buitenwand}$), kan een analytische oplossing worden gevonden voor de opwarming van het leidingwater over de tijd:

$$T_{water}(t) = T_{bw} - (T_{bw} - T_{water,0}) \cdot e^{\frac{-2 \cdot k}{\rho_{water} r C_{p,water}} \cdot t}$$

Invloed leidingmateriaal en diameter

Afhankelijk van het leidingmateriaal, de leidingdiameter en eventueel de stroomsnelheid warmt het leidingwater snel of langzaam op. De afbeeldingen 2 t/m 4 laten de opwarmtijd voor een aantal standaard-situaties zien.

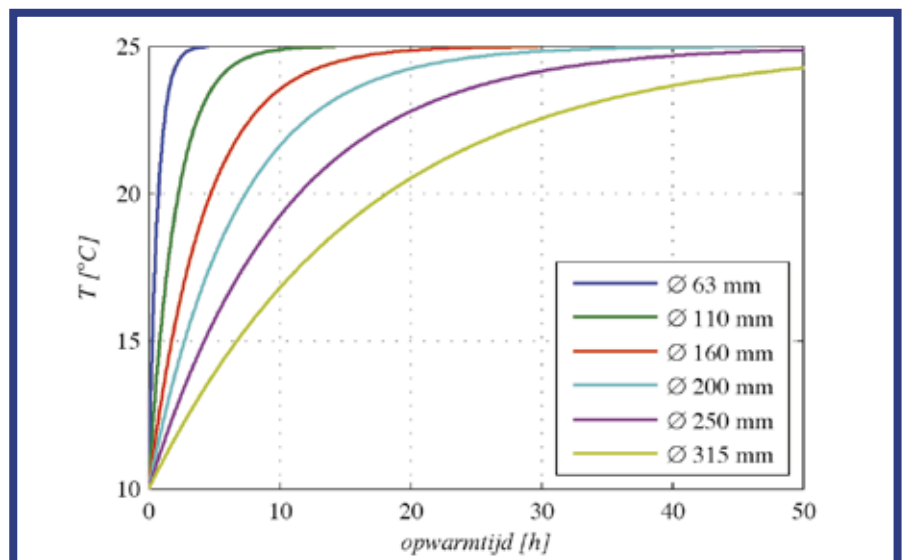
Gietijzer (GIJ) is een geleidend materiaal. De geleiding door de wand zal sneller gaan dan de opwarming van het water door convectie. De opwarmtijd hangt dan sterk samen met de stroomsnelheid. Hoe hoger de stroomsnelheid, des te korter de opwarmtijd. Bij een hogere stroomsnelheid is de verblijftijd van het water in het leidingnet ook korter. Het water kan dan toch sterk opwarmen, doordat de opwarmtijd korter is.

PVC is een warmte-isolerend materiaal. Voor PVC-leidingen geldt dan ook dat de geleiding door de wand langzamer gaat. De

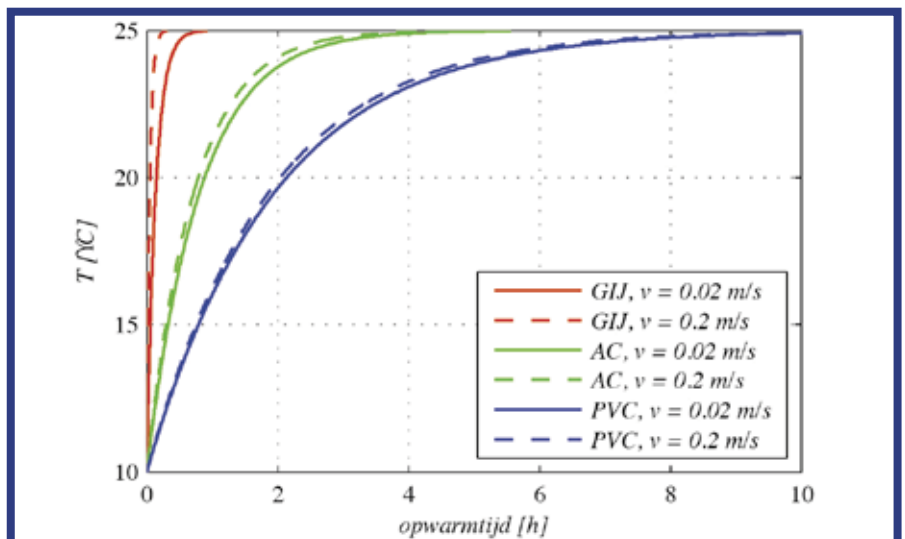
opwarmtijd van het drinkwater hangt niet of minder af van de stroomsnelheid van het water. De leidingdiameter is in geval van PVC wel een belangrijke parameter. In afbeelding 2 is te zien dat het twaalf uur duurt voordat het water in een Ø110 mm PVC-leiding opwarmt van 10 naar 25°C. Voor een leiding met een grotere diameter duurt het langer om op te warmen. Wanneer een bepaalde hoeveelheid water getransporteerd moet worden, heeft de vergroting van de diameter echter geen effect op de totale opwarming, doordat de reistijd van het water in gelijke mate toeneemt met de opwarmtijd. Wanneer bijvoorbeeld water door een leiding van Ø110 mm twaalf uur onderweg is (snelheid van 0,1 m/s), zal over dezelfde afstand van circa 4,3 km het water door een Ø200 mm leiding 40 uur onderweg zijn. De opwarmtijd van 10 naar 25°C van water in een Ø200 mm leiding bedraagt ook 40 uur (zie afbeelding 2).

AC-leidingen en gietijzeren leidingen met een cementcoating geleiden de warmte veel minder en lijken meer op PVC. Voor AC-leidingen en (gecementeerde) gietijzeren

Afb. 2: Opwarmtijd van water in PVC-leidingen met verschillende diameters, een begintemperatuur van 10°C en een bodemtemperatuur van 25°C, en snelheid (kleiner of) gelijk aan 0,1 m/s.



Afb. 3: Opwarmtijd van water in Ø100 mm gietijzeren, asbestcement- en PVC-leidingen met verschillende snelheden, een begintemperatuur van 10°C en een bodemtemperatuur van 25°C.



leidingen geldt dat de stroomsnelheid wel een rol speelt, maar slechts in beperkte mate. Voor typische gemiddelde snelheden in het leidingnet kunnen gelijksoortige lijnen worden getrokken, zoals te zien is in afbeelding 3. De opwarmtijd van een Ø100 mm AC-leiding van 10 naar 25°C bedraagt circa vier uur.

Of het drinkwater daadwerkelijk opwarmt, is afhankelijk van de verblijftijd in de leiding. Is de verblijftijd langer dan de opwarmtijd, dan zal het leidingwater de temperatuur van de bodem aannemen. In afbeelding 4 zijn op logaritmische schaal de opwarmtijd en verblijftijd van water te zien in verschillende GIJ-leidingen bij variërende stroomsnelheid.

Opwarming in de praktijk

In de praktijk geven de opwarmtijden van afbeelding 4 aan dat de opwarming van het leidingwater in transportleidingen slechts gering is. Transportleidingen hebben namelijk vaak een grote diameter. Het water heeft ook relatief hoge snelheden, waardoor het drinkwater een beperkte verblijftijd

heeft. Een verblijftijd van 24 tot 48 uur is dan korter dan de opwarmtijd (zie afbeelding 4). Bovendien liggen deze leidingen vaak dieper dan distributieleidingen, waardoor 's zomers de bodemtemperatuur lager is dan rond distributieleidingen. De opwarming in aansluitleidingen zal ook beperkt zijn. Deze leidingen hebben wel kleine diameters en liggen wat minder diep, maar de verblijftijd van leidingwater is over het algemeen kort. 's Nachts is er wel een lange verblijftijd, maar het dan opgewarmde water verdwijnt met de eerste toiletspoeling.

De temperatuur van het water in de distributieleiding is een maat voor de temperatuur aan de tap. In het distributienet is sprake van relatief kleine diameters en lange verblijftijden; over het algemeen langer dan twaalf uur. Dat betekent dat het drinkwater in distributieleidingen vrijwel altijd de bodemtemperatuur zal aannemen, ongeacht de temperatuur af productiestation en ongeacht het leidingmateriaal. De bodemtemperatuur geeft dus voldoende informatie over de temperatuur van het water in een

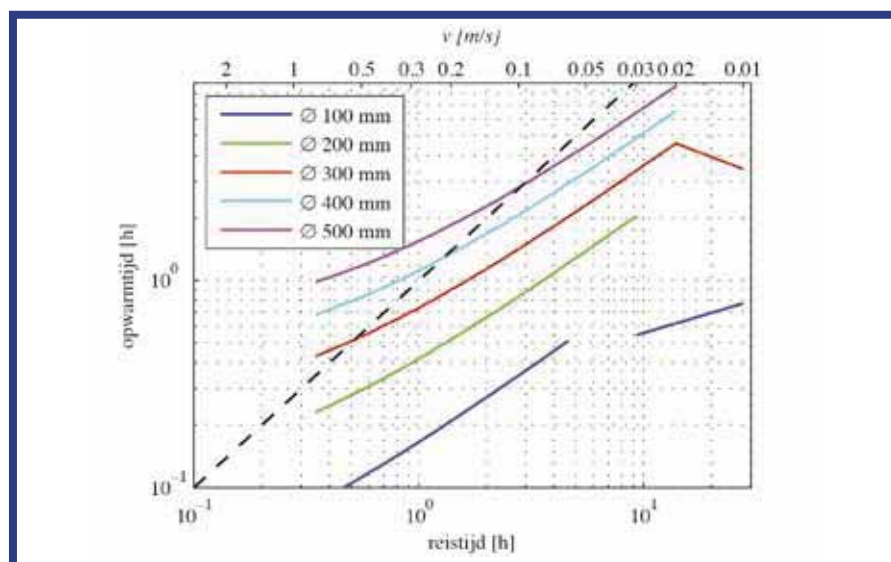
distributieleiding en aan de tap. Het model dat de bodemtemperatuur voorspelt, is dan voldoende om de temperatuur in het leidingnet te voorspellen. Het vereenvoudigde model voor de temperatuur van het leidingwater houdt dus in dat de temperatuur van het leidingwater gelijk is aan de bodemtemperatuur op de diepte van het distributienet.

Validatie van het model

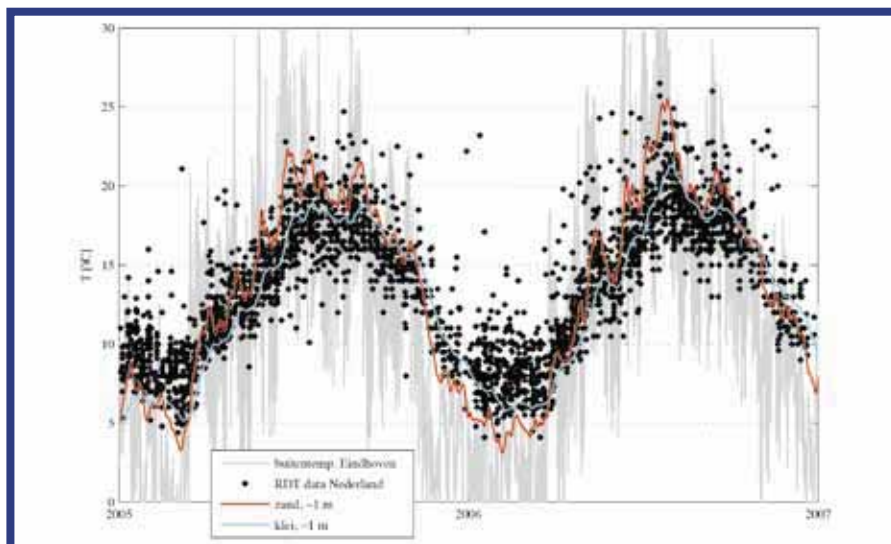
Een manier om dit model (de temperatuur van het leidingwater is gelijk aan de bodemtemperatuur op de diepte van het distributienet) te valideren, is het vergelijken van de gemodelleerde bodemtemperatuur in snel opwarmend zand en langzamer opwarmende klei met temperaturen gemeten aan de tap. Ten behoeve van een onderzoek naar metalen in drinkwater zijn bij de waterbedrijven de resultaten van de RDT-bemonstering (random daytime) aan de tap opgevraagd³; van deze monsters is ook de temperatuur gemeten. Afbeelding 5 laat zien dat de hoogste temperaturen in de zomer en de laagste temperaturen in de winter het best beschreven worden door de bodemtemperatuur in zand; de meer gemiddelde waarden worden beter beschreven door de bodemtemperatuur in klei. Omdat de lokale omstandigheden van de metingen aan de tap (lokale weersomstandigheden, bodemssoort, diepte van de leidingen, leidingmateriaal, verblijftijd, invloed binneninstallatie) niet bekend zijn, is dit een zeer grove manier om het model te valideren. De trend is wel duidelijk; de correlatie tussen de bodemtemperatuur en de temperatuur aan de tap is veel sterker dan de correlatie tussen de buitentemperatuur en de temperatuur aan de tap. Afbeelding 5 toont dat in de warme zomer van 2006 de temperatuur in de zandgronden rond Eindhoven op één meter diepte gedurende zeven dagen boven de 25°C uitkwam.

Voor een preciezere validatie met beter bekende lokale omstandigheden is gebruik gemaakt van de metingen die in de zomer van 2008 zijn gedaan in het leidingnet van de boulevard van Zandvoort⁴. Dit leidingnet wordt op druk gebracht door een booster pomp. Het leidingnet bestaat grotendeels uit gecementeerde gietijzeren leidingen met een Ø150 mm diameter; de exacte diepteligging is niet bekend. Tijdens de proef is gedurende twee maanden de temperatuur gemeten direct na de watermeter in een hotel (meetlocatie 3) en een flatgebouw (meetlocatie 4). De gemiddelde verblijftijd tot meetlocatie 3 is ongeveer tien uur, tot locatie 4 ongeveer 35 uur vanaf het boosterstation. De verblijftijd tussen het pompstation en het boosterstation en de temperatuur waarmee het drinkwater het boosterstation bereikt, zijn niet bekend. Met behulp van het eerder ontwikkelde model voor de opwarming van de bodem² is de temperatuur van de bodem bepaald. Het bodemtype van de boulevard is zand. Verder zijn de gemeten bodemparemeters gebruikt van de zandbodem in Breda⁵. De gebruikte weergegevens zijn de uurdara van Schiphol⁶. De invloed van de

Afb. 4: Reistijd (= verblijftijd) en opwarmtijd van leidingwater in gietijzeren leidingen van variërende diameter bij verschillende stroomsnelheden.



Afb. 5: Gemodelleerde bodemtemperatuur op 1m diepte in zand- en kleigrond (KNMI-uurwaarde van Eindhoven) en de gemeten temperatuur aan de tap in random daytime (RDT)-monsters.



wind in Zandvoort is groter dan in Breda; daarmee is rekening gehouden in het model.

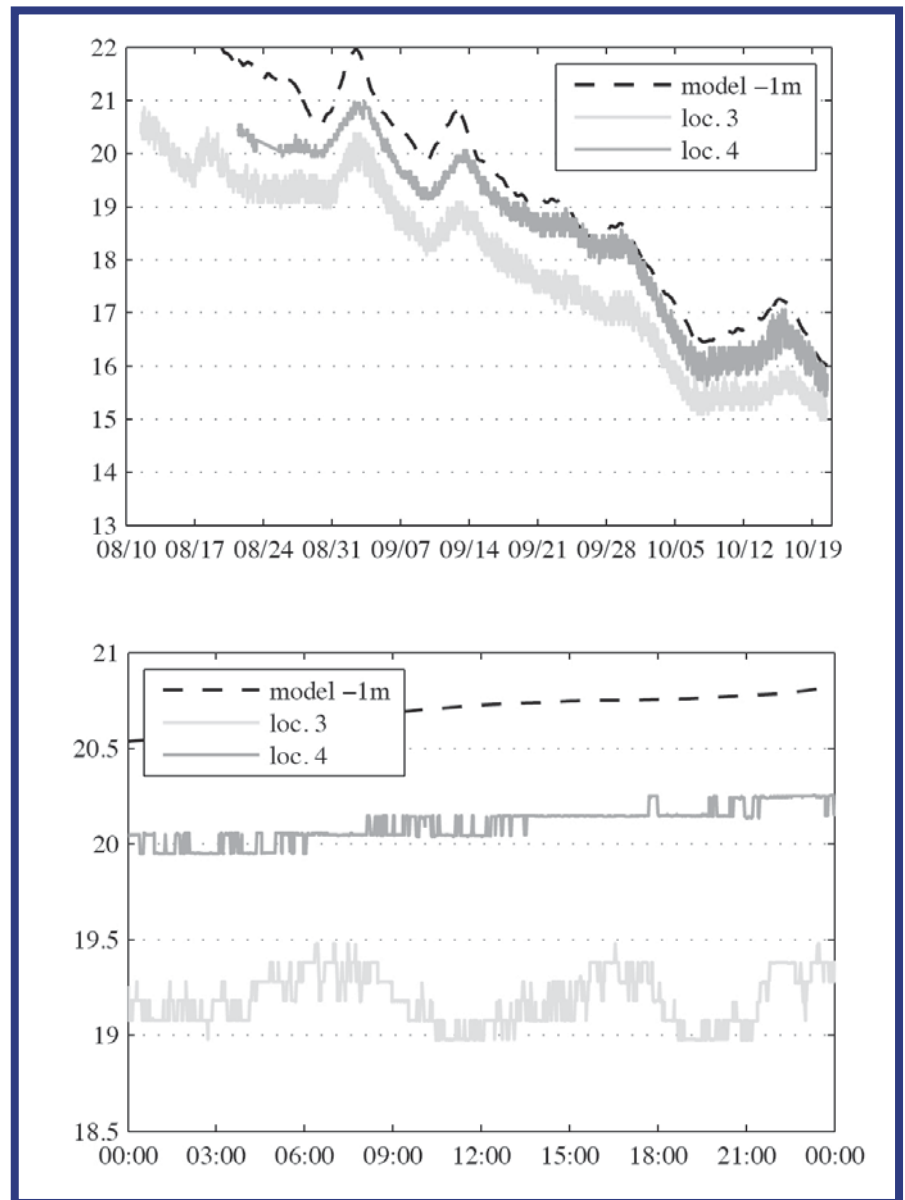
De hypothese is dat de verblijftijd lang genoeg is voor het leidingwater om de bodemtemperatuur aan te nemen. Afbeelding 4 laat immers zien dat voor een gietijzeren leiding van $\varnothing 150$ mm de opwarmtijd veel kleiner is dan de gemiddelde verblijftijd naar locatie 3 en 4 (van tien tot 35 uur). Om de hypothese te valideren, worden de temperatuurmetingen vergeleken met de modeluitkomsten van de bodemtemperatuur op één meter diepte (zie afbeelding 6). Het verloop over de tijd van de gemeten en gemodelleerde temperatuur op de twee locaties is gelijk, maar de temperatuur op locatie 3 ligt circa $1,5^{\circ}\text{C}$ lager dan de modelwaarden en op locatie 4 circa $0,8^{\circ}\text{C}$ lager dan de modelwaarden. Mogelijk is de bodemtemperatuur rond de leidingen iets lager dan het model aangeeft, bijvoorbeeld omdat de leidingen dieper dan één meter liggen. Daarnaast is op locatie 3 nog enigszins een patroon over de dag waar te nemen met een iets hogere temperatuur na de lange verblijftijd in de nacht en vlak voor de avond. Dat betekent dat met de kortste verblijftijd (ongeveer vijf uur) nog niet de maximale temperatuur is bereikt; bij iets langere verblijftijden is dat wel het geval.

Conclusies

Voor bestaande leidingen geldt dat de opwarming van het leidingwater goed kan worden voorspeld met behulp van het model voor de bodemtemperatuur, historische weergegevens en weersvoorspellingen. Op veel plaatsen in het leidingnet zal de temperatuur van het leidingwater gelijk zijn aan de bodemtemperatuur rond de distributieleiding, die op circa één meter diepte ligt. In de zomer warmt het water vanaf het pompstation op. In warme jaren, wanneer ook het voorjaar al warm is, kan de temperatuur op één meter diepte boven de grens van 25°C uitkomen. Als gevolg van de verwachte klimaatverandering kan dit in de toekomst vaker optreden. Onduidelijk is nog wat dat betekent voor de waterkwaliteit. Onderzoek naar de invloed van de temperatuur loopt momenteel binnen het bedrijfstakingonderzoek voor de waterbedrijven (BTO-programma Microbiologie). Daarin wordt vooral onderzocht wat de invloed van de temperatuur is op de nagroei van opportunistische ziekteverwekkende micro-organismen.

Waterbedrijven kunnen op basis van de voorspellingen uit deze modellen tijdig maatregelen nemen. De aard van de maatregelen is uiteraard afhankelijk van de effecten van een verhoogde temperatuur op de microbiologische waterkwaliteit. Een mogelijkheid kan zijn om te spoelen of spuien op de zogenaamde 'hotspots'. Dit is echter alleen afdoende als de verblijftijd zeer kort is. Het opwarmingsproces kan wel vertraagd worden door de grondlaag boven de leiding te bevochtigen (beregenen van het leidingtracé).

In leidingen in kleigrond, onder begroeiing of op grotere diepte zullen minder snel



Afb. 6: Temperatuur in de zomer van 2008 in Zandvoort, gemeten op twee locaties en de gemodelleerde bodemtemperatuur op één meter diepte. Onder is ingezoomd op 30 augustus 2008.

hoge watertemperaturen ontstaan dan in leidingen in zand, onder bestrating of op minder grote diepte. Bij de aanleg van nieuwe leidingen kan overwogen worden om leidingen dieper te leggen. Begroeiing aanbrengen langs het leidingtracé voorkomt tevens hoge watertemperaturen. Een andere maatregel kan zijn om de structuur van het leidingnet zodanig te ontwerpen dat zeer kleine verblijftijden ontstaan, zodat het water de kans niet krijgt om tot de bodemtemperatuur op te warmen.

Het aanleggen van leidingen in ander leidingmateriaal heeft niet veel zin. Ander leidingmateriaal leidt hooguit tot een vertraging van de opwarming. Het leggen van leidingen met een grotere diameter heeft ook geen effect op de totale opwarming. Bij het transporteren van eenzelfde hoeveelheid water worden de verblijftijd en de opwarmtijd immers evenredig groter. Bovendien heeft een lage stroomsnelheid een negatief effect op de waterkwaliteit, doordat deeltjes bezinken en na opwarming tot bruin water kunnen leiden.

LITERATUUR

- 1) Smulders E. (2006). Temperatuurfluctuaties in waterdistributienetten, Tilburgsche WaterleidingMaatschappij.
- 2) Van de Molen M., I. Pieterse-Quirijns, A. Donocik en E. Smulders (2009). Eigenschappen bodem en oppervlak beïnvloeden temperatuurstijging rond drinkwaterleidingen. H₂O nr. 7, pag. 33-36.
- 3) Slaats N., M. Blokker en A. Versteegh (2008). Eerste inventarisatie van gemeten concentraties lood, koper, nikkel en chroom in drinkwater. H₂O nr. 3, pag. 37-40.
- 4) Blokker M. en H. Beverloo (2009). Verblijftijden leidingnet Zandvoort; Metingen boulevard Zandvoort zomer 2008. KWR Watercycle Research Institute. KWR 09.010 (DPW).
- 5) Van de Molen M., H. Kooij, E. Smulders en B. Heijman (2008). Warmteindringing in de bodem. KWR Watercycle Research Institute. BTO 2008.053.
- 6) Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (...). Onderzoeksgegevens t.b.v. VROM.