



Michiel van der Molen, Vrije Universiteit Amsterdam
 Ilse Pieterse-Quirjns, KWR Watercycle Research Institute
 Agata Donocik, Brabant Water
 Ed Smulders, Inter Pro Advies

Eigenschappen bodem en oppervlak beïnvloeden temperatuurstijging rond drinkwaterleidingen

Volgens het Waterleidingbesluit mag de temperatuur van het water in het leidingnet niet hoger zijn dan 25°C. In 2005 zijn op een aantal locaties in het leidingnet van Tilburg tijdens een langdurige warme periode hogere temperaturen gemeten. De temperatuur in het leidingnet wordt sterk beïnvloed door de temperatuur van de omliggende bodem. Om te bepalen wat de invloed is van het weer, bodemtype en bestrating op de opwarming van de bodem op de diepte waar leidingen liggen, heeft de Vrije Universiteit Amsterdam samen met KWR Watercycle Research Institute hiervoor een model ontwikkeld en getoetst aan temperatuurmetingen uit de praktijk. Het model blijkt de temperatuur in de bodem op verschillende dieptes en onder verschillende omstandigheden zeer goed te voorspellen.

Bij een hoge buitentemperatuur kan de temperatuur van het drinkwater mogelijk opwarmen tot boven 25°C, waardoor een waterbedrijf niet meer voldoet aan het Waterleidingbesluit. Hoewel bij reguliere inspectie vrijwel nooit een overschrijding van deze grens wordt gevonden, is op basis van onderzoek van de toenmalige Tilburgsche Waterleiding-Maatschappij (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 benadert; gedurende laag verbruik 's nachts is de watertemperatuur vrijwel gelijk aan de bodemtemperatuur¹⁾.

De mate van opwarming van het leidingwater zal afhankelijk zijn van de tijd dat het water in contact staat met de warme omgeving. De opwarmingssnelheid is bovendien afhankelijk van de verhouding tussen oppervlak en volume. Wanneer die verhouding relatief groot is (een aansluitleiding), zal het water veel sneller de

omgevingstemperatuur bereiken dan bij een kleine verhouding (een transportleiding).

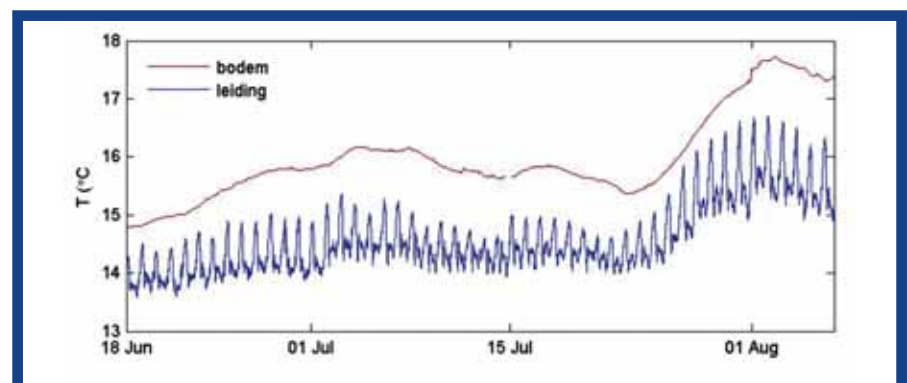
Om te bepalen welke factoren van invloed zijn op de opwarming van de bodem en daarmee het water in het leidingnet, voerde de Vrije Universiteit Amsterdam in het kader van het bedrijfstakonderzoek een monitorprogramma uit. Dit onderzoek is uitgevoerd in samenwerking met KWR Watercycle Research Institute en Brabant Water op drie locaties in Breda. Zowel boven als in de

grond en in het leidingnet zijn temperatuurmetingen uitgevoerd. Deze zijn gebruikt als basis voor een model dat de opwarming van de ondergrond voorspelt.

Vergelijking temperatuur bodem en leidingwater

Van 18 juni tot en met 6 augustus 2008 zijn metingen uitgevoerd van de bodemtemperatuur en de temperatuur in een leiding (200 mm PVC). Deze leiding wordt voornamelijk gevoed vanaf pompstation

Afb. 1: Vergelijking van bodemtemperatuur op één meter diepte en de temperatuur van het water in de transportleiding bij de meetlocatie bij Brabant Water.



Oosterhout en ligt op ongeveer een meter diepte. De verblijftijd van het drinkwater tussen het pompstation en de meetlocatie bedraagt naar schatting tussen vijf en negen uur. De temperatuur bij pompstation Oosterhout varieert tussen 11,3°C en 13,2°C; het jaargemiddelde bedraagt 12,5°C. Afbeelding 1 laat zien dat de leiding-watertemperatuur overdag continu ruim één graad lager is dan de bodemtemperatuur op een meter diepte. In de nacht loopt de temperatuur in de leiding op tot ongeveer een halve graad onder de bodemtemperatuur. In de ochtend neemt de leiding-watertemperatuur onder invloed van de toenemende doorstromingsnelheid snel af. Onduidelijk is of het gevonden temperatuurverschil gedurende de nacht reëel is of dat het gaat om een absolute fout in de (opstelling van de) meetsensoren. Wel maakt deze meting duidelijk dat de temperatuur van het leidingwater heel snel de bodemtemperatuur benadert.

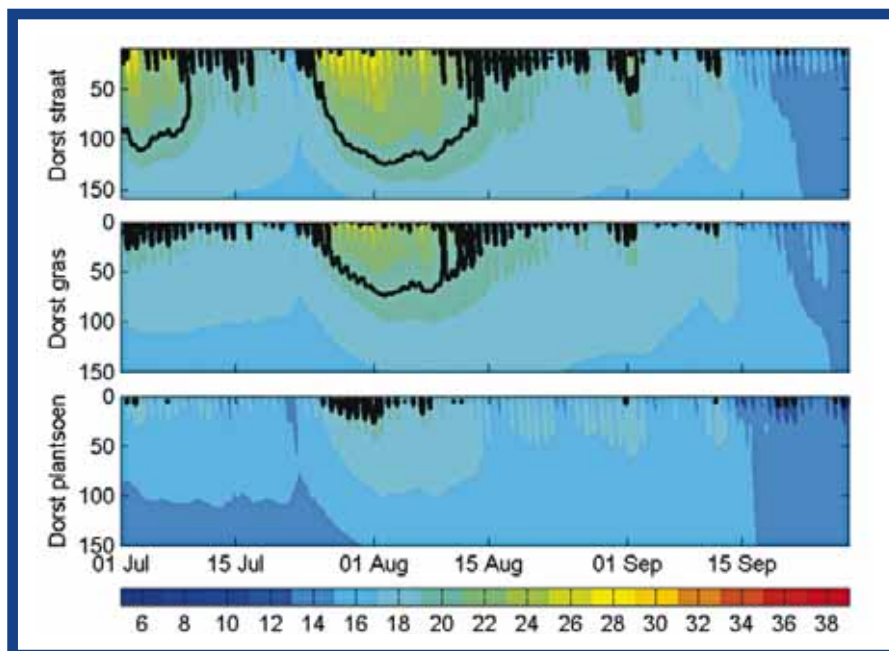
Omdat de temperatuur van de bodem een belangrijke bijdrage levert aan de opwarming van het leidingwater, is een studie uitgevoerd naar de invloed van verschillende factoren op de opwarming van de bodem op de diepte van het drinkwater. Transportleidingen liggen op circa 1,20 meter diepte, hoofdleidingen op ongeveer één meter diepte en aansluitleidingen liggen nog wat minder diep. Onderzochte factoren zijn weersgesteldheid, oppervlaktegesteldheid en thermische eigenschappen van de bodem. Om de variabiliteit van deze factoren en hun relatieve belang vast te stellen, is een experimentele aanpak gecombineerd met een modelmatige aanpak. De experimentele aanpak bestond uit metingen van de weersgesteldheid door middel van een weerstation, geïnstalleerd op pompstation Dorst en metingen van bodemtemperaturen op verschillende dieptes en onder drie verschillende oppervlaktetypes (bestration, gras en plantsoen). Ruimtelijke variatie in weersgesteldheid in relatie tot het oppervlaktetype werd gemeten met een mobiel weerstation. Thermische bodemeigenschappen werden bepaald met gespecialiseerde apparatuur.

Experimentele aanpak

Het weer beïnvloedt de opwarming van de bodem op verschillende manieren: via straling die het oppervlak bereikt, via de luchttemperatuur en via de windsnelheid. In dit onderzoek is daarom een weerstation gebruikt dat uitgerust is met stralings-sensoren, thermometers en een windmeter.

Reflectie en verdamping

Het oppervlaktetype is op twee manieren van belang voor de opwarming van de bodem als gevolg van de weersgesteldheid. In de eerste plaats is het albedo van belang. Albedo is de reflectiecoëfficiënt van de bodem voor zonlicht. Als het albedo laag is, absorbeert het oppervlak meer zonlicht en wordt het warmer. Het albedo is gemeten voor verschillende oppervlaktetypes op pompstation Dorst en in Breda en varieert van 0,20 voor begroeide oppervlaktes tot 0,11-0,14 voor verschillende types bestrating.



Afb. 2: Het verloop van temperatuur met diepte en in tijd onder bestrating (boven), gras (midden) en plantsoen (onder) op pompstation Dorst. De kleur geeft de temperatuur aan volgens de onderstaande schaal. De zwarte lijnen geven de contouren aan van de 10, 20 en 30°C intervallen. De verticale schaal geeft de diepte aan in centimeters.

Dit houdt in dat een bestraat oppervlak tot tien procent meer zonlicht absorbeert dan een begroeide oppervlak. Daarnaast is het effect van verdamping door planten van belang: tijdens droge dagen is de verdamping van bestrate oppervlaktes te verwaarlozen, terwijl die van begroeide oppervlaktes aanzienlijk is.

Thermische eigenschappen

Hoe de temperatuur in de bodem door het weer verandert, hangt ook af van de combinatie van de warmtegeleidingcoëfficiënt en de warmtecapaciteit van de bodem. Hoe groter de warmtegeleidingcoëfficiënt van de bodem, des te dieper de warmte zich in de bodem verdeelt. Hoe groter de warmtecapaciteit van de bodem, des te meer

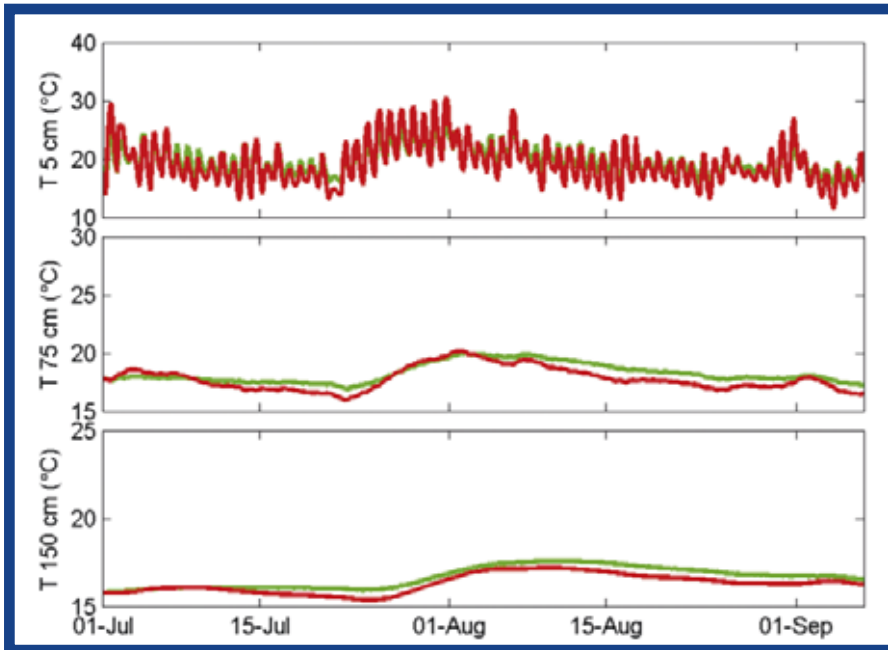
energie nodig is om de bodemtemperatuur te laten stijgen.

Gemeten bodemtemperatuur

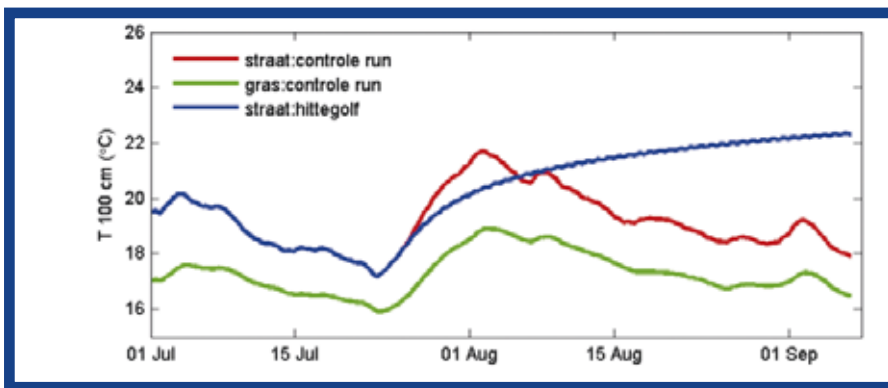
Op pompstation Dorst zijn in de zomer van 2008 bodemtemperaturen gemeten onder drie oppervlaktetypes (bestration, gras en plantsoen) en op zes tot acht verschillende dieptes tussen 0 en 150 cm diep. De meetresultaten zijn te zien in afbeelding 2. De figuur laat zien dat er twee grote warme periodes zijn geweest (begin juli en begin augustus) en een kleinere warme periode begin september. Eind juli bereikt de temperatuur op 60 cm onder bestrating de grens van 25°C. De bodem wordt duidelijk warmer onder bestrating dan onder gras en plantsoen. Dit is verklaarbaar aan de

Weerstation uitgerust met stralings-sensoren, thermometers en een windmeter.





Afb. 3: Verificatie van gesimuleerde bodemtemperaturen op 5, 75 en 150 cm onder gras door vergelijking met gemeten waardes. De groene lijn geeft de gemeten temperatuur weer, de rode lijn de gemodelleerde.



Afb. 4: Het verloop van de bodemtemperatuur op één meter diepte met de tijd, in de controleruns onder bestrating en onder gras, en in een run onder bestrating, waarin de warme, onbewolkte dag 24 juli continu herhaald werd vanaf 25 juli.

hand van het hogere albedo bij bestrating (meer absorptie van zonnestraling) en de afwezigheid van koeling door verdamping uit planten. De bodem blijft onder plantsoen nog koeler dan onder gras, omdat de schaduw van bomen in het plantsoen zorgt voor minder invallende straling.

Modelmatige aanpak

De resultaten uit de experimentele aanpak zijn gebruikt om invoerparameters vast te stellen van een numeriek energie-uitwisselingsmodel dat de opwarming van de bodem simuleert als functie van weersgesteldheid, oppervlaktetype en de thermische eigenschappen van de bodem. Het toegepaste model onderscheidt vijftien verschillende bodemlagen tussen 0 en 5,5 meter diepte. Bij bestrating valt alle inkomende straling op de bovenste bodemlaag, bij begroeiing valt de inkomende straling op de bladeren. Doordat een deel van de kortgolvlige straling (afhankelijk van albedo) en alle langgolvlige straling worden geabsorbeerd door het grond- of bladeroppervlak, worden deze oppervlakken warm.

De door de bodem opgenomen warmte wordt op vijf manieren afgestaan aan de

omgeving: door langgolvlige straling uit te zenden, door warmte af te staan aan de lucht, door verdamping van water (alleen van belang voor begroeide oppervlaktes, verdamping vanaf bestraat oppervlak wordt verwaarloosd), door opwarming van de bodem onder het oppervlak en door stijging van de temperatuur van de begroeiing.

Het ontwikkelde model is gebaseerd op de wet van behoud van energie: de afgestane warmte is exact gelijk aan de hoeveelheid energie die geabsorbeerd wordt in de vorm van straling. Het model laat steeds in tijdstappen van een minuut de bijpassende gemeten hoeveelheid straling op het oppervlak vallen en rekent die om naar de hoeveelheid warmte. Verificatie van de zo gemodelleerde bodemtemperaturen is gedaan door een vergelijking met gemeten temperaturen. Afbeelding 3 laat voor gras zien dat de gemodelleerde bodemtemperaturen goed overeenkomen met de gemeten waardes. Op 150 cm onder bestrating is de gemodelleerde temperatuur maximaal één graad hoger dan de gemeten temperatuur. Verder vertonen alle tijdseries goede overeenkomst in zowel de dagelijkse variatie

als de variatie op week- en maandschaal. Op grotere dieptes is de temperatuurfrequentie veel minder; een dag/nachtritme is hier niet meer te herkennen. Het model reproduceert ook op de juiste manier het temperatuurverschil tussen bestrate en begroeide oppervlaktes.

De goede overeenkomsten tussen metingen en model, in combinatie met de fysische basis van het model en experimentele bepaling van sleutelparameters, geven vertrouwen in het functioneren van dit model. Op die basis is het mogelijk een aantal parameters binnen een realistische bandbreedte te variëren om te bepalen wat de belangrijkste factoren zijn die hoge temperaturen in de bodem bevorderen.

Gevoeligheidsanalyse

Met het model is een gevoeligheidsstudie uitgevoerd. Nagegaan is bij welke situatie een temperatuur van 25°C op één meter diepte in de bodem wordt bereikt. Daartoe zijn verschillende parameters gevarieerd, namelijk:

- Lange warme periodes. In afbeelding 4 is het verloop van de bodemtemperatuur op 1 meter onder bestrating en gras te zien. Het verschil tussen bestrating en gras bedraagt continu ongeveer twee graden. Eind juli begint een warme periode: 24 juli 2008 was een warme, onbewolkte dag. De maximumtemperatuur was 27°C, de gemiddelde dagtemperatuur 23°C. In het model kan deze 'golden day' vanaf 25 juli continu herhaald worden; in afbeelding 4 is de resulterende bodemtemperatuur onder bestrating met de blauwe lijn weergegeven (omschrijving 'hittegolf'). De bodemtemperatuur loopt in deze simulatie in het begin snel op en nadert na een maand 23°C. In werkelijkheid waren de eerste dagen na 24 juli warmer dan de 'golden day' zelf, maar bewolkter. Vandaar dat de temperatuur in werkelijkheid in de eerste dagen van deze warme periode sneller oploopt dan in de modelrun.

- Invloed van albedo. Een gevoeligheidsstudie werd uitgevoerd waarin het albedo van de bestrating werd verlaagd van 0,16 (gemeten voor de bestrating van pompstation Dorst) naar 0,10 (de minimumwaarde zoals gemeten boven asfalt). Het verschil is ongeveer 0,35°C aan het eind van de gesimuleerde periode: albedo heeft dus geen grote invloed op de bodemtemperatuur onder bestrating.

- Invloed van grondsoort en vochtigheid. De thermische eigenschappen van de bodem hangen voor een groot deel af van de grondsoort. De bodemtemperatuur tijdens de warme periode loopt veel minder snel op in kleibodems (één of twee graden) dan in zandbodems (circa zes graden). Het vochtgehalte maakt voor de temperatuur in zandbodems niet veel uit, voor kleibodems wel.

- Invloed van zon en temperatuur. De dag die als basis is genomen voor de 'hittegolf', 24 juli 2008, was warm

en onbewolkt. De maximaal bereikte temperatuur was 27°C. Volgens de definitie van het KNMI is sprake van een hittegolf als gedurende vijf achtereenvolgende dagen de maximumtemperatuur ten minste 25°C bedraagt en op ten minste drie van die vijf dagen 30°C of meer. De hypothetische warme periode die in het model wordt toegepast, is dus nog geen hittegolf. Het effect van een temperatuuroename van drie graden is berekend, zodat wel een echte hittegolf wordt gesimuleerd. In drie gevoeligheidsstudies zijn afzonderlijk de luchttemperaturen met drie en zes graden verhoogd (tot 30 en 33°C op 24 juli) en is de hoeveelheid straling met 50 procent vermeerderd. Bij een stijging van de luchttemperatuur met drie graden bedraagt de stijging van de bodemtemperatuur ongeveer twee graden; bij een toename met zes graden circa vier graden. De toename van de temperatuur van 20 tot 25°C wordt onder deze omstandigheden bereikt in ongeveer drie weken. Het bereiken van de 25°C-grens is dus afhankelijk van de gemiddelde temperatuur voor aanvang van de warme periode en de duur ervan.

Conclusies

De indringing van warmte in de bodem is bestudeerd door een gecombineerde experimentele en modelmatige aanpak. De experimentele aanpak heeft een dataset van

drie maanden opgeleverd met bodemtemperatuurprofielen tot 1,5 meter diepte onder bestrating, gras en plantsoen, met daarbij behorende luchttemperatuur, en zonnen thermische straling. De overeenkomst tussen gesimuleerde bodemtemperaturen en gemeten waarden was opvallend goed, zowel voor bestraat oppervlak als voor oppervlak begroeid met gras. Uit de metingen werd onmiddellijk duidelijk dat de bodem onder gras en plantsoen gemiddeld ongeveer één respectievelijk 2,8°C koeler is dan onder bestrating. Tijdens warme periodes loopt dat verschil op tot 1,5 respectievelijk 3,5°C. De temperatuur van het leidingwater bleek tijdens de meting overdag circa één graad kouder te zijn dan de bodem op één meter diepte, 's nachts liep dit verschil terug tot een halve graad. De contacttijd tussen water en opgewarmde bodem en de verblijftijd van het water spelen dus ook een rol in de opwarming van het drinkwater in het leidingnet. Water in aansluitleidingen, die zich op 60 tot 80 cm diepte in de bodem bevinden, zal hogere temperaturen bereiken, door de hogere bodemtemperatuur op mindere diepte en door de snellere opwarming door de gunstige oppervlakte/inhoud verhouding van de kleinere leidingen.

Het model geeft een goede voorspelling van de toename van de bodemtemperatuur op

een wolkenloze dag op niet beschaduwde plaatsen. Omdat de extreemste opwarming plaatsheeft tijdens wolkenloze periodes (met name een hittegolf), is het model zeer bruikbaar om omstandigheden te bepalen die leiden tot opwarming boven de 25°C. Omdat gedurende de meetperiode geen echte hittegolf voorkwam, kan niet geverifieerd worden of de extrapolaties van het model voldoende nauwkeurig de werkelijkheid beschrijven. Aanbevolen wordt deze metingen (eventueel in beperktere omvang) te herhalen tijdens een echte hittegolf. Met behulp van het nu beschikbare model kan voor verschillende weersomstandigheden (bijvoorbeeld op basis van historische reeksen van het KNMI) en verschillende bodemtypes en bodembedekking (bijvoorbeeld op basis van geografische informatie uit de bodemkaart Nederland) en informatie over de ligging van het leidingnet een 'hotspotanalyse' worden gedaan. Met deze analyse kan worden bepaald waar en wanneer het leidingwater te warm kan worden.

LITERATUUR

- 1) Smulders E. (2006). Temperatuurfuctuaties in waterdistributenetten. Tilburgsche Waterleiding-Maatschappij.
- 2) Van der Molen M., H. Kooi, E. Smulders en B. Heijman (2008). Warmte-indringing in de bodem. BTO-rapport 2008.053.