



Warmteindringing in de bodem

BTO 2008.053
December 2008

vrije Universiteit *amsterdam*



KWR

Watercycle Research Institute

Warmteindringing in de bodem

BTO 2008.053
December 2008

© 2008 KWR

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Colofon

Titel

Warmteindringing in de bodem

Projectnummer

B111624-102

Projectmanager

P.G.G.. Slaats

Opdrachtgever

CVO

Kwaliteitsborger

J.H.G. Vreeburg

Auteurs

M. van der Molen (VU), H. Kooi (VU), E.F.P.A. Smulders(Inter Pro Advies) en S.G.J.. Heijman (KWR)

Verzonden aan

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten en is openbaar

Samenvatting

In een onderzoek van de Tilburgse Waterleidingmaatschappij (nu Brabant water) in 2006 [E.Smulders, maart 2006] is geconstateerd dat op sommige plaatsen in het leidingnet van Tilburg hoge watertemperaturen kunnen voorkomen. Vergelijking van bodemtemperaturen en temperaturen in de leidingen heeft aangetoond dat de watertemperatuur in de leidingen zeer snel de bodemtemperatuur benadert. Gedurende laagverbruik 's nachts is de watertemperatuur vrijwel gelijk aan de bodemtemperatuur. Overdag blijft het verschil tussen watertemperatuur en bodemtemperatuur bij voldoende verbruik groter. Door een hoge temperatuur van de bodem kan de watertemperatuur opwarmen tot boven de 25 °C, waardoor water niet meer voldoet aan het Drinkwaterbesluit. Mogelijk komt dit incidenteel voor tijdens een hittegolf.

Het vermoeden bestaat dat de opwarming van de bodem afhankelijk is van weersinvloeden, grondsoort, vochtgehalte van de grond en bodembedekking. Om grip te krijgen op de factoren die van invloed zijn op de opwarming van de bodem op een meter diepte heeft KWR de Vrije Universiteit Amsterdam opdracht gegeven tijdens een aantal maanden een uitgebreid monitorprogramma uit te voeren. Dit onderzoek is opgezet in samenwerking met Brabant Water en is uitgevoerd op een drietal locaties in Breda. Voor het onderzoek zijn zowel boven de grond als in de grond en in het leidingnet temperatuurmetingen uitgevoerd. De metingen boven de grond zijn gebruikt als input voor een model dat de opwarming van de ondergrond voorspelt. De voorspelde grondtemperaturen zijn vervolgens vergeleken met de gemeten grondtemperatuur. Het model voorspelt de gemeten waarden goed. Vervolgens is door een warme dag (24 juli) in het model een aantal malen te `herhalen` een hittegolf gesimuleerd. De maximale luchttemperatuur op die warme dag was 27 °C. Gedurende een echte hittegolf kan het warmer worden. De gevolgen van een warmere hittegolf zijn ook gesimuleerd. Duidelijk is dat de grondsoort en de bodembedekking een grote invloed hebben op de opwarming van de ondergrond. Bestrating met daaronder zand geeft de grootste kans op hoge bodemtemperaturen. Andere oorzaken van opwarming van drinkwater in distributieleidingen zijn niet onderzocht. Stadsverwarming, riolering en vrij liggende leidingen in tunnels kunnen ook invloed hebben op de watertemperatuur.

Uit het onderzoek is duidelijk geworden dat de volgende factoren een sterke invloed hebben op de opwarming van de bodem:

- Weer: temperatuur, zonne-instraling, bewolking, windsnelheid en het aantal dagen dat een hittegolf aanhoudt
- Bodembedekking: gras, bomen, (zwarte) klinkers of asfalt.
- Bodem: grondsoort en vochtgehalte

Het model geeft een goede voorspelling van de toename van bodemtemperatuur op een wolkenloze dag op niet beschaduwde plaatsen. Omdat de meest extreme opwarming plaatsvindt in wolkenloze periodes (m.n. een hittegolf) is het model zeer bruikbaar voor een worst-case benadering. Gedurende de warmste dag in de meetperiode is het duidelijk geworden dat er grote verschillen bestaan tussen opwarming op verschillende plaatsen in de stad.

Omdat gedurende de meetperiode geen echte hittegolf heeft plaatsgevonden kan niet geverifieerd worden of de extrapolaties van het model voldoende nauwkeurig de werkelijkheid beschrijven. Aanbevolen wordt om deze metingen (eventueel beperkter qua omvang) te herhalen tijdens een echte hittegolf. Het model is geprogrammeerd in Matlab en is beschikbaar binnen het BTO.

Inhoud

Samenvatting	1
Inhoud	3
1 Inleiding	5
2 Experimentele aanpak	7
2.1 Weersgesteldheid	7
2.2 De rol van oppervlaktetype	7
2.3 Thermische bodemeigenschappen	10
2.4 Waargenomen bodemtemperatuurprofielen	11
2.5 Vergelijking bodemtemperaturen en leidingwatertemperaturen	13
2.6 Temperatuurverschillen in Breda op 'golden day' 24 juli 2008	13
3 Modelmatige aanpak	15
3.1 Modelprincipe	15
3.2 Modelverificatie	16
3.3 Wat is nodig om op 1 m diepte een temperatuur van 25 °C te halen?	19
4 Conclusies	23
5 Literatuur	25
I Oppervlakte- en luchttemperaturen en stralingscomponenten op de aangegeven locaties ten opzichte van het referentiestation	27
II Meetmethode voor de bodemwarmtegeleidingscoëfficiënt	29
III Verklaring van de symbolen	31

1 Inleiding

In een onderzoek van de Tilburgse Waterleidingmaatschappij (nu Brabant water) in 2006 is geconstateerd dat op sommige plaatsen in het leidingnet van Tilburg hoge watertemperaturen kunnen voorkomen. Vergelijking van bodemtemperaturen en temperaturen in de leidingen heeft aangetoond dat de watertemperatuur in de leidingen zeer snel de bodemtemperatuur benadert. Gedurende laagverbruik 's nachts is de watertemperatuur vrijwel gelijk aan de bodemtemperatuur. Overdag blijft het verschil tussen watertemperatuur en bodemtemperatuur door een hoger verbruik groter. Door een hoge temperatuur van de bodem kan de watertemperatuur opwarmen tot boven de 25 °C, waardoor het gedistribueerde water niet meer voldoet aan het Drinkwaterbesluit.

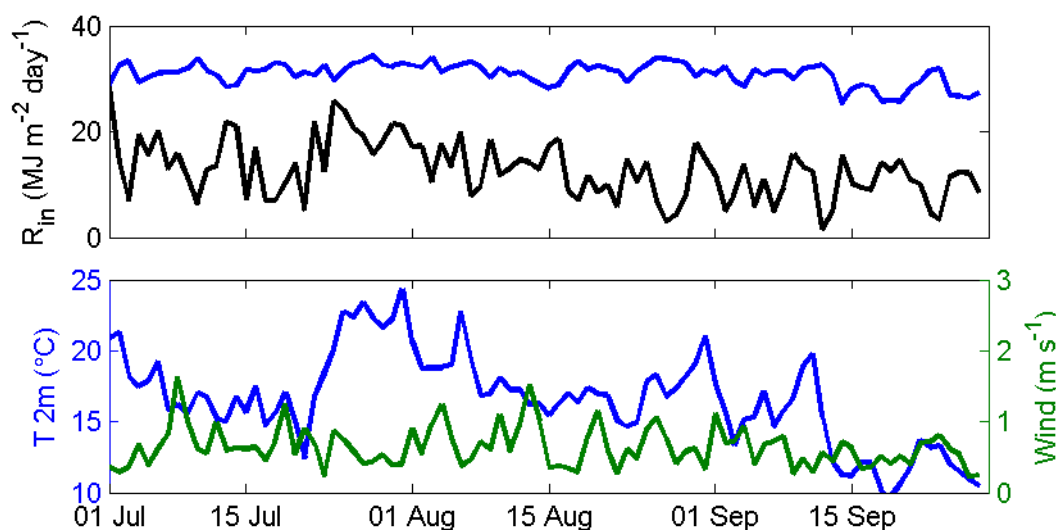
Er kunnen ook andere warmtebronnen zijn die invloed hebben op de temperatuur in de leidingen: stadsverwarming, riolering en waterleidingen in tunnels of onder bruggen. In het kader van deze studie zijn deze invloeden nog buiten beschouwing gelaten. In eerste instantie wordt een 1D-model ontwikkeld, waarbij de warmteindringing als functie van de diepte in de bodem wordt gemeten en gemodelleerd. Voor een model dat alle invloeden in beschouwing neemt is een 3D-model noodzakelijk. Een 3D-model valt buiten het kader van dit onderzoek.

Het doel van deze studie is te bepalen in welke mate de verschillende factoren een snelle opwarming bevorderen van de bodem op de diepte van het drinkwaternet. Opwarming van de bodem op de diepte van drinkwaterleidingen hangt af van weersgesteldheid, oppervlaktegesteldheid en thermische eigenschappen van de bodem. Om de variabiliteit van deze drie factoren en hun relatieve belang vast te stellen, is een experimentele aanpak gecombineerd met een modelmatige aanpak. De experimentele aanpak bestond uit metingen van weersgesteldheid door middel van een weersstation, geïnstalleerd op pompstation Dorst van Brabant Water, en metingen van bodemtemperaturen op verschillende dieptes en onder drie verschillende oppervlaktetypes (bestrating, 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. Hoofdstuk 2 beschrijft de experimentele aanpak, hoofdstuk 3 de modelmatige aanpak.

2 Experimentele aanpak

2.1 Weersgesteldheid

Het weer heeft invloed op de opwarming van de bodem door de straling die het oppervlak bereikt, de luchttemperatuur en de windsnelheid. Het voor dit onderzoek gebruikte weerstation is uitgerust met stralingssensoren, thermometers en een windmeter (zie foto omslag). Figuur 1 geeft een overzicht van het verloop van deze variabelen tijdens het experiment. De inkomende straling bestaat uit twee componenten, de kortgolvlige straling (zonnestraling), die overdag groot is en 's nachts nihil; en de langgolvlige straling (thermische straling) die overdag en 's nachts ongeveer gelijk is. De luchttemperatuur hangt in sterke mate af van de hoeveelheid zonnestraling. Het is duidelijk dat er in de tweede helft van juli een warme periode is geweest met veel zonnestraling. De windsnelheid is overwegend laag in verband met de enigszins beschutte locatie van het weerstation.



Figuur 1. Weersgesteldheid zoals gemeten met het weerstation op pompstation Dorst. Boven: Inkomende kortgolvlige (zonne-) straling (onderste, zwarte lijn) en inkomende langgolvlige (thermische) straling (bovenste, blauwe lijn). Onder: dagelijks gemiddelde luchttemperatuur (bovenste, blauwe lijn) en windsnelheid (onderste, groene lijn).

2.2 De rol van oppervlaktetype

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, wordt er meer zonlicht geabsorbeerd door het oppervlak en wordt het oppervlak warmer. Het albedo is gemeten voor verschillende oppervlaktetypes op pompstation Dorst en in Breda. Grofweg varieert het albedo van 0.20 voor begroeide oppervlaktes tot 0.11-0.14 voor verschillende types bestrating. Dat houdt in dat een bestraat oppervlak tot 10% meer zonlicht absorbeert dan een begroeid oppervlak.

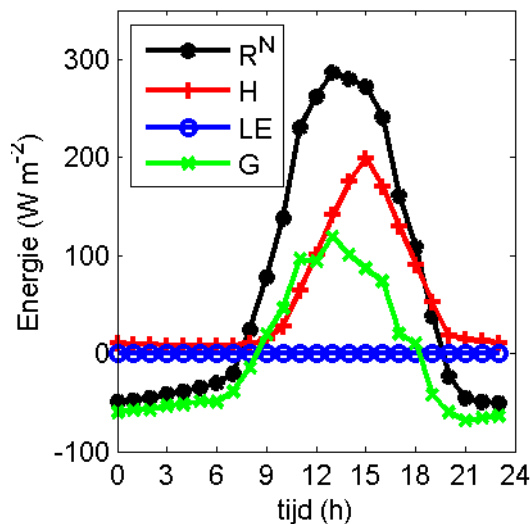
In de tweede plaats is de koeling door verdamping door planten van belang. Tijdens droge dagen is de verdamping van bestraaete oppervlaktes te verwaarlozen, terwijl die van planten aanzienlijk is. Dit is in te zien door het opstellen van de energiebalans van het oppervlak:

$$R_{s,in} + R_{l,in} = R_{s,reflectie} + R_{l,emissie} + H + LE + G \quad (\text{vgl. 1})$$

Hier staat de R voor straling, de subscripten 's' en 'l' voor kortgolvlige (zonne-) en langgolvlige (thermische) straling, 'in' voor inkomend. Aan de linkerkant van de vergelijking staan dus de hoeveelheid energie die in de vorm van straling op het oppervlak vallen. Aan de rechterkant van de vergelijking staan de termen waaraan de inkomende straling wordt besteed. Een deel van het zonlicht wordt gereflecteerd, en het oppervlak zendt zelf langgolvlige straling uit ($R_{l,emissie}$), afhankelijk van de oppervlaktetemperatuur. Het overblijvende deel wordt besteed om de lucht op te warmen (H, sensibele warmtestroom), voor verdamping (LE, latente warmtestroom) of om de bodem op te warmen (G, bodemwarmtestroom). Volgens de wet van behoud van energie moet er evenveel energie aan uitstraling en warmtestromen worden besteed als er energie beschikbaar is door instraling. Figuur 2 geeft een voorbeeld van de dagelijkse variatie van de termen in vergelijking 1. Hierin zijn voor de duidelijkheid alle stralingstermen bij elkaar opgeteld tot de netto straling:

De nettostraling is de hoeveelheid energie die besteed kan worden aan H, LE en G. Figuur 2 geeft duidelijk aan dat er boven bestrating geen energie besteed wordt aan het verdampen van water ($LE=0$). Boven gras zal de nettostraling iets kleiner zijn door het grotere albedo. Boven gras wordt ook een hoeveelheid van de beschikbare energie besteed voor verdamping door het gras, met als gevolg daarvan dat er minder energie overblijft om de lucht (H) en de bodem (G) op te warmen.

$$R_n = R_{s,in} + R_{l,in} - R_{s,reflectie} - R_{l,emissie} \quad (\text{vgl. 2})$$



Figuur 2. Gemiddelde dagelijkse gang van nettostraling (R_n) en sensibele (H), latente (LE) en bodemwarmtestroom (G) boven bestrating.



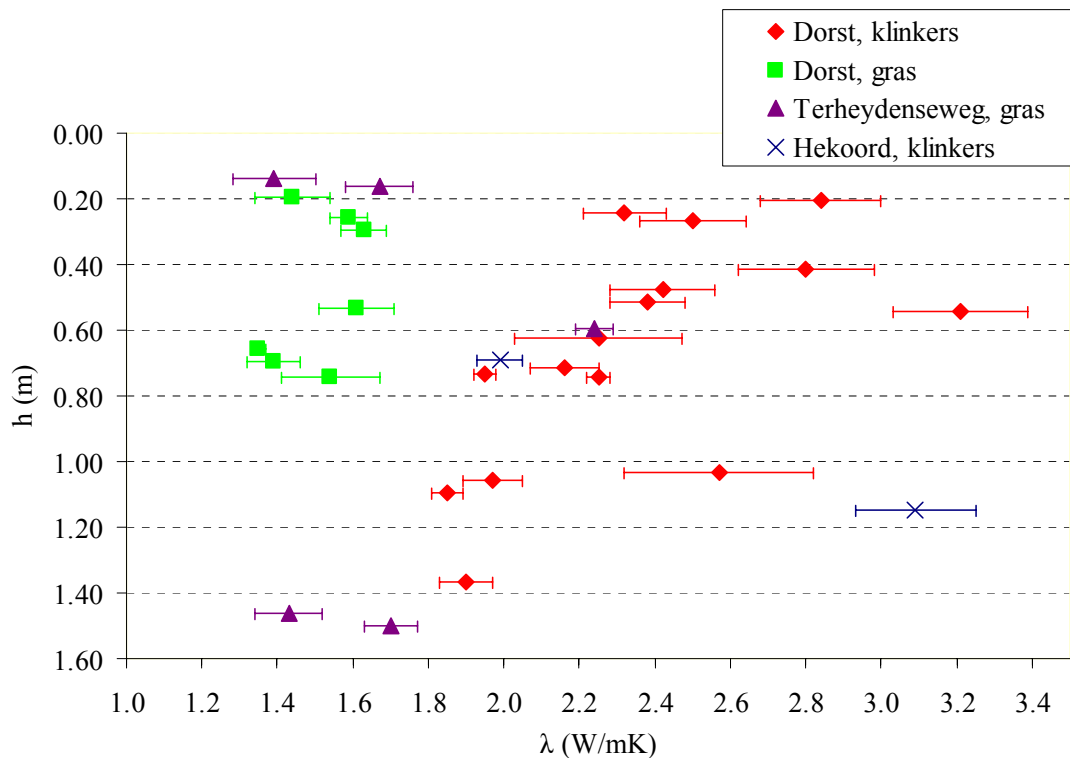
Foto 1. Het mobiele station, in dit geval opgesteld boven gras op pompstation Dorst. Het plantsoen is aan de rechterkant van de foto zichtbaar, de bestrating is weer rechts van het plantsoen.



Foto's 2. Meetlocaties Terheijdenseweg 439a (linksboven), Hekoord 17 (rechtsboven), Laagerf (linksonder) en Terheijdenseweg nabij nr 414 (rechtsonder).

2.3 Thermische bodemeigenschappen

Op basis van de weersgesteldheid en het oppervlaktetype is er een bepaalde hoeveelheid warmte beschikbaar om de bodem in te dringen. Er zijn twee thermische eigenschappen die bepalen hoe de temperatuur in de bodem verandert als functie van de hoeveelheid warmte die beschikbaar is. In de eerste plaats is er de warmtegeleidingcoëfficiënt van de bodem (λ). Hoe groter de warmtegeleidingcoëfficiënt van de bodem, hoe groter de diepte in de bodem waarover de warmte zich verdeelt. In de tweede plaats is de warmtecapaciteit van de bodem (C) van belang. Hoe groter de warmtecapaciteit, hoe meer warmte nodig is om de bodemtemperatuur te doen toenemen.



Figuur 3. De bodemwarmtegeleidbaarheid, zoals gemeten op verschillende lokaties (pompstation Dorst, Terheydenseweg, Hekoord), onder verschillende oppervlaktetypes (klinkers, gras), en op verschillende dieptes onder maaiveld. De horizontale bars geven + of - 1 standaard deviatie weer. 5 metingen waarvan de standaard deviatie groter was dan 0.25 zijn niet weergegeven.

Tijdens de meetperiode is de warmtegeleidingcoëfficiënt gemeten op verschillende locaties op pompstation Dorst en in Breda (zie Appendix II voor een beschrijving van de meetmethode). De gemeten bodemwarmtegeleidbaarheden zijn weergegeven in figuur 3, horizontale errorbars geven de standaarddeviatie van de meting aan. De metingen onder gras hebben een duidelijk kleinere geleidbaarheid dan onder bestrating. Alleen gebruikmakend van metingen met een standaard deviatie van 0.10 of kleiner resulteert in een $\lambda = 2.03 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ onder klinkers en $\lambda = 1.61 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ onder gras. De kleinere warmtegeleiding onder gras kan verklaard worden door een hogere fractie lucht in de bodem, als gevolg van de activiteit van plantenwortels en bodemdieren onder gras en de hogere compactheid van de bodem onder klinkers.

Tabel 1 vat de thermische eigenschappen van de bodem uit de literatuur en uit metingen in Breda samen. De warmtegeleidings coëfficiënt van zandbodems is groter dan voor kleibodems, terwijl de warmtecapaciteit overlapt. Zowel geleidingscoëfficiënt als capaciteit neemt toe met het vochtgehalte in de bodem.

Tabel 1. Thermische eigenschappen van de bodem zoals experimenteel bepaald in deze studie en vergeleken met literatuurwaarden.

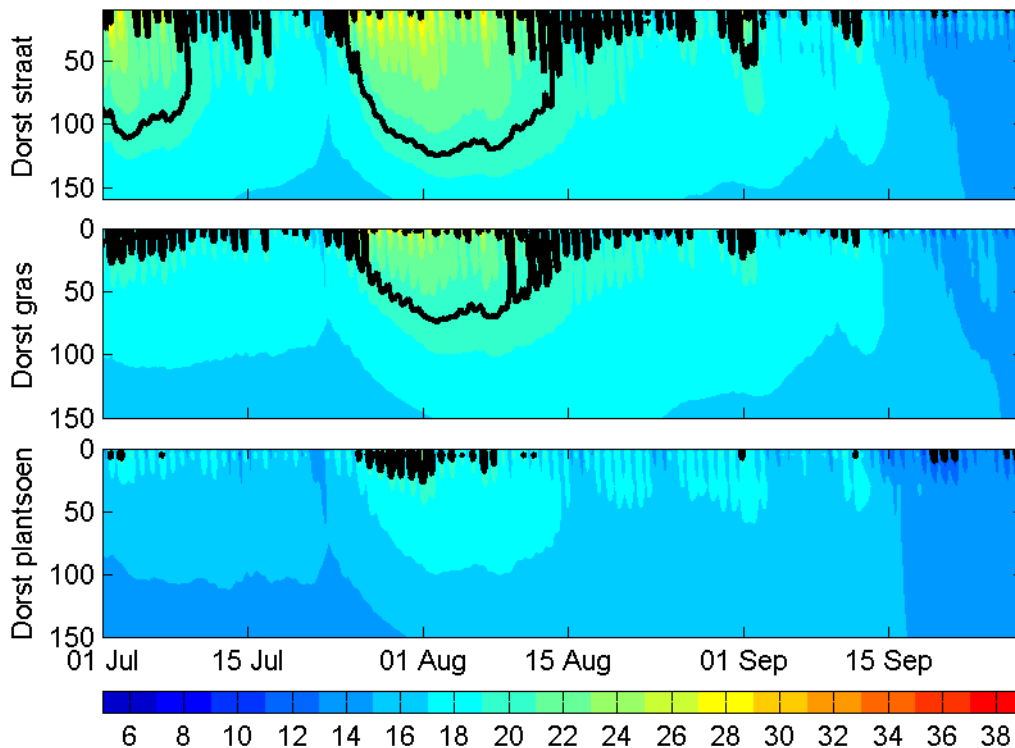
bodemtype		warmtegeleidings- coëfficiënt		warmte-capaciteit	
		λ W m ⁻¹ K ⁻¹		C MJ m ⁻³ K ⁻¹	
		range	typisch	range	typisch
zand (deze studie)	onder gras	1.4 - 2.2	1.6		
	onder bestrating	1.9 - 3.0	2.0		
zand	droog	0.3 - 1.6	1.5	1.3 - 1.6	1.3
	verzadigd	1.7 - 5.0	2.5	1.9 - 2.9	2.5
klei	droog	0.4 - 1.0	0.5	1.0 - 2.0	1.6
	verzadigd	0.9 - 2.3	1.2	1.6 - 3.4	3.0

bronnen: Stonestrom and Constantz (2003), USGS circular 1260, <http://pubs.water.usgs.gov/circ1260>, deVries (1966), deze studie

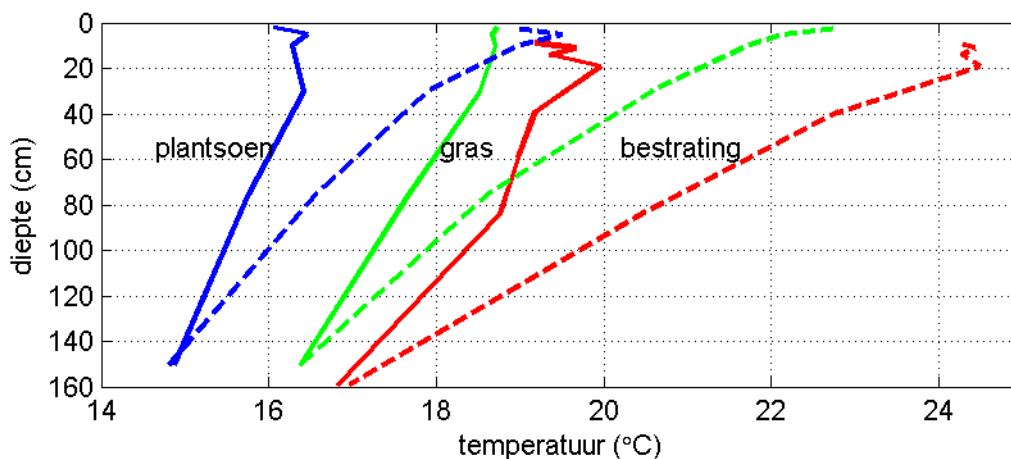
2.4 Waargenomen bodemtemperatuurprofielen

Op pompstation Dorst zijn bodemtemperaturen tijdens de meetperiode gemeten onder drie oppervlaktetypes (bestrating, gras en plantsoen) en op 6 tot 8 verschillende dieptes tussen 0 en 150 cm diep. De meetresultaten zijn te zien in figuur 4. 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 hand van het hogere albedo bij bestrating (meer absorptie van zonnestraling) en de afwezigheid van koeling door verdamping (secties 2.1-2.3). Hoe groot de invloed is van verschillen in thermische eigenschappen moet blijken uit de modelsimulaties. De reden waarom de bodem onder plantsoen nog weer koeler is dan onder gras, is de aanwezigheid van bomen in het plantsoen. De specifieke meetlocatie viel het tweede deel van de ochtend in de schaduw van de boom, zodat de inkomende kortgolvlige straling aanzienlijk kleiner was dan voor de bestratte en grasoppervlaktes.

Figuur 5 geeft de gemiddelde temperatuurprofielen tijdens de hele meetperiode en alleen tijdens de warme periode eind juli/begin augustus. Gemiddeld is de bodem op 1 m onder het gras ruim 1,0 °C koeler dan onder bestrating, en onder plantsoen 2,8 °C graden koeler. Tijdens de warme periode wordt de bodem onder bestrating sneller warm dan onder gras en plantsoen, de verschillen nemen toe tot ruim 1,5 respectievelijk 3,5 °C.



Figuur 4. 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 cm.

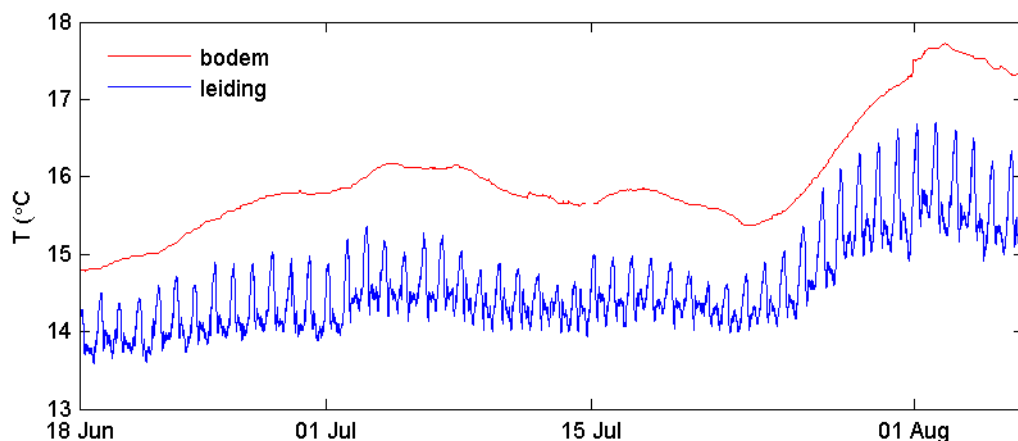


Figuur 5. Gemiddelde temperatuurprofielen tijdens de gehele meetperiode van 26 juni t/m 29 september 2008 (getrokken lijnen) en tijdens de warme periode van 23 juli t/m 3 augustus (onderbroken lijnen) voor drie verschillende bodembedekkingen.

2.5 Vergelijking bodemtemperaturen en leidingwatertemperaturen

Van 18 juni tot en met 6 augustus 2008 zijn er op de Terheijdsenseweg 439a tegelijkertijd metingen uitgevoerd van de bodemtemperatuur en de temperatuur in de leiding. Deze leiding (200 mm PVC) wordt voornamelijk gevoed vanaf pompstation Oosterhout. Uit troebelheidmetingen op het pompstation en op locatie wordt de verblijftijd van het drinkwater geschat op 5 tot 9 uur. De temperatuur af pompstation Oosterhout varieert tussen de 11,3 en de 13,2 °C. Met een jaargemiddelde van 12,5. De watertemperatuur in de leiding is gemeten met een temperatuursensor van Brabant water en de temperatuur in de bodem door KWR (NTC temperatuursensor PH-008-TW-3M van ATAL met datalogger). Deze metingen zijn weergegeven in figuur 6. De leidingwatertemperatuur is overdag continu ruim 1 °C kouder dan de bodemtemperatuur op 1 m diepte. In de nacht loopt de temperatuur in de leiding op tot ca. 0,5 °C onder de bodemtemperatuur. In de ochtend neemt de leidingwatertemperatuur onder invloed van de toenemende doorstromingsnelheid snel af. Omdat de temperatuursensoren niet gelijktijdig geïnstalleerd zijn is het onduidelijk of de 0,5 °C temperatuurverschil gedurende de nacht een reëel temperatuurverschil is of dat het gaat om een absolute fout in een van beide sensoren. De sensoren zijn niet gelijktijdig gekalibreerd. Als het gaat om een reëel temperatuurverschil kan dit ook te maken hebben met het feit dat de bodemsensor tenminste op een meter afstand van de leiding was ingegraven. Deze afstand was nodig om de afkoeling van de bodem door de leiding niet mee te nemen in de bodemmeting.

Ook uit deze meting is weer duidelijk dat de temperatuur van het leidingwater heel snel de bodemtemperatuur benadert.

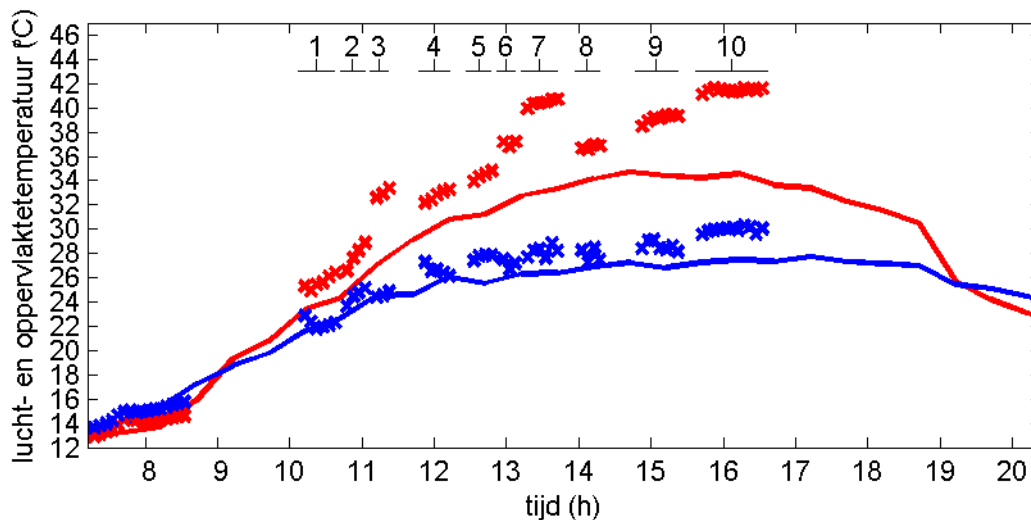


Figuur 6. Vergelijking tussen bodemtemperatuur op 1 m en leidingwatertemperatuur in de leiding ter hoogte van de Terheijdsenseweg 439a.

2.6 Temperatuurverschillen in Breda op 'golden day' 24 juli 2008

De 'golden day' 24 juli was een onbewolkte, warme dag. De onbewolkte omstandigheden waren ideaal om met het mobiele station (Foto 1) oppervlakte-temperaturen op diverse locaties in de stad Breda te vergelijken met de oppervlakte-temperatuur zoals gemeten met het referentiestation op pompstation Dorst. De resultaten zijn te zien in figuur 7 en geven in de eerste plaats aan dat de temperaturen in de stad hoger zijn dan op het iets landelijker gelegen pompstation Dorst. Het temperatuurverschil is gemiddeld 1,9 °C en kan verklaard worden met het zogenaamde 'urban heat island effect'. Daarbij moet worden opgemerkt dat de meeste locaties een lager albedo hebben dan de bestrating op pompstation Dorst, wat een klein deel van het temperatuurverschil kan verklaren.

In de tweede plaats is duidelijk dat de temperatuurverschillen behoorlijk verschillen afhankelijk van de locatie. De locaties 1 en 2 zijn allebei begroeid met gras en hebben relatief kleine verschillen met het referentiestation. Alle andere locaties zijn boven bestrating en hebben grotere temperatuurverschillen met Dorst. Van de bestratte locaties zijn met name 5 t/m 8 en 10 opmerkelijk.



Figuur 7. Oppervlakte- en luchttemperaturen op diverse locaties in de stad Breda (x) vergeleken met temperaturen gemeten met het referentiestation boven bestrating op pompstation Dorst (getrokken lijn). De locaties staan boven aan de figuur aangegeven met nummers, die terug te vinden zijn in tabel in bijlage II.

De metingen op locatie 5 was midden op de straat in een woonwijk (Foto's 2, rechtsboven). De metingen op locaties 6, 7, en 8 waren op de zelfde plek, maar op 5 m, 1 m en 7 m van de gevel, in de betegelde tuin van het huis aan de rechterkant. Het is duidelijk te zien dat de temperatuur flink oploopt bij het naderen van de gevel, tot wel 7 °C op 1 m van de gevel. Tabel in bijlage II geeft ook de verschillen in de diverse stralingscomponenten. Hoewel de verschillen over het algemeen klein zijn ten opzichte van de totale componenten, is voor locatie 7 (1 m van de gevel) duidelijk dat er een afname is van zonlicht, maar een bijna even grote toename in thermische straling, die van de gevel afkomstig is. De hoge temperatuur dicht bij de gevel kan daarmee nauwelijks verklaard worden door het verschil in nettostraling, en moet waarschijnlijk gezocht worden in de afname van de windsnelheid, waardoor de warmte moeilijk afgevoerd kan worden. Harde conclusies kunnen echter nog niet getrokken worden, omdat de metingen maar gedurende korte tijd, bij een enkele geveloriëntatie gedaan zijn.

De oppervlaktetemperatuur op locatie 10 (Meerkoet) is ook zeer hoog, 7°C warmer dan het referentiestation. Toch is er geen duidelijk verschil tussen deze locatie en de eerdere locaties midden op straat op Laagerf en Hekoord. Er is geen duidelijke verklaring voor dit grote temperatuurverschil. Het is mogelijk dat de temperatuur in de stad in de loop van de dag oploopt ten opzichte van het landelijk gebied, maar daarvoor zijn op basis van deze studie geen conclusies te trekken.

3 Modelmatige aanpak

De resultaten van de experimentele aanpak uit hoofdstuk 2 verschaffen de informatie die nodig is om een numeriek energieuitwisselingsmodel toe te passen om de opwarming van de bodem te simuleren als functie van weersgesteldheid, oppervlaktetype en thermische eigenschappen van de bodem. In dit hoofdstuk wordt eerst het principe van het model omschreven, daarna wordt de werking van het model geverifieerd, en tot slot wordt het model gebruikt om de afhankelijkheid van de opwarming van de bodem van verschillende factoren te simuleren.

3.1 Modelprincipe

Het model onderscheidt 15 verschillende bodemlagen tussen 0 en 5,5 m diep. In het geval van bestrating valt alle inkomende straling op de bovenste bodemlaag, in geval van begroeiing valt de inkomende straling op de bladeren. Doordat een deel van de kortgolvlige straling (afhankelijk van albedo) en alle langgolvlige straling wordt geabsorbeerd door het grond- of bladeroppervlak, wordt deze warm. Deze warmte wordt op vijf manieren afgestaan aan de omgeving:

1. door langgolvlige straling uit te zenden: $R_{l,emissie} = \epsilon \sigma T^4$, waarbij $\epsilon=0,98$ de langgolvlige emissiviteit van het oppervlak is, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ de constante van Stefan-Boltzman en T (K) de temperatuur.
2. door warmte af te staan aan de lucht: $H = \rho C_p (T - T_{lucht}) / r_a$, waar ρ de dichtheid van de lucht is, $C_p = 1005 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ de warmtecapaciteit van de lucht, $T - T_{lucht}$ de temperatuurgradiënt tussen het oppervlak en de lucht er vlak boven. r_a is een aërodynamische weerstand, die afhangt van ruwheid van het oppervlak en de windsnelheid. Daarnaast is r_a afhankelijk van de atmosferische stabiliteit, wanneer de lucht aan het oppervlak veel warmer is dan hoger in de atmosfeer, wordt de warmte snel afgevoerd (warme lucht stijgt op), dan wanneer de lucht aan het oppervlak kouder is.
3. door warmte te gebruiken om water te verdampen. Dit is alleen van belang voor begroeide oppervlaktes, verdamping vanaf bestraat oppervlak wordt verwaarloosd. $LE = L_v (\rho_v - \rho_{v,lucht}) / (r_a + r_s)$, waarin $L_v = 2,45 \cdot 10^6 \text{ J kg}^{-1}$ de verdampingswarmte van water, $\rho_v - \rho_{v,lucht}$ de gradient in waterdampdichtheid tussen het oppervlak en de lucht er vlak boven. r_s is een oppervlakteweerstand, die de weerstand vertegenwoordigt die waterdamp moet overwinnen om uit de bladeren te komen. r_s hangt af van de inkomende zonnestraling, want planten reguleren de oppervlakteweerstand om overmatig waterverlies te voorkomen.
4. door de bodem op te warmen: $G = \lambda \Delta T / \Delta z$, λ is de bodemwarmtegeleidingscoëfficiënt (tabel 1) en $\Delta T / \Delta z$ is de temperatuurgradiënt in de bodem. De temperatuursverandering in de bodem wordt beschreven als: $\Delta T / \Delta t = \Delta G / (C \Delta h)$, $\Delta T / \Delta t$ stelt hierbij de temperatuursverandering in de tijd voor (bv $0,1 \text{ }^\circ\text{C} / \text{minuut}$), ΔG de hoeveelheid warmte die van de bovenkant de bodemlaag instroomt min de hoeveelheid die er aan de onderkant weer uitstroomt, C de warmtecapaciteit van de bodem (tabel 1) en Δh de dikte van de laag waarover de warmte wordt verdeeld.
5. de warmte die gebruikt wordt om de temperatuur van de begroeiing te laten toenemen: $Q = C_{veg} \Delta T / \Delta t$, waarbij C_{veg} de warmtecapaciteit van de begroeiing is, en $\Delta T / \Delta t$ de temperatuurverandering in de tijd. Q is over het algemeen klein vergeleken met de andere termen, maar kan vooral in het uur na zonsopkomst tijdelijk groot zijn.

De waarden van de aerodynamische en oppervlakteweerstand, r_a en r_s , worden als volgt voorgeschreven:

$$r_a = \text{LAI} \cdot (30 + 25 / (u+5))$$

$$r_s = 1 \cdot 10^9 \text{ s m}^{-1}$$

voor bestrating

$$r_s = r_{s,\text{min}} \cdot ((1+f_{rs} \cdot R_{s,\text{in}}) / ((r_{s,\text{min}}/r_{s,\text{max}}) + f_{rs} \cdot R_{s,\text{in}}))$$

voor gras

hierin staat LAI voor Leaf Area Index, het totale bladoppervlakte per m^2 grond, $r_{s,\text{min}}$ en $r_{s,\text{max}}$ de minimale en maximale oppervlakte weerstand, waartussen r_s wordt geschaald aan de hand van inkomende kortgolvlige straling ($R_{s,\text{in}}$). De waarden voor de parameters staan genoemd in tabel 2.

Tabel 2. Parameters gebruikt voor het bepalen van de aerodynamische en oppervlakteweerstanden.

parameter	eenheid	bestrating	Gras
LAI	(m^2/m^2)	0.01	1
$r_{s,\text{min}}$	(s m^{-1})	15	100
$r_{s,\text{max}}$	(s m^{-1})	1500	1500
f_{rs}	(-)	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$

Het model is gebaseerd op de wet van behoud van energie, de hoeveelheid energie die besteed wordt aan 1 t/m^5 is exact gelijk aan de hoeveelheid energie die geabsorbeerd wordt in de vorm van straling:

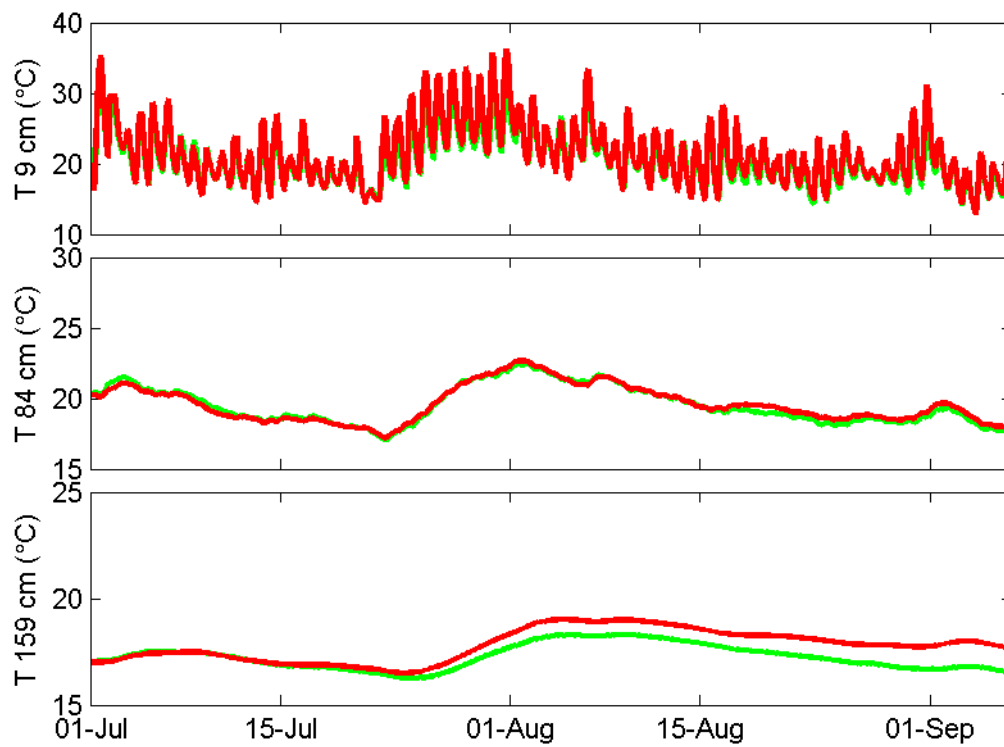
$$R_{l,\text{emissie}} + H + LE + G + Q = (R_{s,\text{in}} - R_{s,\text{reflectie}}) + R_{l,\text{in}}$$

Het model laat steeds in tijdstappen van 1 minuut de bijpassende gemeten hoeveelheid straling op het oppervlak vallen en zet het om in warmte. Het model berekent aan de hand van de bovenstaande vergelijkingen hoe die hoeveelheid warmte wordt verdeeld over de termen 1 t/m^5 .

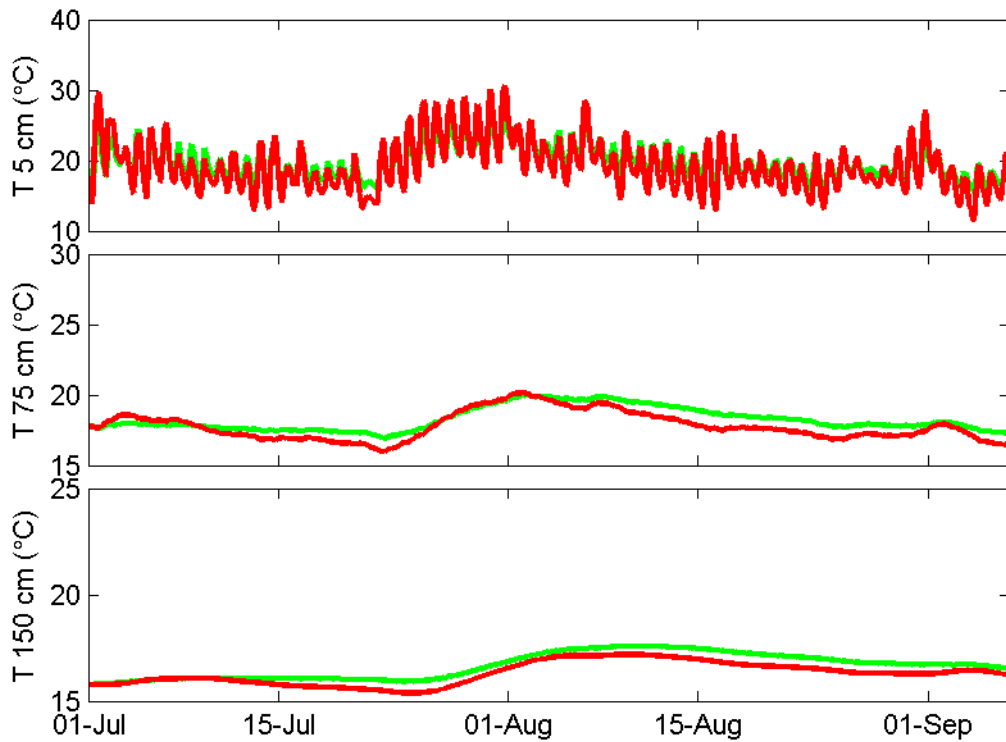
Het model is gebaseerd op fysische processen. De keuze voor de gebruikte parameters van de voor deze studie belangrijke processen is gebaseerd op de metingen tijdens de experimentele aanpak. De fysische processen zijn beschreven als prognostische vergelijkingen: het model voorspelt de temperaturen in de bodem en de grootte van de warmtestromen met als enige randvoorwaarde de weersgesteldheid, d.w.z. alleen gemeten of op andere manier verkregen tijdseries van inkomende straling, luchttemperatuur, windsnelheid en luchtvochtigheid zijn nodig om het model te laten voorspellen hoe de bodemtemperaturen zich zullen gedragen. Het model heeft zelf een 'knop' die bepaalt onder welk oppervlaktetype de bodemtemperaturen voorspeld zullen worden. Op deze manier is het model ideaal om de gevoeligheid van oppervlaktetype en bijbehorende thermische bodem eigenschappen te testen. Het model is geprogrammeerd in Matlab en is beschikbaar binnen het BTO.

3.2 Modelverificatie

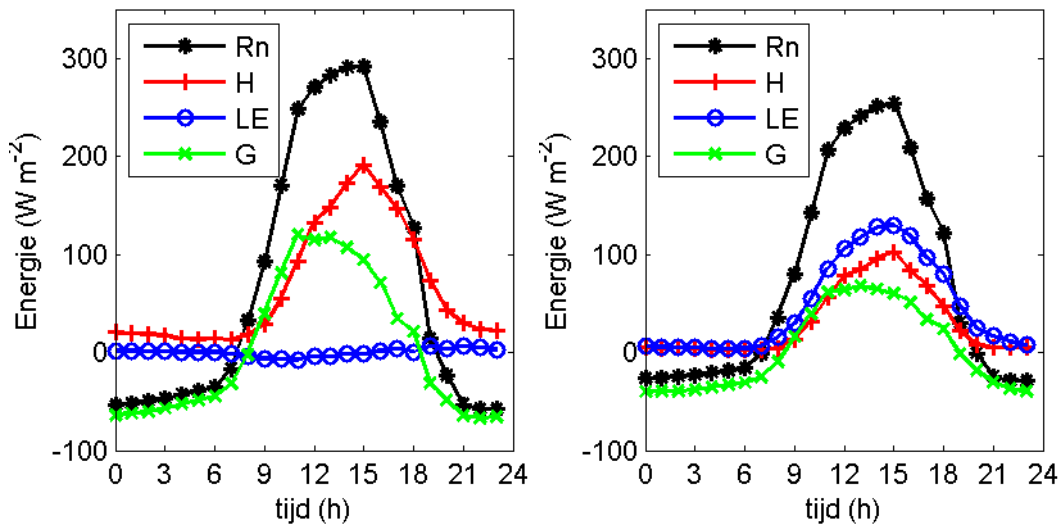
Voor deze studie naar warmteindringing in de bodem is verificatie van gemodelleerde bodemtemperaturen de meest relevante manier. Daarnaast is het van belang om de energiebalans te controleren. Figuren 6a en b laten voor bestrating en gras zien dat de gemodelleerde bodemtemperaturen goed vergelijkbaar zijn met de gemeten waarden. Op 159 cm onder bestrating loopt de gemodelleerde temperatuur maximaal ca. 1°C op ten opzicht van de gemeten temperatuur. Verder vertonen alle tijdseries goede overeenkomst in zowel de dagelijkse variatie als de variatie op week- en maandschaal. Het model reproduceert ook op de juiste manier het temperatuurverschil tussen bestrating en begroeide oppervlaktes. Figuur 9 laat zien hoe het model de energiebalans representeert voor zowel bestrating als gras. De gemodelleerde energiebalans boven bestrating (Figuur 9 links) is goed vergelijkbaar met de gemeten energiebalans (Figuur 2). Boven gras zijn in het kader van deze studie geen metingen gedaan van de energiebalans, toch geeft figuur 9 rechts een heel typisch voorbeeld van de verdeling van energie boven gras, zoals vaker in Nederland en elders gemeten (bv. Van der Molen et al., 2006, Hendriks et al, 2007). De goede vergelijking tussen metingen en model, in combinatie met de fysische basis van het model (sectie 3.1) en de experimentele bepaling van sleutelparameters (secties 2.2 en 2.3), geven vertrouwen in het functioneren van het model en maken het mogelijk een aantal sleutelparameters binnen een realistische range te variëren. Op die manier kan bepaald worden wat de belangrijkste factoren zijn die hoge temperaturen in de bodem bevorderen.



Figuur 8a. Verificatie van gesimuleerde bodemtemperaturen op 9, 84 en 159 cm diepte onder bestrating door vergelijking met gemeten waardes. De groene lijn geeft de gemeten temperatuur weer, de rode lijn de gemodelleerde.



Figuur 8b. 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.



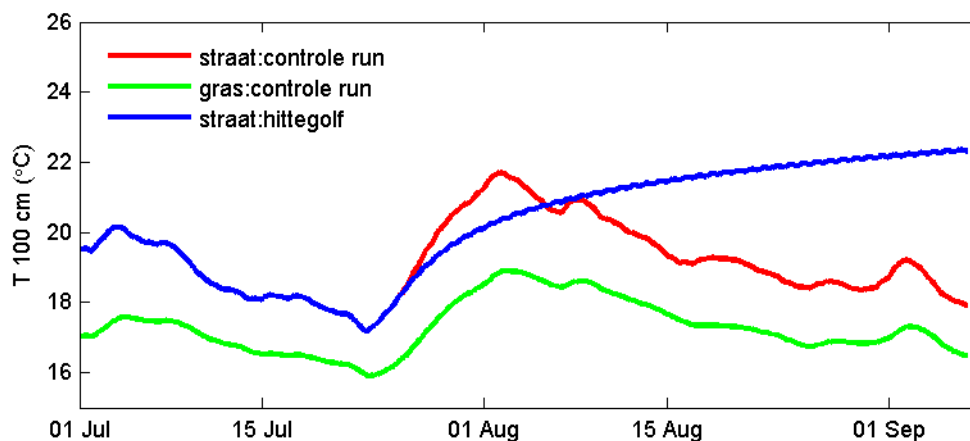
Figuur 9. Gesimuleerde energiebalans voor bestraat oppervlak (links) en gras (rechts).

3.3 Wat is nodig om op 1 m diepte een temperatuur van 25 °C te halen?

In deze sectie wordt een gevoeligheidsstudie besproken die met het model is uitgevoerd. De bodemtemperatuur op 1 m diepten wordt met het model gesimuleerd waarbij verschillende parameters worden gevarieerd.

a. Controle run en hittegolf

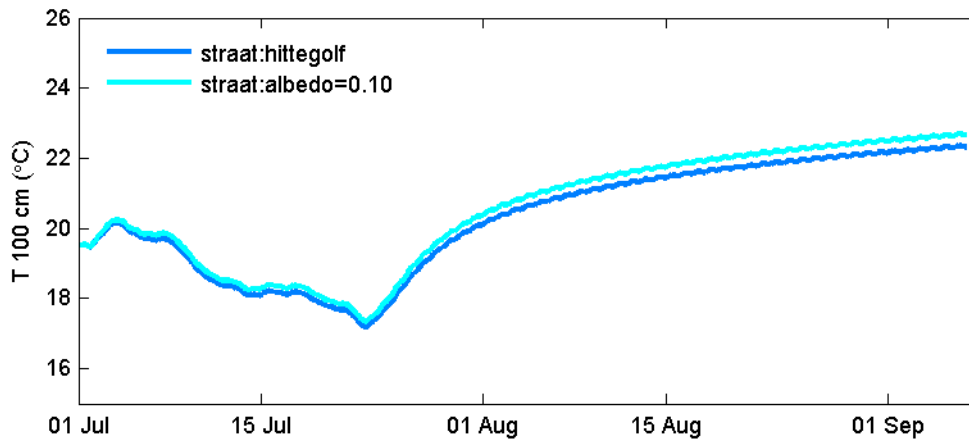
Als referentie voor afwijkingen zal de run gebruikt worden, zoals die in sectie 3.2 beschreven is (=controle run). In figuur 10 is het verloop van de bodemtemperatuur op 1 m onder bestrating en gras te zien, zoals eerder beschreven is het verschil continu zo'n 2 °C. Het temperatuurverloop laat zien dat er eind juli een warme periode begint. 24 juli 2008 was een warme, onbewolkte dag. De maximum temperatuur was 27 °C, de gemiddelde dagtemperatuur 23 °C. In figuur 10 is ook het bodemtemperatuurverloop getoond waarin deze 'golden day' vanaf 25 juli continu herhaald werd. De bodemtemperatuur loopt in deze run in het begin snel op en nadert na 1 maand naar 23 °C. In werkelijkheid waren de eerste paar dagen na 24 juli warmer dan de golden day zelf, maar meer bewolkt. Vandaar dat de temperatuur in werkelijkheid in de eerste paar dagen van de hittegolf sneller oploopt dan in de modelrun.



Figuur 10. Het verloop van de bodemtemperatuur op 1 m diepte met de tijd, in de controle runs onder bestrating en onder gras, en in een run onder bestrating, waarin de warme, onbewolkte dag 24 juli continue herhaald werd vanaf 25 juli.

b. Invloed van albedo

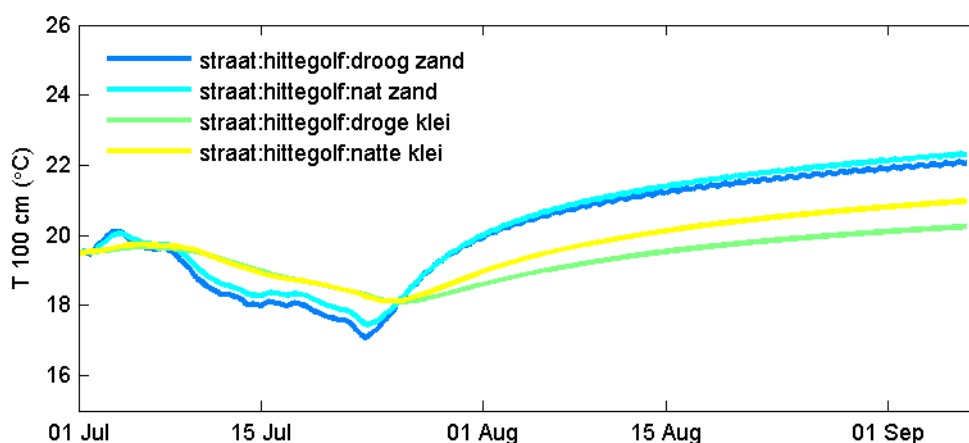
Een gevoeligheidsstudie werd uitgevoerd waarin het albedo van de bestrating werd verlaagd van 0,16 zoals gemeten voor de bestrating van pompstation Dorst naar 0,10, wat de minimum waarde is zoals gemeten boven asfalt. Figuur 11 laat voor deze run het temperatuurverloop zien. Door het lagere albedo wordt meer zonlicht geabsorbeerd, zodat de bodem warmer wordt. Het verschil is zo'n 0,35 °C aan het eind van de gesimuleerde periode. Als gevolg kan worden vastgesteld dat albedo geen grote invloed heeft op de bodemtemperatuur onder bestrating, hoewel dit enigszins contra-intuïtief is. Door de hogere oppervlaktetemperatuur neemt echter de uitgaande langgolvlige straling sneller toe (met een 4^e macht) dan de sensibele en bodemwarmtestromen (linear), wat in dit geval een waarschijnlijke verklaring is.



Figuur 11 Het temperatuurverloop in een modelsimulatie waarin het albedo van de bestrating werd verlaagd van 0.16 naar 0.10.

c. De invloed van grondsoort en vochtigheid

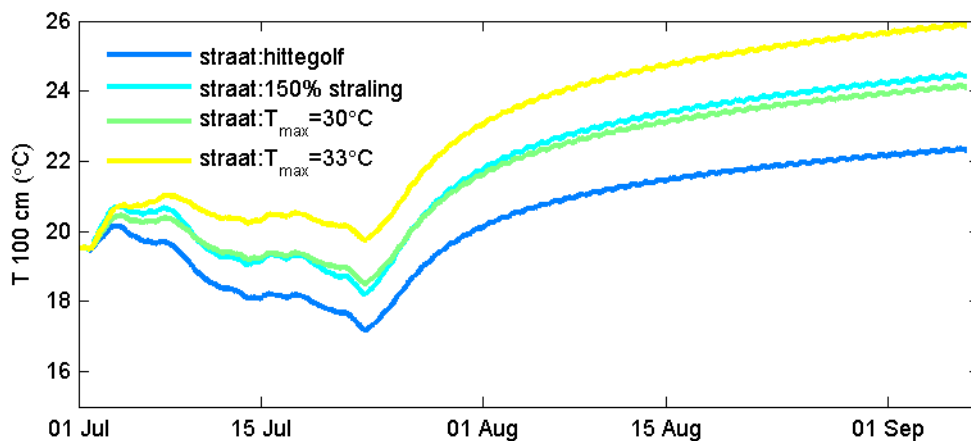
De thermische eigenschappen van de bodem hangen voor een groot deel af van de grondsoort. Een overzicht van experimenteel bepaalde en literatuurwaardes is gegeven in tabel 1. In de controle run zijn de typische waardes uit de bovenste twee rijen gebruikt, en in de gevoeligheidsruns voor grondsoort de typische waardes uit de onderste vier rijen, telkens als combinatie van λ en C. Dit resulteert in de bodemtemperatuurverlopen die zijn weergegeven in figuur 12. De bodemtemperatuur loopt tijdens de hittegolf duidelijk minder snel op in kleibodems (1 à 2 °C) dan in zandgronden (ca. 6 °C). De vochtgraad maakt voor zandbodems niet veel uit, maar voor kleibodems wel. Het temperatuurverloop is afhankelijk van de specifieke combinatie van warmtegeleidbaarheid en warmtecapaciteit: bij een grote warmtegeleidbaarheid kan de warmte makkelijk de bodem indringen, maar wordt deze ook verspreid over een dikkere laag, zodat de temperatuuroptoe name gering is; bij een grote warmtecapaciteit kan de bovenste bodemlaag veel warmte opnemen, maar dit leidt slechts tot kleine temperatuurgradiënten, welke nodig zijn om een bodemwarmtestroom op gang te krijgen. Het temperatuurverloop in de controle run was vergelijkbaar met de run voor droogzand.



Figuur 12. Het temperatuurverloop om 1 m diepte in vier gevoeligheidsruns waarin de grondsoort gevarieerd werd tussen droog zand, nat zand, droge klei en natte klei.

d. De invloed van zon en temperatuur

De dag die als basis is genomen voor de 'hittegolf', 24 juli 2008, was een warme, onbewolkte dag. De maximum temperatuur bereikte 27 °C. Volgens de definitie die het KNMI hanteert, treedt een hittegolf op, als gedurende op 5 achtereenvolgende dagen de maximum temperatuur tenminste 25 °C bereikt, waarvan op tenminste 3 dagen de maximum temperatuur 30 °C bereikt. In deze zin is deze hypothetische warme periode die in het model wordt toegepast geen hittegolf. Daarvoor moet de luchttemperatuur 3 °C hoger zijn. Voor dit onderzoek is ook van belang om te weten hoe belangrijk een verhoging van de luchttemperatuur is ten opzichte van een vergroting van de hoeveelheid zonnestraling. Op basis van de daggemiddelde temperatuur en straling (Figuur 1) kan grofweg worden afgeleid dat de luchttemperatuur gemiddeld 0.25 °C stijgt als de hoeveelheid straling met 1 MJ m⁻² dag⁻¹ toeneemt. Een temperatuuroename van 3 °C zou op 24 juli dan hetzelfde effect hebben als een toename van 50% in de hoeveelheid straling. In drie gevoeligheidsstudies zijn afzonderlijk de luchttemperaturen met 3 en 6 °C verhoogt (tot 30 en 33 °C op 24 juli) en is de hoeveelheid straling met 50% vermeerderd (NB: dit laatste is daarmee een tamelijk hypothetisch geval, daar 24 juli al een onbewolkte dag was). De resultaten van deze gevoeligheidsstudies zijn te zien in figuur 13. Zoals verwacht is het effect van een toename in luchttemperatuur met 3 °C vergelijkbaar met een toename van de straling met 50%, en het effect op de bodemtemperatuur is ca. 2 °C. Bij een toename van de luchttemperatuur met 6 °C neemt de bodemtemperatuur op 1 m diepte toe tot ca. 26 °C. De toename van de temperatuur van 20 °C tot 25 °C wordt bereikt in ca. 3 weken. Merk op dat het bereiken van de 25 °C grens daarmee afhankelijk is van de gemiddelde temperatuur voor aanvang van de hittegolf.



Figuur 13. Resultaten van drie gevoeligheidsruns, waarin afzonderlijk de luchttemperatuur met 3 en 6 °C werd verhoogd, en de hoeveelheid zonnestraling met 50%.

4 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 m diepte onder bestrating, gras en plantsoen, met daarbij behorende luchttemperatuur, en zonne- en thermische straling. Daarbij zijn ook metingen verricht op diverse locaties in de stad Breda van albedo en bodemwarmtegeleidingscoëfficiënten.

Uit de experimentele resultaten werd onmiddellijk duidelijk dat de bodem onder gras en plantsoen gemiddeld ongeveer 1,0 en 2,8 °C koeler dan onder bestrating. Tijdens warme periodes loopt dat verschil op tot 1,5 respectievelijk 3,5 °C. De temperatuur van het leidingwater blijkt overdag ca. 1°C kouder te zijn dan de bodem op 1 m diepte, 's nachts loopt dit verschil terug tot 0.5 °C.

De vergelijking tussen gesimuleerde bodemtemperaturen en warmtestromen met gemeten waarden was opvallend goed, zowel voor bestraat als voor oppervlak begroeit met gras. Dit geeft veel vertrouwen in de werking van het model. Omdat het model gebaseerd is op fysische processen, is het mogelijk de eerder genoemde sleutelparameters binnen redelijke grenzen te variëren, om zo te bepalen hoe gevoelig de bodemtemperaturen zijn voor deze parameters. Dit is de basis van diverse gevoeligheidssimulaties.

Uit de gevoeligheidssimulaties kunnen een aantal conclusies worden getrokken:

1. Het albedo blijkt een vrij geringe invloed te hebben op de bodemtemperaturen. De lagere temperaturen onder gras dan onder bestrating moeten verklaard worden door het deel van de beschikbare energie die boven gras wordt besteed aan verdamping, terwijl verdamping boven bestrating praktisch verwaarloosbaar is.
2. De thermische eigenschappen van bodem verschillen per bodemsoort en bodemvochtgehalte. Dit verschil heeft grote invloed op de indringing van warmte in de bodem. Tijdens een warme periode loopt de temperatuur op 1 m diepte aanzienlijk minder snel op in kleibodems dan in zandbodems. Voor zandbodems maakt het vochtgehalte niet veel verschil, maar natte kleibodems worden wel sneller warm dan droge kleibodems. Dit verschil wordt veroorzaakt door de specifieke combinatie van bodemwarmtegeleiding en bodemwarmtecapaciteit.
3. De weeromstandigheden hebben uiteraard een grote invloed op de bodemtemperaturen. De bodemtemperaturen hangen sterk af van de luchttemperatuur en van de zonnestraling. Aannemende dat hittegolven gepaard gaan met onbewolkte omstandigheden, is de mogelijke variatie in zonnestraling relatief klein ten opzichte van de luchttemperatuur. Het model laat zien dat de bodemtemperatuur in ongeveer drie weken tijd met 5 °C kan toenemen tijdens een hittegolf. Hoe snel de grens van 25 °C bereikt wordt is afhankelijk van de luchttemperatuur tijdens de hittegolf en de bodemtemperaturen voor aanvang van de hittegolf.

Uit de experimentele en de modelmatige aanpak kan geconcludeerd worden dat de grootste kans op hoge bodemtemperaturen bereikt wordt onder bestraatte oppervlaktes op zandbodems. Het daadwerkelijk bereiken van hoge temperaturen hangt af van de gemiddelde zomertemperatuur voor aanvang van een hittegolf en de luchttemperatuur tijdens de hittegolf, en lengte van de hittegolf. Met behulp van het ontwikkelde model kan de bodemtemperatuur voorspeld worden op basis van de weersverwachting. Ook zullen aansluitingen die over het algemeen 80 cm diep zitten sneller opwarmen dan de waterleiding zelf.

Aanzienlijke verlaging van de bodemtemperaturen kan bereikt worden door 1) het oppervlak te laten begroeien: de verdamping door de begroeiing koelt het oppervlak; en 2) bomen te planten die het oppervlak tenminste een deel van de dag beschaduen.

5 Literatuur

Smulders E.F.P.A., “Temperatuurfluctuaties in waterdistributienetten”, Rapport Tilburgse Waterleidingmaatschappij, 13 maart 2006.

Stonestrom, D.A., and Constantz, J., eds., 2003, Heat as a Tool for Studying the Movement of Ground Water Near Streams: U.S. Geological Survey Circular 1260.

de Vries, D.A., 1966. Thermal properties of soils. In: van Wijk, W.R. (Ed.), Physics of Plant Environment. North-Holland, Amsterdam, pp. 210–233.

M.K. van der Molen, , A.J. Dolman, M.J. Waterloo and L.A. Bruijnzeel
Climate is affected more by maritime than by continental land use change: A multiple scale analysis,
Global and Planetary Change, Volume 54, Issues 1-2, November 2006, Pages 128-149

D. M. D. Hendriks, J. van Huissteden, A. J. Dolman, and M. K. van der Molen, The full greenhouse gas balance of an abandoned peat meadow, Biogeosciences Discuss., 4, 277–316, 2007

I Oppervlakte- en luchttemperaturen en stralingscomponenten op de aangegeven locaties ten opzichte van het referentiestation

lokatie nr.	tijd		oppervlakte °C	lucht °C	straling				netto stralings W m ⁻²	
	van hh:mm	tot hh:mm			kortgolvig		langgolvig			
					inkomend W m ⁻²	gereflecteerd W m ⁻²	inkomend W m ⁻²	geemiteerd W m ⁻²		
1	10:07 - 10:37		gras, schaduw, terheijdenseweg 439	1.9	0.4	-243	48	40	14	-264
2	10:42 - 11:02		gras, volle zon, terheijdenseweg 439	2.5	1.2	-15	-8	19	20	-7
3	11:07 - 11:22		rode klinkers, Terheijdenseweg 439	5.8	0.1	-19	-46	12	40	-1
4	11:47 - 12:13		grijze klinkers, Hekoord, hoek Komoord	2.7	1.2	-20	-29	42	28	23
5	12:27 - 12:47		grijze klinkers, Hekoord 17, 10 m uit gevel	3.1	2.0	-18	-37	27	28	17
6	12:52 - 13:07		rode klinkers, Hekoord 17, 5 m uit gevel	5.0	1.2	-34	-64	27	33	25
7	13:12 - 13:42		rode klinkers, Hekoord 17, 1 m uit gevel	7.4	1.8	-44	-72	61	47	41
8	13:57 - 14:17		rode klinkers, Hekoord 17, 7 m uit gevel	2.8	1.3	-28	-68	21	31	29
9	14:47 - 15:22		grijze klinkers, Laagerf 46	4.6	1.7	-26	-68	12	39	15
10	15:37 - 16:37		grijze klinkers, Meerkoet 8	7.2	2.6	-18	-63	13	58	1

II Meetmethode voor de bodemwarmtegeleidingscoëfficiënt

Bodemwarmtegeleidbaarheid werd experimenteel vastgesteld met behulp van veldmetingen met een Field Thermal Needle System for Thermal Conductivity (FTN01, Hukseflux, Delft, NL). De FTN01 bestaat uit een 17 cm lange naald van 6 mm diameter met ingebouwde temperatuursensor en een warmtebron. Na inbrengen in de bodem en stabilisatie van de temperatuur van de naald, wordt de warmtebron ingeschakeld. Het temperatuurverloop van de naald is een functie van de afvoer van warmte naar de bodem.

De bodemgeleidbaarheid werd in verschillende bodems onder verschillende oppervlaktetypes en op verschillende dieptes bepaald. De kwaliteit van de metingen bleek af te hangen van 1) bodemtype, dat het contact tussen bodem en naald bepaald, 2) verstoring van de bodem bij inbrengen, in droge grond kan ruimte ontstaan tussen de naald en de bodem en in verzadigde grond kan de structuur veranderen ('drijfzand'), en 3) stabilisatie van de temperatuur rond de naald. De kwaliteit van de meting wordt in de eerste plaats bepaald door de standaard deviatie van de bodemgeleidbaarheid, zoals bepaald uit verschillende delen van het tijdsverloop van de temperatuursensor. Een standaarddeviatie van groter dan 0.1 W/m/K zou aanleiding geven om de meting te wantrouwen. In enkele gevallen werd de warmtegeleidbaarheid op de zelfde plaats en diepte enkele malen herhaald, waarbij de standaard deviatie de neiging had bij iedere volgende meting kleiner te worden. Ook nam de bepaalde bodemgeleidbaarheid vaak af met de standaard deviatie. In deze setup is geen rekening gehouden met de invloed van bodemvocht op de warmtegeleiding. Op de Terheydenseweg was de bodem onder 1 m diepte verzadigd. Minder diepe metingen en metingen op andere locaties waren meestal in vrij droge bodems.

III Verklaring van de symbolen

type	symbool	eenheid	omschrijving
constanten			
	C_p	$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$	warmtecapaciteit van de lucht bij gelijkblijvende druk
	L_v	$J\ kg^{-1}$	verdampingswarmte van water
	σ	$W\ m^{-2}\ K^{-4}$	constante van Stefan-Boltzman
parameters			
	l	$W\ m^{-1}\ K^{-1}$	warmtegeleidingscoëfficiënt
	h	m	diepte in de bodem
	C	$MJ\ m^{-3}\ K^{-1}$	warmtecapaciteit van de bodem
	ε	-	langgolvlige emissiviteit
	LAI	$m^2\ m^{-2}$	leaf area index (oppervlakte blad per oppervlakte grond)
	r_a	$s\ m^{-1}$	aerodynamische weerstand
	r_s	$s\ m^{-1}$	oppervlakte weerstand
	$r_{s,min}$	$s\ m^{-1}$	minimale oppervlakte weerstand (in de volle zon)
	$r_{s,max}$	$s\ m^{-1}$	maximale oppervlakte weerstand ('s nachts)
	f_{rs}	-	factor die bepaald hoe snel de oppervlakte weerstand verandert
variabelen			
	$R_{s,in}$	$W\ m^{-2}$	inkomende kortgolvlige straling (zichtbaar licht)
	$R_{s,reflectie}$	$W\ m^{-2}$	gereflecteerde kortgolvlige straling
	$R_{l,in}$	$W\ m^{-2}$	inkomende langgolvlige straling (thermische straling)
	$R_{l,emissie}$	$W\ m^{-2}$	geëmitteerde langgolvlige straling (door het aardoppervlak)
	R_n	$W\ m^{-2}$	nettostraling (van bovenstaande 4 termen), beschikbare energie
	H	$W\ m^{-2}$	sensibele warmtestroom (opwarming van de lucht)
	LE	$W\ m^{-2}$	latente warmtestroom (energie gebruikt voor verdamping)
	G	$W\ m^{-2}$	bodemwarmtestroom
	Q	$W\ m^{-2}$	energie gebruikt voor opwarming van vegetatie
	T	$^{\circ}C$ of K	temperatuur
	ρ	$kg\ m^{-3}$	dichtheid van de lucht
	ρ_v	$kg\ m^{-3}$	dichtheid van waterdamp aan het (blad)oppervlakte
	$\rho_{v,lucht}$	$kg\ m^{-3}$	dichtheid van waterdamp in de lucht



Warmteindringing in de bodem

Addendum

BTO 2008.053
December 2008

vrije Universiteit *amsterdam*



KWR

Watercycle Research Institute

Warmteindringing in de bodem

Addendum

BTO 2008.053
December 2008

© 2008 KWR

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Voorwoord

Nadat het rapport BTO 2008.053 “Warmteindringing in de bodem” (Molen et al. 2008) is uitgekomen en het bijbehorende MATLAB® model beschikbaar is gekomen, is bij KWR dit model ingezet in o.a. een GIS-case (Pieterse et al. 2009) en voor vervolgonderzoek naar de opwarming van het drinkwater in de leiding (Blokker and Pieterse-Quirijns in prep.). Tijdens dit vervolgonderzoek bleken een aantal zaken te ontbreken in het oorspronkelijke rapport, die wel onmisbaar zijn voor het juiste begrip en verdere toepassing. In dit addendum zijn daarom de volgende zaken toegevoegd:

- 1) ontbrekende meetgegevens (hoofdstuk 1);
- 2) een theoretische onderbouwing van het belang van de opwarming van de bodem (hoofdstuk 2);
- 3) een extra gevoeligheidsanalyse met betrekking tot de modelparameters (hoofdstuk 3);
- 4) een aantal extra referenties (hoofdstuk 4).

Mirjam Blokker
September 2009

Inhoud

Voorwoord		1
Inhoud		3
1	Metingen	5
1.1	Metingen albedo	5
1.2	Metingen Terheijdenseweg en Hekoord	5
1.3	Aanbeveling voor meer metingen	6
2	Theorie warmteoverdracht	7
2.1	Warmteoverdracht door straling	9
2.2	Warmteoverdracht door geleiding	9
2.3	Warmteoverdracht door convectie	10
2.4	Totale warmteoverdracht	11
3	Gevoeligheidsanalyse	13
3.1	Thermische eigenschappen van de bodem	13
3.2	Weerstandsfactoren in het temperatuurmodel	14
3.3	Beginconditie	14
4	Referenties	17

1 Metingen

1.1 Metingen albedo

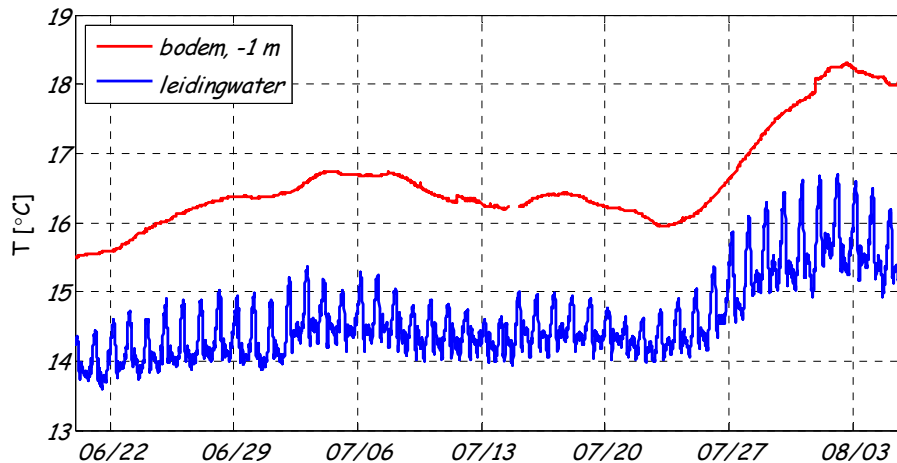
De albedo van verschillende oppervlakken is gemeten tijdens de studie (zomer 2007). Hoewel het albedo van beperkte invloed is op de modeluitkomsten zijn de meetwaardes hieronder alsnog opgenomen.

Tabel 1-1. Gemeten albedo op verschillende locaties in Breda.

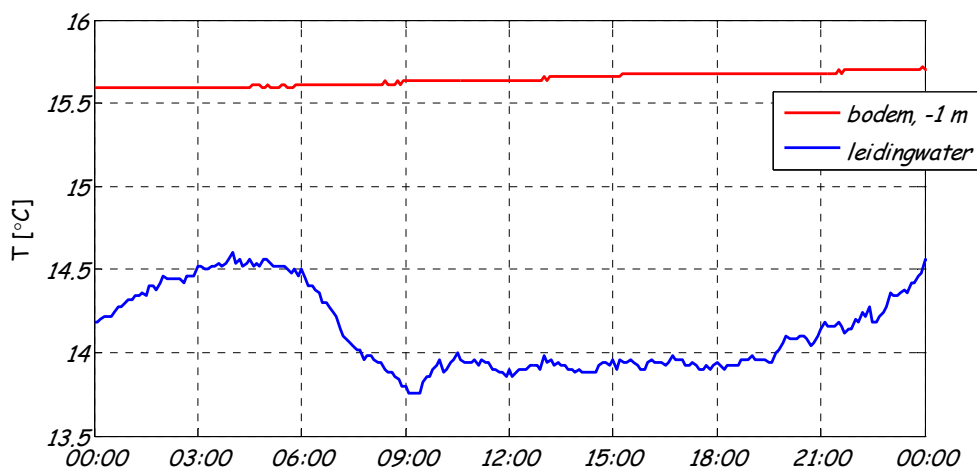
natuurlijke oppervlaktes	bedekking	kleur	albedo	
			gemiddeld	st.deviation
ps Dorst	gras	groen	0.19	0.01
ps Dorst	struiken	groen	0.22	0.02
Terheijdenseweg 439	gras	groen	0.16	0.01
gemiddeld			0.19	0.01
straatstenen, grijs				
Hekoord, hoek Komoord	straatstenen	grijs	0.14	0.01
Hekoord 17	straatstenen	grijs	0.14	0.00
Laagerf 46	straatstenen	grijs	0.11	0.00
Meerkoet 8	straatstenen	grijs	0.11	0.00
gemiddeld			0.13	0.00
straatstenen, rood				
ps Dorst	straatstenen	rood	0.16	0.01
Terheijdenseweg 439	straatstenen	rood	0.12	0.00
gemiddeld			0.14	0.01
asfalt				
Terheijdenseweg 414	asfalt	grijs	0.12	0.00
Terheijdenseweg 414	asfalt	rood	0.09	0.00
gemiddeld			0.11	0.00

1.2 Metingen Terheijdenseweg en Hekoord

Op meetlocatie Terheijdenseweg zijn bodemtemperaturen op verschillende dieptes gemeten. De gemeten data leken niet consistent (d.w.z. op een bepaalde diepte was de gemeten temperatuur hoger dan de temperatuur op zowel grotere als kleinere diepte) en een correctie is toegepast volgens een lineair model (van de temperatuur over de diepte) dat de gemiddelde temperatuur als juist heeft verondersteld; er is 1,2 °C opgeteld bij de gemeten waardes. In juni 2009 zijn de thermometers door KWR alsnog geijkt; de afwijking van de thermometer op 1 m diepte bleek 1,78 °C te laag aan te geven. De rode lijn in de oorspronkelijke figuur 6 moet dus 0,6 °C naar boven verschuiven; dit is in Figuur 1-1 gecorrigeerd weergegeven.



Figuur 1-1. Vergelijking tussen bodemtemperatuur op 1 m en leidingwatertemperatuur in de leiding ter hoogte van de Terheijdenseweg 439a.



Figuur 1-2. Vergelijking tussen bodemtemperatuur op 1 m en leidingwatertemperatuur in de leiding ter hoogte van de Terheijdenseweg 439a. Ingezoomd op 22 juni 2008.

De temperatuur van het leidingwater is 1,0 tot 1,5 °C lager dan de bodemtemperatuur. Met een starttemperatuur van 12 °C (volgens pg. 13 is de temperatuur af pompstation tussen 11,3 en 13,2 °C) en een bodemtemperatuur van 15,5 °C (Figuur 1-2) kan worden berekend (Blokker and Pieterse-Quirijns in prep.) dat in een PVC-leiding van Ø200 mm bij een verblijftijd van 5 uur het water opwarmt tot 13,7 °C en bij een verblijftijd van 9 uur het water opwarmt tot 14,5 °C (volgens pg. 13 is de verblijftijd af pompstation tussen 5 en 9 h). Dit klopt dus met de metingen van Figuur 1-2.

1.3 Aanbeveling voor meer metingen

In de wereld van de micrometeorologie verschijnen regelmatig artikelen met verbeteringen van en aanvullingen op gelijksoortige modellen als waarmee hier is gewerkt; d.w.z. modellen die de opwarming van de bodem onder verschillende atmosferische omstandigheden en beplanting beschrijven. De metingen in deze artikelen ondersteunen de algemene geldigheid van het model. De extra metingen op Terheijdenseweg en Hekoord zijn wel verzameld door de auteurs van BTO 2008.053, maar niet verder geanalyseerd of gebruikt voor modelvalidatie. De aanbeveling voor meer metingen, zoals deze in de samenvatting van BTO 2008.053 is geformuleerd, lijkt derhalve overbodig.

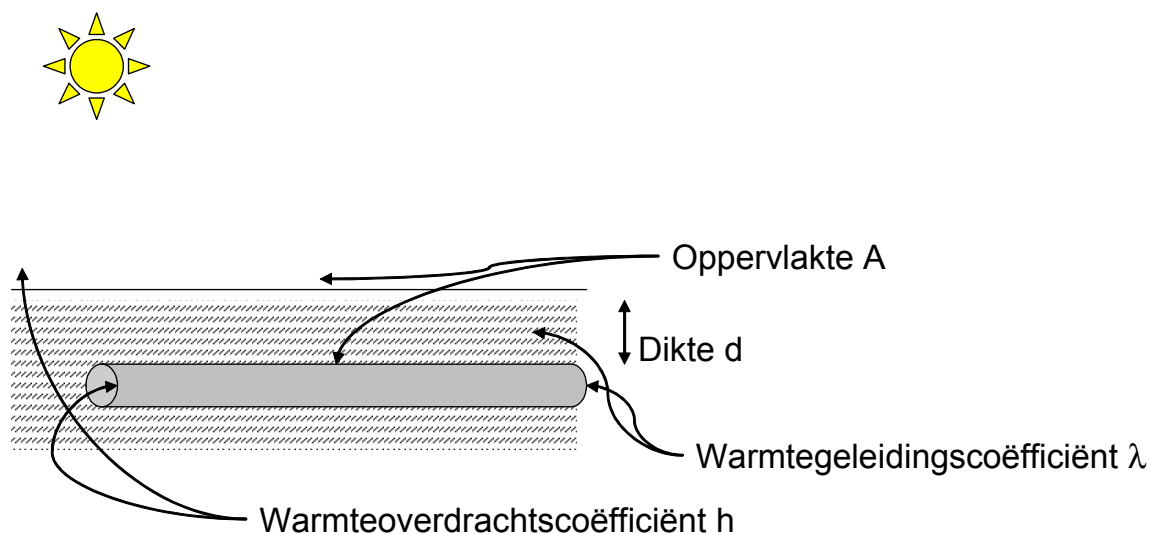
N.B. in hoofdstuk 3 wordt een aanbeveling gedaan met betrekking tot zaken die nog wel verdere meting behoeven.

2 Theorie warmteoverdracht

Warmteoverdracht (meer specifiek de opwarming van het leidingwater) vindt plaats middels drie mechanismen (zie Figuur 2-1),

- 1) thermische straling: de zon warmt de aarde op en de aarde zendt warmte uit.
- 2) Warmtegeleiding:
 - a. de bodem geleidt de warmte van het oppervlak naar dieper gelegen lagen,
 - b. de waterleiding geleidt warmte van de buiten- naar de binnenkant
- 3) Convectorie:
 - a. de wind kan de warmteoverdracht van de bodem naar de buitenlucht bevorderen
 - b. de stroming van het drinkwater door de waterleiding beïnvloedt de warmteoverdracht tussen leiding en water

De thermische eigenschappen van lucht, bodem, leidingen en water zijn samengevat in Tabel 2-1.



Figuur 2-1 Opwarming van drinkwater in het distributienet.

Tabel 2-1 Typische waarden voor een aantal grootheden van bodemsoorten en leidingmaterialen.

materiaal	conditie	dichtheid	soortelijke warmte	geleidbaarheidscoëfficiënt	temperatuurvereffeningscoëfficiënt
		ρ (kg/m ³ x 10 ³)	c_p (J/kg.K x 10 ³)	λ (W/m.K)	$a = \lambda / \rho \cdot c_p$ (m ² /s x 10 ⁻⁶)
Lucht	20 °C, stilstaand	0,0012	1,01	0,025	20,50
Water	20 °C, stilstaand	1,00	4,19	0,57	0,14
Ijs	0 °C, puur	0,92	2,10	2,24	1,16
Sneeuw	Nieuw	0,10	2,09	0,08	0,38
Sneeuw	Oud	0,48	2,09	0,42	0,05
Zandbodem	Vers	1,60	0,80	0,30	0,24
	Droog		0,8 - 1,0	0,3 - 1,6	1,2
	Verzadigd		1,2 - 1,8	1,7 - 5,0	1,0
Kleibodem	Droog	1,60	0,89	0,25	0,18
	Droog		0,6 - 1,3	0,4 - 1,0	0,3
	Verzadigd		1,0 - 2,1	0,9 - 2,3	0,4
Veenbodem	Droog	0,30	1,92	0,06	0,10
Rots	Hard	2,70	0,75	2,90	1,43
GGY	Water-leiding	7,30	0,50	60	16,44
NGY		7,55	0,49	55	14,87
AC		2,00	1,00	0,43	0,22
PVC		1,38	1,00	0,16	0,12
Koper		8,96	0,39	403	0,11

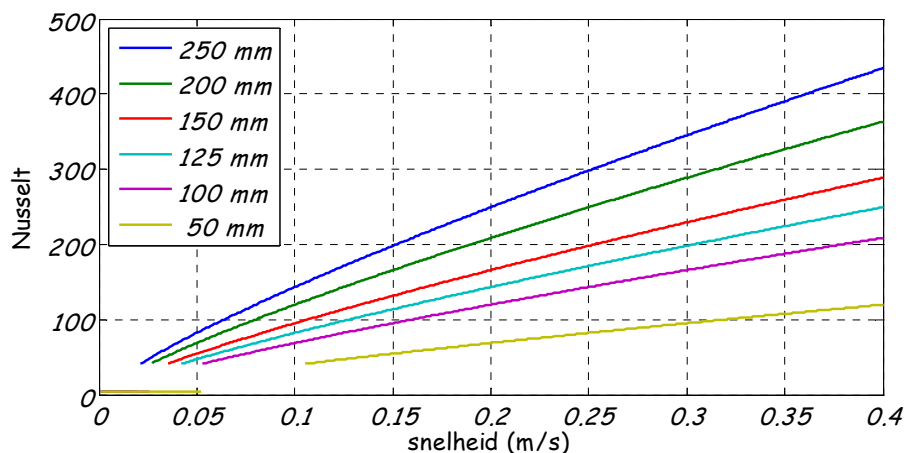
Bronnen: (Arya 2001); specifieke bodem (Molen et al. 2008); waterleiding (Janssen and Warmoeskerken 1991; Rafferty 1998).

Tabel 2-2 De fysieke grootheden die een rol spelen bij warmteoverdracht.

symbool	beschrijving	eenheid
Φ_w	energiestroom	[J/s] = [W]
Φ_m	massastroom	[kg/s]
T	temperatuur	[K]
ΔT	temperatuurverschil tussen vloeistof aan de wand en in de rest van de vloeistof $= T_{wand} - T_{water}$	[K]
d	inwendige diameter	[m]
$\langle v \rangle$	de gemiddelde stroomsnelheid	[m/s]
x	de afstand tot het begin van de leiding	[m]
L	lengte van de leiding	[m]
A	warmte-uitwisselend oppervlak = πdx	[m ²]
ρ	de dichtheid van het water bij gegeven temperatuur	[kg/m ³]
η, η_w	de viscositeit van het water (bij de temperatuur van de wand)	[Pa.s]
c_p	de soortelijke warmte	[J/kg.K]
λ	de warmtegeleidingscoëfficiënt	[W/m.K]
α	warmteoverdrachtcoëfficiënt	[W/m ² .K]
β	de uitzettingscoëfficiënt	[K ⁻¹]

Tabel 2-3 Dimensieloze getallen die ene rol spelen bij warmteoverdracht.

symbool	getal van	omschrijving
Nu	Nusselt	een maat voor de warmteoverdracht door convectie ten opzichte van de warmteoverdracht door geleiding (Figuur 2-2)
Re	Reynolds	de verhouding tussen de traagheidskracht en visceuze kracht
Pr	Prandtl	de verhouding tussen de hydrodynamische grenslaagdikte en de thermische grenslaagdikte
Pe	Péclet	een maat voor de warmteoverdracht door geleiding ten opzichte van de warmteoverdracht door convectie (= $Re.Pr$)
Gz^*	Graetz	de verhouding tussen de warmteoverdracht door geleiding en de convectieve warmteoverdracht, $Gz = d/L.Re.Pr$
Gr^*	Grashof	de verhouding tussen de kracht t.g.v. dichtheidsverschillen en de de visceuze kracht.



Figuur 2-2 Nusseltgetal afhankelijk van (turbulente) snelheid in verschillende leidingdiameters bij temperatuur van 15 °C.

2.1 Warmteoverdracht door straling

De thermische straling van de zon op de aarde is een gegeven en altijd ongeveer gelijk:

$$\phi_w = A \cdot \sigma \cdot T^4 \approx A \cdot \sigma \cdot 4T^3 \cdot \Delta T = A \cdot h_s \cdot \Delta T \approx A \cdot 5 \cdot 10^4 \cdot a \cdot \Delta T \quad (\text{vgl. 1})^\dagger$$

De warmteoverdrachtscoëfficiënt voor straling h_s is lineair afhankelijk van de absorptiecoëfficiënt a (waarde tussen 0 en 1). Een zwart oppervlak (zoals asfalt) heeft een hoge absorptiecoëfficiënt en warmt sneller op dan een reflecterend oppervlak. De verhouding tussen stralend en bestraald oppervlak kan in geval van zon en aarde worden verwaarloosd; de temperatuur van de zon kan constant worden verondersteld.

2.2 Warmteoverdracht door geleiding

De warmteoverdracht door geleiding wordt beschreven door:

$$\phi_w = A \frac{\lambda}{d} \Delta T \quad (\text{vgl. 2})$$

Hierin is d de dikte van de laag (bodem of wanddikte van de leiding); λ is de warmtegeleidingscoëfficiënt, die voor metalen over het algemeen vrij hoog is (80,4 W/m.K voor ijzer) en voor plastics erg laag (0,16 W/m.K voor PVC). Voor de bodem hangt de warmtegeleidingscoëfficiënt af van het bodemmateriaal (Tabel 2-1) en de grondwaterstand.

* Bij turbulent stroming spelen Gz en Gr geen rol

† σ is de Stefan-Boltzmann constante = 5.6710^{-8} W/m².K⁴ en $T_{zon} = 6000$ K.

2.3 Warmteoverdracht door convectie

De bodem staat warmte af aan de langstromende lucht, de leiding staat warmte af aan het doorstromende drinkwater. Voor convectie geldt:

$$\phi_w = A \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (\text{vgl. 3})$$

Hierin is α de warmteoverdrachtscoëfficiënt, die afhangt van een groot aantal variabelen welke zijn samengevat in een aantal (dimensieloze) kentallen (Tabel 2-3).

Er bestaan twee vormen van convectie: natuurlijke convectie en gedwongen convectie. *Natuurlijke* (of vrije) convectie gebeurt wanneer een vloeistof in contact is met een oppervlak dat warmer of kouder is dan de vloeistof. Als een vloeistof verwarmd of afgekoeld wordt, verandert de dichtheid. Hierdoor ontstaat een dichtheidsverschil in de vloeistof, dat een beweging in de vloeistof veroorzaakt. Door de beweging/stroming kan warmteoverdracht door convectie plaatsvinden.

Bij stroming van een vloeistof in een leiding ontstaat er aan de binnenzijde van de leiding een laminaire grenslaag. In deze laag is de stromingssnelheid kleiner dan in het centrum van de leiding. De warmteoverdracht in de laminaire grenslaag gaat veel moeilijker dan in turbulente stroming en de laminaire laag bepaalt daarmee de snelheid van de warmteoverdracht. De weerstand van de laminaire grenslaag is afhankelijk van de dikte van de laag, van eigenschappen van de vloeistof (viscositeit) en de gladheid van de wand. De dikte van de laminaire grenslaag is afhankelijk van het stromingsgedrag van de vloeistof. Hoe groter de turbulentie, hoe sterker de turbulentie van de stroming des te kleiner de laminaire grenslaag. De warmteoverdracht zal dan sneller verlopen. De warmteoverdracht van de binnenzijde van de leiding naar de vloeistof wordt dus bepaald door het transport in de laminaire grenslaag. De coëfficiënten die dit transport beschrijven zijn afhankelijk van de sterkte van de stroming en worden beschreven door dimensieloze getallen.

De warmtestroom door convectie kan met vgl. 3 worden berekend. De warmteoverdrachtcoëfficiënt wordt afgeleid uit dimensieloze getallen afhankelijk van het stromingsgedrag van de vloeistof. Er is een direct verband tussen het Nusselt getal en de warmteoverdrachtcoëfficiënt α :

$$Nu = \frac{\alpha \cdot \ell}{\lambda}$$

Met ℓ de karakteristieke afmeting, bij een cilinder is dit de diameter d [m].

Voor de berekening van Nu bestaan verschillende relaties van dimensieloze getallen, afhankelijk van het type convectie (vrij of gedwongen) en het stromingsgedrag (laminair of turbulent):

- vrije convectie
 - Warmteoverdracht door vrije convectie vindt plaats in stilstaand water. De bekende kentallen voor vrije convectie hebben betrekking op convectie aan de buitenzijde van een buis of langs een verticale of horizontale wand. In (Janssen and Warmoeskerken 1991) zijn relaties gevonden van vrije convectie tussen twee grote horizontale platen. Mogelijk dat deze een benadering voor de opwarming van stilstaand water in het leidingnet kan zijn. Dit is afhankelijk van de afstand tussen de twee platen die verondersteld wordt. Deze is echter onbekend. In de praktijk van het leidingnet (diameter rond de 100 mm en temperatuur rond 10 - 25 °C) blijkt Nu heel groot te worden, dit lijkt onwaarschijnlijk.
 - De reden dat er geen vergelijkingen zijn voor cilinders is dat dit geen industrieel proces is; er is dus nooit aandacht aan besteed.
 - Een andere mogelijkheid is om de warmteoverdracht in stilstaand water als geleiding te benaderen, zie vgl. 2. Nu is dan gelijk aan 1 gesteld.
- gedwongen convectie
 - Warmteoverdracht door gedwongen convectie vindt plaats in stromend water. Het Reynolds getal Re beschrijft het stromingsgedrag van het water. Hoe groter Re des te turbulenter de stroming en des te sneller de warmteoverdracht.

conditie		Nusselt	toelichting
Vrije convectie	$Gr \cdot Pr < 10^3$	$Nu = 1$	(Janssen and Warmoeskerken 1991); relaties van vrije convectie tussen twee grote horizontale platen.
	$10^4 < Gr \cdot Pr < 10^7$	$Nu = 0.15 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}}$	
	$Gr \cdot Pr > 10^7$	$Nu = 0.17 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{3}}$	
Laminaire stroming $Re < 2300$		$Nu = C \cdot Pe^{0.23} \cdot \left(\frac{d}{L}\right)^{0.5}$	$C = 15,0$ voor opwarmen $= 11,5$ voor afkoelen
	$Pr > 0,5$	$Nu = 1,86 \left(\frac{Re Pr D}{L}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\mu_b}{\mu_s}\right)^{0.14}$	(Çengel 1998): μ is de viscositeit, met subscript b voor 'bulk temperature' (temperatuur van het water) en s voor 'surface temperature' (temperatuur aan het oppervlak).
	$Gz < 0,05$	$Nu = 1,08 \cdot (Gz)^{\frac{1}{3}}$	(Janssen and Warmoeskerken 1991); er is geen waarde gegeven voor Nu in het overgangsgebied van laminaire naar turbulente stroming. Geldt voor gladde wand.
		$Nu = 1,62 \cdot (Gz)^{\frac{1}{3}}$	
	$Gz > 0,1$	$Nu = 3,66$	
turbulente stroming $Re > 4000$		$Nu = 0,024 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.33}$	(Çengel 1998): $n = 0.4$ voor opwarmen; $n = 0.3$ voor afkoelen; Dittus-Boulter vergelijking voor gladde wand.
	$0,7 < Pr < 160$	$Nu = 0,023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^n$	
		$Nu = 0,125 \cdot f \cdot Re \cdot Pr^{\frac{1}{3}}$	

2.4 Totale warmteoverdracht

De totale warmteoverdrachtscoëfficiënt of warmtedoorgangscoefficiënt U kan worden berekend door de afzonderlijke warmteoverdrachtscoëfficiënten (van respectievelijk straling, geleiding door de bodem, geleiding door de leidingwand en convectie van het stromende drinkwater) als weerstanden in serie te zien*:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_s} + \frac{d_{bodem}}{\lambda_{bodem}} + \frac{d_{leidingwand}}{\lambda_{leidingwand}} + \frac{d_{leiding}}{\lambda_{water} \cdot Nu} \quad (\text{vgl. 4})$$

Met $h_s \approx 5.10^4 \text{ W/m}^2\text{K}$; d_{bodem} ca. 1 m; λ_{bodem} in de orde van grootte van 0,3 W/m.K (zie Tabel 2-1); $d_{leidingwand}$ ca. 1 mm; $\lambda_{leidingwand}$ ca. 60 W/m.K (GGY); $d_{leiding}$ ca. 0,1 m (100 mm), $\lambda_{water} = 0,6 \text{ W/m.K}$ en Nu ca. 100 (Figuur 2-2) volgt dat U met name bepaald wordt door de bodem.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_s} + \frac{d_{bodem}}{\lambda_{bodem}} + \frac{d_{leidingwand}}{\lambda_{leidingwand}} + \frac{d_{leiding}}{\lambda_{water} \cdot Nu} = \frac{1}{5 \cdot 10^4} + \frac{1}{0,3} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{60} + \frac{0,1}{0,6 \cdot 100} \approx \frac{1}{0,3} = \frac{d_{bodem}}{\lambda_{bodem}} \quad (\text{vgl. 5})$$

Dit is de reden dat het onderzoek in het BTO zich gericht heeft op de bepaling van de warmteindringing in de bodem en de warmteoverdracht naar het leidingwater buiten beschouwing is gelaten.

* N.B. in deze vergelijking is de invloed van convectie van de lucht (de wind) buiten beschouwing gelaten.

3 Gevoeligheidsanalyse

In BTO 2008.053 is een gevoeligheidsanalyse gedaan voor een aantal fysische parameters. Een aantal modelparameters is niet nader beschouwd, terwijl deze wel heel belangrijk blijken te zijn. Dit hoofdstuk bevat een aanvulling.

3.1 Thermische eigenschappen van de bodem

De tijd die het duurt voor de bodem is opgewarmd wordt zeer sterk beïnvloed door de thermische eigenschappen van de bodem. Zoals uit Tabel 2-1 blijkt, zijn deze waarden zeer variabel en hangen bovendien af van het vochtgehalte. Een gevoeligheidsanalyse voor de opwarmingstijd afhankelijk van de thermische eigenschappen van de bodem is nodig.

De warmtebalans is de basis:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q \quad (\text{vgl. 6})$$

Deze vergelijking kan worden opgelost door vast te stellen dat

- er geen warmteproductie plaatsvindt ($q=0$),
- er geen stroming plaatsvindt ($v_x = v_y = v_z = 0$),
- de opwarming alleen van bovenaf (in de x-richting, $\delta T/\delta y = \delta T/\delta z = 0$) plaatsvindt

en de randvoorwaarden dat

- op tijdstip $t = 0$ geldt een initiële temperatuur van T_0 ,
- op tijdstip $t = \infty$ is de temperatuur op het grensvlak ($x = 0$) gelijk aan de buitentemperatuur T_1 en op oneindige diepte ($x = \infty$) gelijk aan de initiële temperatuur T_0 .

De temperatuur (T) van de bodem verandert dan over de tijd (t) en de diepte van de bodem (x) volgens:

$$T(x,t) = T_1 - (T_1 - T_0) \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right) \quad (\text{vgl. 7})$$

Hierin is T_1 de buitentemperatuur, T_0 is de initiële temperatuur van de bodem en α is de temperatuurvereffeningscoëfficiënt ($=\lambda/\rho c_p$, zie Tabel 2-1).

Wanneer de temperatuur aan het oppervlak (T_1) constant 30 °C is en de bodemtemperatuur (T_0) is 20 °C dan duurt het volgens vgl. 7

- 11 dagen voordat op 1 meter diepte de bodemtemperatuur is opgewarmd tot 25 °C (met $\alpha = 1,26 \cdot 10^{-6}$, zoals bepaald voor Dorst, te weten zandgrond onder gras);
- 71 dagen voordat op 1 meter diepte de bodemtemperatuur is opgewarmd tot 25 °C (met $\alpha = 0,18 \cdot 10^{-6}$, literatuurwaarde voor droge klei).

In het onderzoek naar de warmteindringing in de bodem is de warmtegeleidingscoëfficiënt (λ) op verschillende locaties gemeten. Er bleek een groot verschil te zijn tussen de λ van de bodem onder gras en onder bestrating. Mogelijk wordt dit verschil veroorzaakt door de aanwezigheid van plantenwortels en kleine dieren in de bodem of door het meer inklinken van de bodem onder bestrating; dit leidt mogelijk tot een verschil in vochtgehalte of compactheid van de bodem. Het vochtgehalte, de dichtheid (ρ) en warmtecapaciteit (c_p) zijn niet gemeten, zodat deze hypothese niet getest is. De relevante parameter in de opwarming van de bodem is de temperatuurvereffeningscoëfficiënt, $\alpha = \lambda/\rho c_p$. Wanneer ook ρ en c_p anders zijn voor de bodem onder gras en onder bestrating kan α minder variabel zijn, of minder afhankelijk van de bodembedekking, dan op grond van λ zou worden verondersteld.

Bij het valideren van het model is de gemeten λ gebruikt en zijn ρ en c_p geschat op basis van literatuurwaarden en calibratie op basis van de metingen van de bodemtemperatuur. Een aanbeveling voor het grootschalig toepassen van het model om de bodemtemperatuur te voorspellen is om de thermische eigenschappen van verschillende bodemsoorten, met verschillend vochtgehalte en verschillende type bestrating beter in beeld te krijgen.

Voor het toepassen van het model is het belangrijk om de bepalende factoren bodemtype, vochtgehalte en bodembedekking met voldoende nauwkeurige ruimtelijke verdeling te kennen. Een verkenning met GIS (Pieterse et al. 2009) geeft aan dat die data niet zomaar voorhanden zijn.

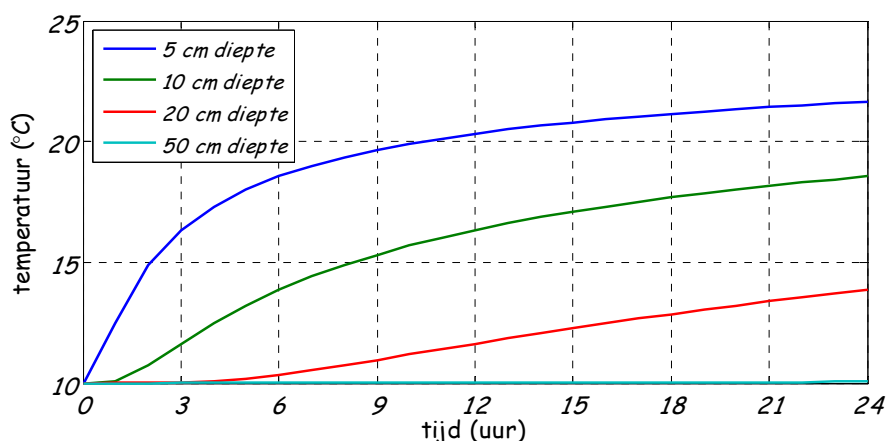
3.2 Weerstandsfactoren in het temperatuurmodel

Het model beschrijft hoe energie-uitwisseling plaatsvindt tussen bodem en atmosfeer aan de hand van verschillende fysische grootheden en natuurkundige principes, maar ook zijn een aantal 'weerstand' ingebouwd die er voor zorgen dat niet alle energie wordt overgedragen. Deze weerstanden hebben wel een eenheid, namelijk [s/m], maar zijn geen fysische grootheden die eenvoudig gemeten kunnen worden. De oppervlakte weerstand r_s en de aerodynamische weerstand r_a zijn afhankelijk van het type begroeiing; ze zijn gerelateerd aan de verdamping door zowel natte als droge planten. Waardes voor deze weerstanden zijn in de literatuur wel te vinden.

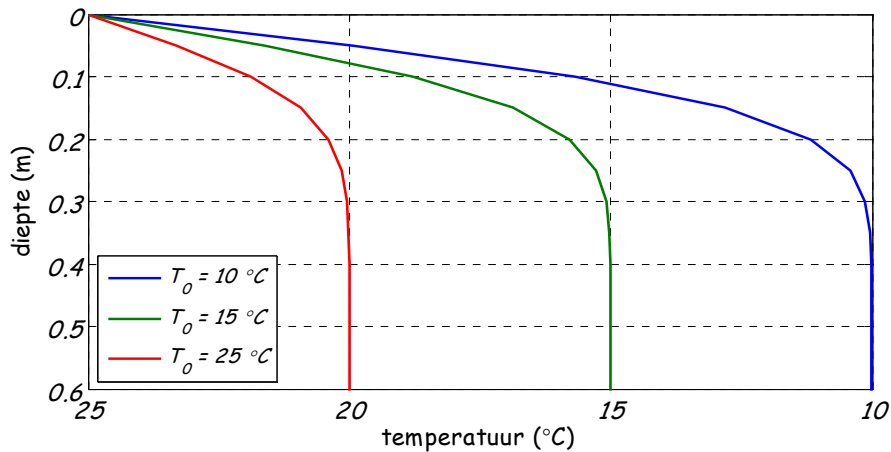
Daarnaast is er de bodem-lucht weerstand r_g . Hiervan bestaan volgens persoonlijke communicatie met Michiel van der Model geen literatuurwaardes. Om het model voor Dorst passend te krijgen is de optimale waarde van r_g vastgesteld op 10 s/m. Na een correctie in het model van enkele andere factoren (de term u^* in Eq. (5.42) proefschrift (Molen 2002) was weggelaten en a^2 in Eq. (5.45) werd berekend zonder de ln-term te kwadrateren) blijkt de waarde van 30 s/m nodig om het model goed te laten passen. Onduidelijk is of de waarde van 30 s/m geldig is voor heel Nederland of dat daar ook nog variatie in zit.

3.3 Beginconditie

Op basis van vgl. 7 kan berekend worden hoe het temperatuurverloop is op basis van verschillende T_0 . Figuur 3-1 laat de tijdsduur zien tot de opwarming van een kleibodem op verschillende dieptes. Op 50 cm diepte is na 24 uur de temperatuur nog nauwelijks gestegen. Op 5 cm diepte is na 3 uur de temperatuur al toegenomen tot 17 °C. In werkelijkheid warmt de bodem overdag op, en koelt 's nachts weer af; er is dus een maximale opwarmtijd van ca. 10 uur voor de verschillen tussen dagen. In Figuur 3-2 is het temperatuurverloop in een kleibodem getoond na een opwarmtijd van 10 uur. Afhankelijk van het temperatuurverschil is de indringdiepte van de buitentemperatuur na 100 uur maximaal 30 cm.

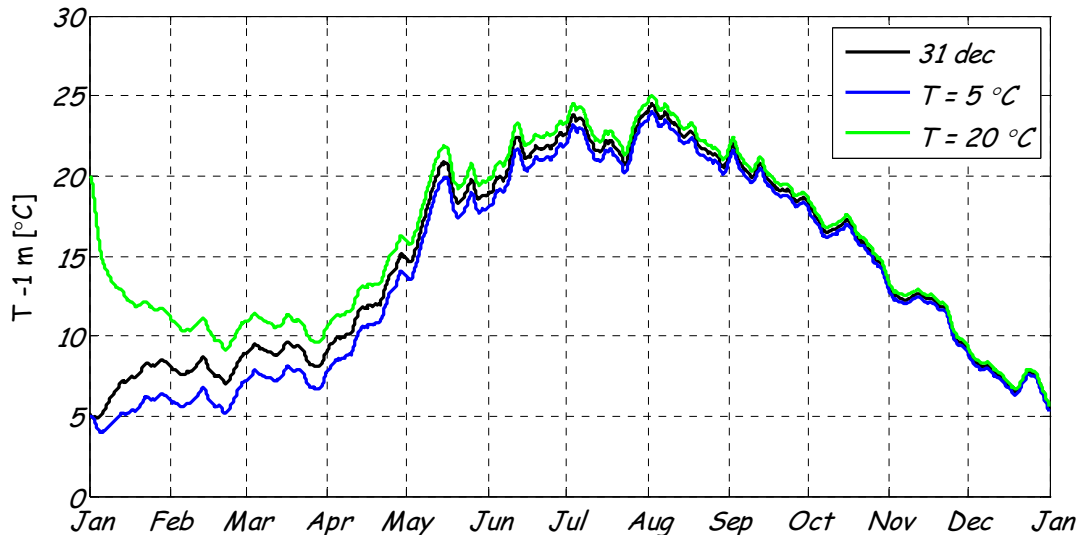


Figuur 3-1 Temperatuurverloop in klei ($\alpha = 0,18 \cdot 10^{-6}$) op verschillende dieptes, bij $T_0 = 10$ °C, $T_1 = 25$ °C.



Figuur 3-2 Temperatuurverloop in klei ($\alpha = 0,18 \cdot 10^{-6}$) na 10 uur opwarmen, bij verschillende T_0 en $T_1 = 25$ °C.

Het model is zeer gevoelig voor de beginwaarden van de bodemtemperatuur op verschillende dieptes. Zie in Figuur 3-3 bijvoorbeeld dat het ca. 5 maanden duurt voordat bij verschillende waarden voor T_0 de lijnen berekende waarden voor T vrijwel gelijk worden.



Figuur 3-3. Gemodelleerde temperatuur op 1 meter diepte met weerdata van Schiphol in 2008 (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut). De begincondities voor de temperatuur op 0,05 – 5,5 m diepte is gevarieerd: 1) deresulterende temperatuur op 31 december 2008 is als beingconditiegenomen (zwarte lijn); 2) op elke diepte is de temperatuur op 5 °C gesteld (blauwe lijn) en 3) op elke diepte is de temperatuur op 20 °C gesteld (groene lijn).

Tijdens het valideren van het model zijn de gemeten bodemtemperaturen gebruikt. Wanneer deze onbekend zijn blijkt dat ca. 2-5 maanden aan weergegevens nodig is om op een betrouwbare uitkomst uit te komen (d.w.z. een uitkomst die niet verandert met de aanname van andere begincondities). Wanneer geen bodemtemperaturen gemeten worden is het dus belangrijk om een aantal maanden aan weergegevens voor de datum die wordt gesimuleerd mee te modelleren. Het KNMI verzamelt deze data; een waterbedrijf hoeft niet zelf weerdata te verzamelen.

In het verlengde hiervan kan worden opgemerkt dat de zomer van 2008 geen warme zomer was en dus de 'beginconditie' een relatief koude bodem was. De gevoeligheidsanalyse van figuur 14 in BTO 2008.053 suggereert dat er minimaal 4 weken met een gemiddelde temperatuur van 30 °C nodig is voordat de bodem op 1 meter diepte de 25 °C bereikt. In een jaar dat het voorjaar relatief warm is kan ook in een kortere periode met een 'hittegolf' de bodemtemperatuur al zo hoog worden. Het model van de zomer

van 2006 bijvoorbeeld, laat zien dat in een zandgrond op 1 meter diepte de temperatuur gedurende 7 dagen boven de 25 °C is uitgekomen (Blokker and Pieterse-Quirijns in prep.).

4 Referenties

- Arya, S. P. (2001). *Introduction to micrometeorology*, Academic press, San Diego. Table on web: <http://apollo.lsc.vsc.edu/classes/met455/notes/section6/2.html>.
- Blokker, E. J. M., and Pieterse-Quirijns, E. J. (in prep.). "Modelling temperature in the Drinking Water Distribution System."
- Çengel, Y. A. (1998). *Heat transfer: a practical approach*, McGraw-Hill Companies, Inc.
- Janssen, L. P. B. M., and Warmoeskerken, M. M. C. G. (1991). *Transport phenomena data companion*, Delftse Uitgevers Maatschappij b.v., Delft.
- Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut. "Onderzoeksgegevens t.b.v. VROM."
- Molen, M. K. v. d. (2002). "Meteorological impacts of land use change in the maritime tropics," VU, Amsterdam.
- Molen, M. v. d., Kooij, H., Smulders, E. F. P. A., and Heijman, S. G. J. (2008). *Warmteindringing in de bodem*, KWR, Nieuwegein. BTO 2008.053.
- Pieterse, E. J., Raterman, B., Daal, K. H. A. v., and Beuken, R. H. S. (2009). *De inzet van Geografische Informatiesystemen voor analyses van het leidingnet*, KWR, Nieuwegein. BTO 2009.016.
- Rafferty, K. (1998). "Piping geothermal fluids." Chapter 10, *Geothermal direct use engineering and design guidebook*, Geo-Heat Center, Oregon Institute of Technology, Klamath Falls, OR.

