



Bedrijfstakonderzoek
BTO 2023.064 | Augustus 2023

Meetprotocol bodemtemperatuur- metingen

Colofon



Meetprotocol Bodemtemperatuurmetingen

BTO 2023.064 | Augustus 2023

Dit onderzoek is onderdeel van het collectieve Bedrijfstakonderzoek van KWR, de waterbedrijven en Vewin.

Opdrachtnummer

402045-236

Projectmanager

Ir. A. (Andreas) Moerman

Opdrachtgever

BTO – Thema-overstijgend onderzoek – Energietransitie en Drinkwater

Auteur(s)

A. (Aulia) Galama-Tirtamarina, MSc. EngD.

Kwaliteitsborger(s)

Dr. J. R. G. (Joost) van Summeren

Verzonden naar

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten.

Een jaar na publicatie is het openbaar.

Keywords

Bodemtemperatuurmetingen, BTM, temperatuur, bodemtemperatuurmodel

Jaar van publicatie
2023

Meer informatie
AGa

T +31 30 606 9639
E Aulia.Tirtamarina@kwrwater.nl

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

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

KWR

April 2023 ©

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

Samenvatting

Meetprotocol bodemtemperatuurmetingen

Auteur(s) A. (Aulia) Galama-Tirtamarina, MSc.

Het Drinkwaterbesluit bepaalt dat de maximum temperatuur van drinkwater dat aan de consument ter beschikking wordt gesteld 25 °C mag zijn. De oplossingsrichtingen voor het beperken van drinkwateropwarming zijn uit eerdere onderzoeken (Agudelo-Vera en Fujita, 2017; Van Summeren, 2022) bekend, zoals bij de aanleg van leidingen de drie meest bepalende factoren voor hotspots proberen te vermijden: volle zon, tegels en antropogene bronnen. Echter, de bodemtemperatuurmetingen die in deze eerdere onderzoeken zijn uitgevoerd zijn meestal uitgevoerd in een gecontroleerde proefomgeving en er zijn nog maar beperkt temperatuurmetingen in het veld gedaan, zoals bijvoorbeeld het onderzoek van Agudelo-Vera en Fujita (2017), waar ze bodemtemperatuur in Rotterdam hebben gemeten. Agudelo-Vera en Fujita (2017) geven aan dat het is belangrijk om de warmte-emissies per bron verder te onderzoeken om de stedelijke ondergrond te beheren. Aandacht moet ook worden gegeven aan de onderzoek over de aanwezigheid van meerdere bronnen.

Het meetprotocol dat hier wordt beschreven is bedoeld om de drinkwaterbedrijven te helpen om richting derden (voornamelijk gemeenten) aan te tonen welke oplossingsrichtingen gewenst zijn voor het beperken van de drinkwateropwarming en in hoeverre deze oplossingsrichtingen invloed hebben op het beperken van drinkwateropwarming. Het meetprotocol kan de drinkwaterbedrijven helpen om de metingen uniformer en van goede kwaliteit uit te voeren, zodat het resultaat van de metingen voor bredere doeleinden kan worden gebruikt, zoals voor de kalibratie van het Bodemtemperatuurmodel (BTM), dat nu met name is gekalibreerd en gevalideerd voor de zomerperiode en minder voor winterperiodes met vorst).

Als het gaat over de invloed van de directe omgeving van een leiding – zoals de bodembedekking en bovengrondse inrichting van de straat – geven bodemtemperatuurmetingen meer informatie dan metingen van de drinkwatertemperatuur in de leiding. In dit rapport wordt de belangrijkste informatie over bodemtemperatuurmetingen toegelicht. Vervolgens zijn de stappen beschreven om bodemtemperatuurmetingen uit te voeren en worden voorbeelden van bodemtemperatuurmetingen gegeven.

Inhoud

1	Inleiding	5
1.1	Aanleiding en doel	5
1.2	Uitgangspunten: bodemtemperatuur, geen drinkwatertemperatuur	5
1.3	Aanpak	6
2	Methode en checklist voor bodemtemperatuurmetingen	7
2.1	Invloedsfactoren	7
2.2	Type sensoren	9
2.3	Wanneer meten	11
2.4	Waar meten	12
2.5	Randvoorwaarden en checklist voor locaties van bodemtemperatuurmetingen	14
2.6	Kostenindicatie	15
2.7	Interpretatie van bodemtemperatuurmetingen en vergelijking met het BTM	16
3	Stappen en voorbeelden voor bodemtemperatuurmetingen	18
3.1	Stappen tot een concreet plan voor bodemtemperatuurmetingen	18
3.2	Bodemtemperatuurmeting, voorbeeld I	18
3.3	Bodemtemperatuurmeting, voorbeeld II	19
3.4	Bodemtemperatuurmeting, voorbeeld III	20
	Literatuur	22
	Bijlage 1 Protocol plaatsing bodemtemperatuur-sensoren	23
	Bijlage 2 Bodemtemperatuurmetingen met glasvezelkabel en DTS-machine	24
	Bijlage 3 CPI Index	25

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en doel

Het Drinkwaterbesluit bijlage A bepaalt dat de maximum temperatuur van drinkwater dat aan de consument ter beschikking wordt gesteld 25 °C mag zijn. De maximale watertemperatuur tot 25 °C is vastgesteld in verband met de volksgezondheid. Er worden echter steeds vaker (te) hoge temperaturen in het drinkwaterleidingnet gemeten tijdens de wettelijke RDT-metingen (Random Daytime Sampling). De oplossingsrichtingen voor het beperken van drinkwateropwarming zijn theoretisch bekend, namelijk o.a. het dieper leggen van drinkwaterleidingen, het leggen van de leidingen in de schaduw en/of onder gras (Agudelo-Vera et. al., 2015; Agudelo-Vera en Fujita, 2017). De bodemtemperatuur rond de waterleiding is namelijk bepalend voor de drinkwatertemperatuur aan de tap (Blokker en Pieterse-Quirijns, 2013).

In een overleg met de projectgroep hebben de afgevaardigden van de waterbedrijven aangegeven dat ze behoefte hebben aan een methode om derde partijen (voornamelijk de gemeente) te laten zien dat maatregelen nodig zijn om opwarming van drinkwater te beperken, en voor de mogelijke oplossingsrichtingen te laten zien hoeveel deze bijdragen aan die beperking. Zij gaven daarbij aan dat een model niet voldoende is; ze willen metingen op specifieke locaties doen. Omdat er veel variabelen zijn die de bodem- en daarmee drinkwatertemperatuur bepalen, is de interpretatie van temperatuurmetingen (van bodem en/of drinkwater) niet zo eenvoudig. Om conclusies te kunnen verbinden aan de mate waarin maatregelen bijdragen aan de beperking van de opwarming van drinkwater is een goed meetprotocol onontbeerlijk. Metingen van bodemtemperaturen geven meer informatie, dan metingen van de drinkwatertemperatuur in de leiding, over de invloed van de directe omgeving, zoals de bodembedekking en bovengrondse inrichting van de straat. Het meetprotocol richt zich dan ook op metingen van de bodemtemperatuur.

Het doel van project is een checklist en achtergrondinformatie op te stellen zodat de drinkwaterbedrijven meetcampagnes kunnen uitvoeren, en het resultaat van de temperatuurmetingen kunnen gebruiken om aan derden te laten zien wat het effect is van verschillende maatregelen op het beperken van de opwarming van de bodem en daarmee van het drinkwater. Het beschreven meetprotocol zorgt ervoor dat het uitvoeren van de metingen wordt gestroomlijnd en de metingen betrouwbaar, uniformer en vergelijkbaar zijn.

1.2 Uitgangspunten: bodemtemperatuur, geen drinkwatertemperatuur

Het meetprotocol richt zich op de bodemtemperatuur, en niet op de drinkwatertemperatuur.

Metingen van de bodemtemperatuur geven beter inzicht in de invloed van de directe omgeving dan metingen van de drinkwatertemperatuur. Dit komt doordat 1) de watertemperatuur in de leiding mede wordt bepaald door de (niet altijd exact te bepalen) bodemtemperatuur rond de bovenstroomse leiding; 2) de watertemperatuur ook deels bepaald wordt door de hydraulische omstandigheden in de leidingen; en 3) doordat er veel variabelen zijn die de bodemtemperatuur bepalen en deze zijn vrijwel nooit constant over een grotere leidinglengte of gelijk zijn voor verschillende leidingen. Om het effect van maatregelen te bepalen zijn metingen nodig van een situatie zonder én met deze maatregelen. Het vinden van locaties die identiek zijn, behalve voor wat betreft de te onderzoeken maatregel (maar dus wel identiek in grondsoort, verhard oppervlak, schaduwconditie, en in tijdreeks van weersomstandigheden etc.) is voor de bodemtemperatuur veel eenvoudiger dan voor de drinkwatertemperatuur.

1.3 Aanpak

In Hoofdstuk 2 wordt de belangrijkste informatie over bodemtemperatuurmetingen toegelicht; wat zijn de mogelijke methoden /apparaten om de bodemtemperatuur te meten, wat zijn de factoren en bijbehorende parameters die de bodemtemperatuur kunnen beïnvloeden, wat zijn de geschatte kosten voor bodemtemperatuurmetingen, en hoe kan het resultaat van bodemtemperatuurmetingen worden gebruikt. Dit is gedaan op basis van de kennis van de invloedsfactoren op de bodemtemperatuur (en het BTM), en ervaringen met metingen.

In Hoofdstuk 3 zijn de stappen om bodemtemperatuurmetingen uit te voeren gegeven. De temperatuurmetingen zijn ingericht op basis van het doel van de metingen. Er zijn minimaal twee groepen temperatuurmetingen nodig om het effect van een maatregel op opwarming te bepalen; één groep temperatuurmetingen zonder maatregelen en één groep temperatuurmetingen met te onderzoeken maatregelen. Daarnaast, om een goede vergelijking mogelijk te maken, moeten alle temperatuurmetingen onder zoveel mogelijk dezelfde condities (d.w.z. dezelfde parameterwaardes) worden uitgevoerd,. Het inrichten van bodemtemperatuurmetingen wordt geïllustreerd met drie voorbeelden met elk een ander doel: het aantonen van het effect van diepere leidingaanleg, aantonen van het effect van gras als bodembedekking, en aantonen van het effect van een andere warmtebron op de bodemtemperatuur.

2 Methode en checklist voor bodemtemperatuurmetingen

2.1 Invloedsfactoren

In eerder onderzoek is het bodemtemperatuurmodel (BTM, het uitgebreidere BTM+) ontwikkeld, gevalideerd en toegepast. Dit heeft geleid tot inzicht in de invloedsfactoren die de bodemtemperatuur bepalen, en tevens tot inzicht in hoe de bodemtemperatuur het beste gemeten kan worden (en welke andere parameters bepaald moeten worden).

Tot 2023 is er in het bedrijfstakonderzoek een beperkt aantal bodemtemperatuurmetingen in het veld uitgevoerd. Metingen in een proeftuin hebben als voordeel dat de omgeving goed bekend is, en soms ook gemanipuleerd kan worden om zo de juiste meetomstandigheden te creëren. Een voorbeeld is de proefinstallatie aan de University of Sheffield (onderdeel van ICAIR, Integrated Civil and Infrastructure Research Centre). Deze installatie is gebruikt om warmteoverdracht tussen warmteleidingen en drinkwaterleidingen en het effect van (stromend) grondwater op de warmteoverdracht te onderzoeken. Het resultaat van de temperatuurmetingen is vervolgens gebruikt om het *BTM+* te kalibreren (Van Summeren, 2022).

Ook is gemeten in de stad, zie het bodemtemperatuuronderzoek in Rotterdam-Noord (Agudelo-Vera en Fujita, 2017), waar op 48 locaties in de zomer van 2016 de bodemtemperaturen gedurende een aantal weken continu geregistreerd zijn. Gebruik werd gemaakt van thermometers en dataloggers. De temperatuurmetingen laten zien dat bodemtemperatuur in de schaduw en onder gras het laagst was, terwijl de hoogste temperaturen werden gemeten in zon en onder tegels. De relatie tussen (ondergrondse) warmtebronnen en de bodemtemperatuur was moeilijk te leggen, als gevolg van onzekerheid over de exacte afstand tussen de meetlocatie en de warmtebron (vooral door onzekerheid over de diepte van de bron) en de intensiteit van de bron.

Tabel 1 geeft een overzicht van de factoren en de parameters die, op basis van de eerdere onderzoeken (Agudelo-Vera en Fujita, 2017; Van Esch, 2021), de bodemtemperatuur beïnvloeden. De factoren zijn verder uitgelegd in de paragrafen 2.3 en 2.4.

Tabel 1. Checklist van factoren en parameterwaarden die invloed hebben op bodemtemperatuur

Nr.	Factor	Conditie	Toelichting	Parameterwaarden in BTM
1	Bodemtype	☐ Zand ☐ Klei ☐ Veen ☐ Anders		$P_s = 1600 \text{ kg m}^{-3}$; $C_s = 1060 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ $\rho_s = 1600 \text{ kg m}^{-3}$; $C_s = 1400 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ $\rho_s = 1120 \text{ kg m}^{-3}$; $C_s = 2680 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
2	Stedelijke morfologie en type oppervlaktebedekking	☐ Peri urban ☐ Urban gras ☐ Urban ☐ Hotspot	Lage stedelijkheid, oppervlaktebedekking is 'gras'. Gemiddelde stedelijkheid, oppervlaktebedekking is 'gras'. Gemiddelde stedelijkheid, oppervlaktebedekking is 'bestraat'. Compact/hoge stedelijkheid, oppervlaktebedekking is 'bestraat'.	$Q_f = 50 \text{ W m}^{-2}$; $a_1 = 0,8$; $a_2 = 30 \text{ s}$; $a_3 = -50 \text{ W m}^{-2}$; $a = 0,1$; $\lambda_s = 1 \text{ W (m.K)}^{-1}$; $S_i = 1 \text{ mm}$ $Q_f = 100 \text{ W m}^{-2}$; $a_1 = 1$; $a_2 = 30 \text{ s}$; $a_3 = -100 \text{ W m}^{-2}$; $a = 0,2$; $\lambda_s = 1,2 \text{ W (m.K)}^{-1}$; $S_i = 1 \text{ mm}$ $Q_f = 100 \text{ W m}^{-2}$; $a_1 = 0$; $a_2 = 30 \text{ s}$; $a_3 = -100 \text{ W m}^{-2}$; $a = 0,3$; $\lambda_s = 1,2 \text{ W (m.K)}^{-1}$; $S_i = 0,48 \text{ mm}$ $Q_f = 150 \text{ W m}^{-2}$; $a_1 = 0$; $a_2 = 30 \text{ s}$; $a_3 = -120 \text{ W m}^{-2}$; $a = 0,4$; $\lambda_s = 2,6 \text{ W (m.K)}^{-1}$; $S_i = 0,48 \text{ mm}$
3	Schaduwconditie	☐ Geen schaduw ☐ Halfschaduw ☐ Volle schaduw	Locatie van de meting is de hele dag onder de zon. Locatie van de meting is de halve van de dag onder de zon. Locatie van de meting is de hele dag onder de schaduw.	Schaduwfactor = 0 Schaduwfactor = 0,5 Schaduwfactor = 1
4	Diepte van temperatuurmeting	☐ - 0,5 m ☐ - 1,0 m ☐ - 1,5 m ☐ - 2,0 m ☐ - 2,5 m ☐ andere diepte	Diepte in stappen van 50 cm, omdat het gemiddelde bodemtemperatuurverschil per 0,5 m diepte minder dan 1°C is. De dieptemetingen moet minimaal op 2,5 cm nauwkeurig zijn.	
5	Afstand tot andere warmtebron	☐ Meer dan 2,5 m ☐ Minder dan 2,5 m	Voor onderzoek naar het effect van de buitentemperatuur en omgeving, zonder warmtebron. De afstand van 2,5 m volgt uit de studie van Van Esch (2021), zie §2.4. Voor onderzoek naar het effect van (ondergrondse) warmtebronnen op de bodemtemperatuur. Er kan worden gekozen voor verschillende afstanden.	

2.2 Type sensoren

2.2.1 Inleiding

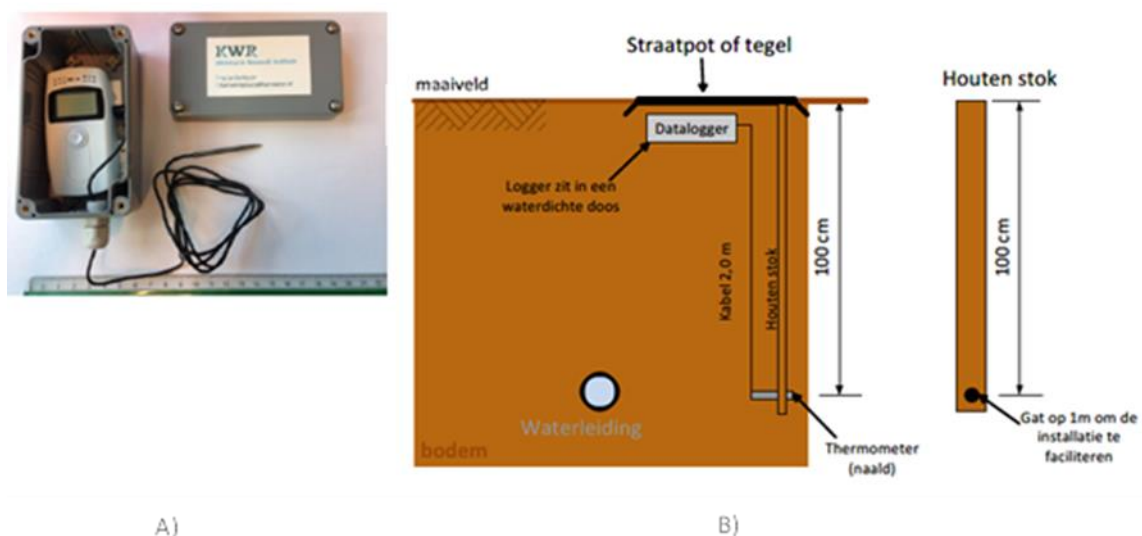
Eerdere onderzoeken zijn benut om richting te geven aan hoe de bodemtemperatuur kan worden gemeten. Voor onderzoek in de proeftuin Veghel (Brabant Water) naar hoe de overgang tussen gras en tegels doorwerkt in de ondergrond, stelt KWR voor om een ruimtelijke resolutie toe te passen van ca. 1 meter in de horizontale richting en ca. 0,25 meter in de verticale richting (Van Summeren en Beuken, 2018). Dergelijke intensieve temperatuurmetingen zijn uit te voeren met reguliere temperatuurmeters. Dit wordt echter steeds duurder en bewerklijker naarmate een hogere ruimtelijk resolutie is gewenst. Een alternatief is om metingen te realiseren met glasvezelkabels en een bijbehorend Distributed Temperature Sensing (DTS) -systeem. De kabels moeten goed gefixeerd worden, zodat altijd op dezelfde positie wordt gemeten. Er moet rekening worden gehouden met enkele duizenden euro's voor een meetvoorziening met glasvezelkabels (Van Summeren en Beuken, 2018). De mogelijke methoden voor het meten van bodemtemperatuur, op basis van de eerdere ervaringen, zijn als volgt:

2.2.2 Puntsensoren

De puntsensoren worden ingegraven. De sensoren van het standaardtype, dat bij het KNMI in gebruik is, zijn Pt-500 opnemers met een RVS omhulling. De Pt-500 is een weerstandthermometer (oftewel: *Resistance temperature detector (RTD)*). Het protocol voor de plaatsing van de sensoren, volgens Mazee en Jilderda (2005), is opgenomen in Bijlage 1. Figuur 1 laat een voorbeeld zien van een meetopstelling met puntsensoren (Pt-100) in de bodem tijdens bodemtemperatuur-onderzoek in Rotterdam-Noord (Agudelo-Vera en Fujita, 2017).

De voordelen van dit type sensoren zijn dat ze eenvoudig kunnen worden geïnstalleerd en vervangen, dat ze geschikt zijn voor metingen op afstand en dat ze een lange levensduur en een stabiele werking hebben. De nadelen zijn dat ze relatief prijzig zijn, dat ze veel onderhoud nodig hebben, en dat er relatief vaak problemen met zelfverhitting zijn (electricaldec, 2021).

Een Pt-100 (standaard A) heeft een nauwkeurigheid van $\pm 0,19$ °C (en een standaard B 0,40 °C), een Pt-1000 heeft een 10 maal zo hoge nauwkeurigheid. Voor een nauwkeurigheid van $< 0,1$ °C heeft KNMI een Pt-500 gekozen. Wanneer metingen gericht zijn op invloedsfactoren die slechts een geringe invloed hebben (op de locatie en seizoen van de meting), dan is een Pt-100 mogelijk niet nauwkeurig genoeg. Het is aan te raden om op basis van een modelrun de verwachte temperaturen te bepalen en de juiste sensor te selecteren. Wanneer het verschil tussen twee sensoren van belang is, houd er dan rekening mee dat de fouten in de metingen min of meer bij elkaar opgeteld worden.

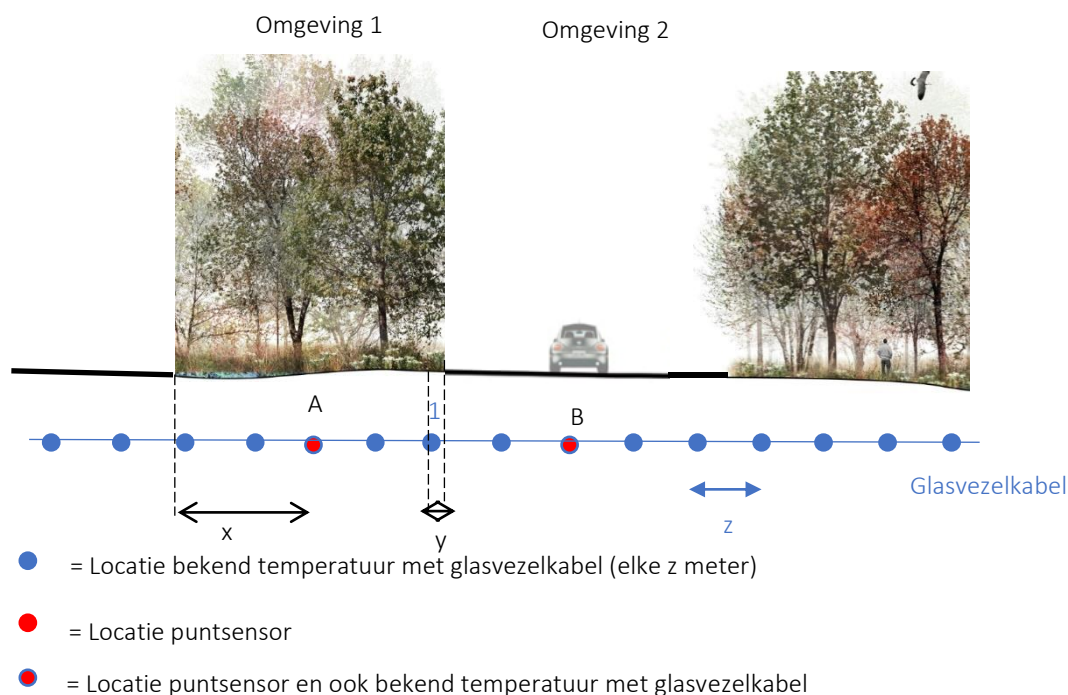


Figuur 1. A) Detail van de thermometer en datalogger. De datalogger zit in een waterdichte doos van 11.5 cm x 6.3 cm x 5.5 cm. En B) Schematische weergave van de opstelling voor de bodemtemperatuurmetingen (Agudelo-Vera en Fujita, 2017).

2.2.3 Glasvezelskabels (trajectmeting)

Een alternatieve methode om de temperatuur nauwkeurig en efficiënt te meten is met glasvezelskabels en een DTS-machine (Distributed Temperature Sensing). Een glasvezelskabel is een langgestrekte thermometer. De DTS-machine bepaalt de temperatuur op een plek op basis van de verhouding van de intensiteit van inkomende en doorgelaten signaalfrequenties (Stokes/anti-Stokes intensiteit). De resolutie waarop de temperatuur bekend is, is verschillend, afhankelijk van het type DTS-machine. De resolutie van Sentinel DTS-LR is bijvoorbeeld 1 meter en de resolutie van HALO-DTS is 2 meter (Rioned, 2010). De DTS-machine stuurt een laserstraal door de glasvezelskabels en uit de weerkaatsing wordt de temperatuur langs de kabel bepaald. De methode voor de bodemtemperatuurmetingen met glasvezelskabel en DTS-machine is in Bijlage 2 uitgelegd (Nieuwenhuizen, 2011).

De voordelen van glasvezelskabels zijn o.a. dat ze kunnen worden gebruikt nabij elektromagnetische straling en dat ze een snelle reactietijd hebben van ca. 2 seconden (RF wireless world, 2022). De nadelen van glasvezelskabels zijn dat ze relatief complex zijn om te plaatsen en te gebruiken; de gebruikers hebben daarom training nodig (RF wireless world, 2022), en verplaatsen kost veel tijd, en het is een relatief nieuwe techniek en daarom is er anno 2023 nog niet veel literatuur beschikbaar over bodemtemperatuurmetingen met glasvezelskabels.



Figuur 2. Voorbeeld opstelling voor bodemtemperatuurmetingen met puntsensoren of met glasvezel: Temperatuur voor omgeving 1 (onder gras en volle schaduw) is in punt A gemeten en bodemtemperatuur in omgeving 2 (onder verhard oppervlak zonder schaduw) is in punt B gemeten.

Om de bodemtemperatuur voor omgeving 1 (onder gras en volle schaduw) en omgeving 2 (onder verhard oppervlak zonder schaduw) te meten, zijn er twee puntsensoren nodig, in punt A en punt B. Als de bodemtemperatuur wordt gemeten met een glasvezelskabel, dan is de temperatuur bekend op elke één of twee meter afstand (elk blauwe punt in Figuur 2), afhankelijk van het type van DTS-machine.

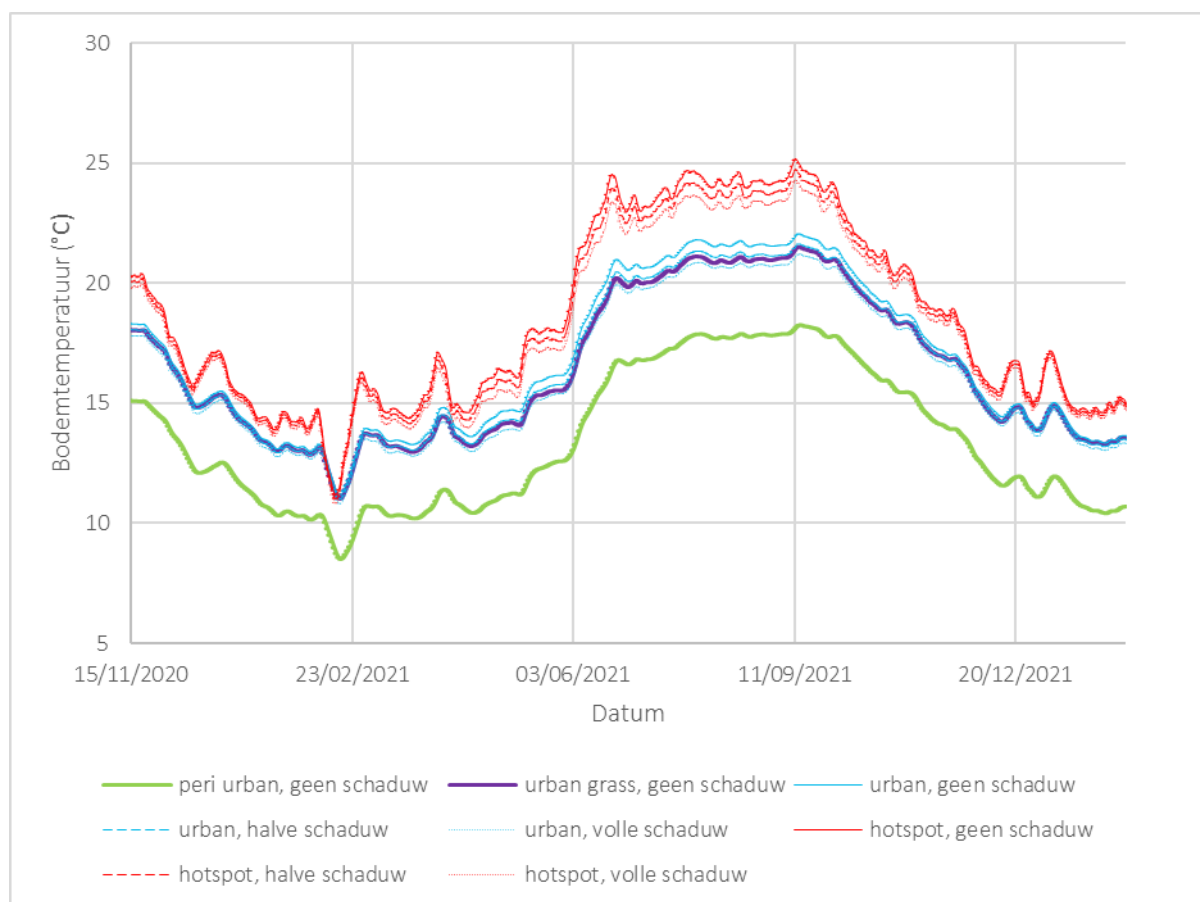
De locatie waarop de temperatuur wordt gemeten is belangrijk. Wanneer een kort traject een variatie aan omgevingstypen heeft (type verhard oppervlaktebedekking, schaduwconditie, bodemtype, afstand tot

warmtebronnen, etc.), kan dit effect hebben op de bodemtemperatuur, en dit betekent dat wellicht meer sensoren per lengte nodig zijn om het effect van de overgang van de ene naar de andere omgeving te meten. Voor het meten van het effect van een omgevingstype, zonder de invloed van de naastliggende omgevingstypen, moet er voldoende afstand zijn tussen de gemeten locatie en het andere omgevingstype. Bijvoorbeeld, de gemeten bodemtemperatuur in punt A in Figuur 1 is meer representatief voor het meten van bodemtemperatuur van omgeving 1 dan de gemeten temperatuur in punt 1, want de afstand van punt A naar omgeving 2 is groter dan de afstand van punt 1 naar omgeving 2 ($x > y$). De temperatuur in punt 1 wordt namelijk mogelijk beïnvloed door de temperatuur in omgeving 2.

2.3 Wanneer meten

Het effect van de omgeving (type oppervlaktebedekking, schaduwconditie) op de bodemtemperatuur is het duidelijkst zichtbaar tijdens de hoogste buitentemperatuur. Figuur 3 toont de bodemtemperaturen, benaderd met het BTM, voor verschillende scenario's, op basis van data uit het KNMI-station Gilze-Rijen. De hoogste buitentemperatuur is opgetreden in de zomermaanden tussen 1 juni – 1 Oktober. Het wordt daarom aanbevolen om de bodemtemperatuur in deze periode te meten.

Een meetperiode van zeven dagen is voldoende om goed inzicht te krijgen. Nadat de temperatuursensor is geplaatst, moet de omgeving naar de oorspronkelijke conditie worden teruggebracht. Dit betekent dat voor metingen onder gras moet worden gewacht totdat het gras weer is teruggeplaatst.



Figuur 3. Bodemtemperaturen benaderd met het bodemtemperatuurmodel voor verschillende scenario's stedelijke omgeving zoals aangegeven in de legenda.

2.4 Waar meten

2.4.1 Bodemtype, stedelijke morfologie en type oppervlaktebedekking

Agudelo-Vera (2018) laat zien dat het bodemtype invloed heeft op de bodemtemperatuur: de bodem warmt minder snel op met klei i.p.v. zand, en dat onder tegels de temperaturen ca. 2°C hoger waren dan onder gras. Ook liet zij zien dat er een effect is van stedelijkheid.

De warmteoverdracht door de bodem wordt bepaald door verschillende eigenschappen van de bodem, die in allerlei combinaties voor kunnen komen. Alleen vaststellen dat het bodemtype “zand” of “klei” is, is niet voldoende. Middels bodemmetingen zijn dichtheid (ρ_s , kg m⁻³), de warmtegeleidingscoëfficiënt (λ_s , W m⁻¹ K⁻¹), en het maximum watergehalte (Θ_s , m³ m⁻³) te bepalen. Deze parameters bepalen vervolgens de specifieke warmtecapaciteit (C_s) en de warmtevereffeningscoëfficiënt (α , m² s⁻¹) van de bodem.

Stedelijke morfologie (in het Engels: *Urban morphology*) en type oppervlaktebedekking hebben invloed op albedo (a), maximale opslag van regen (S_i , mm), maximale oppervlaktegeleiding (G_1 , mm s⁻¹), ruwheidlengte (Z_0 , m), fluxweerstand (R_g , s m⁻¹), HTL, warmteopslagcoëfficiënten a_1 (-), a_2 (s), a_3 (W m⁻²) en antropogene warmte-emissie (Q_f , W m⁻²).

Het BTM berekent de bodemtemperatuur voor alle mogelijke bodemtypes. In het BTM wordt ook gekeken naar de stedelijke morfologie en het type bestrating, waarbij de verdeling als volgt is:

- Peri urban
Peri Urban zijn gebieden met lage stedelijkheid en met oppervlaktebedekking gras. Een rastervierkant van 500 bij 500 meter wordt, volgens Central Bureau voor de Statistiek Nederlands (CBS, 2022), tot landelijk ('Peri-urban') gebied gerekend als de omgevingsadressendichtheid (oad) van het betrokken rastervierkant minder dan 1000 adressen per km² is.
- Urban gras
Urban gras is het gemiddeld stedelijk gebied (met normale woningen), met oppervlakbedekking gras. Een rastervierkant van 500 bij 500 meter wordt volgens het CBS (2022) tot stedelijk ('urban') gebied gerekend als de oad van het betrokken rastervierkant 1500 of meer adressen per km² is.
- Urban
Urban is gemiddeld stedelijk gebied (gebieden met normale woningen), met oppervlakbedekking bestrating en een oad van 1500 of meer adressen per km².
- Hotspot
Hotspots zijn de gebieden met compacte urbaniteit en industriegebieden met veel bestrating met veel hoge gebouwen. De oppervlaktebedekking is bestrating. Er is geen duidelijke definitie van 'hotspot' uit eerder onderzoek. Het CBS heeft zeer sterk stedelijk gebied gedefinieerd als een gebied met een gemiddelde oad van 2500 of meer adressen per km².

Er wordt aanbevolen om bovenstaande vier combinaties van stedelijke morfologie en type bestrating te gebruiken, want deze parameterwaarden (Q_f , a_1 , a_2 , a_3 , α , λ_s , S_i , gebruikt in BTM) zijn al gevalideerd (Blokker en Pieterse-Quirijns, 2013; Agudelo-Vera et al., 2015; Agudelo-Vera, Blokker et al., 2017). Ook andere combinaties van parameters zijn mogelijk. Bijvoorbeeld door de stedelijke morfologie verder te verdelen naar 10 Local Climate Zone (LCZ) zoals voorgesteld door Steward en Oke (2012), of door de acht combinaties van bodemtype, stedelijkheid en type oppervlaktebedekking, volgens Van Esch (2021) te gebruiken. Echter deze parameters zijn nog niet gevalideerd in het BTM.

2.4.2 Schaduwconditie

Het onderzoek van Agudelo-Vera (2018), laat zien dat bodemtemperatuur op 1 meter diepte, in de zon ca. 2°C warmer waren dan bodemtemperatuur op 1 meter diepte in de schaduw. Dit komt doordat de schaduwconditie een

effect heeft op de globale straling die het oppervlak bereikt (R_{global}). Bij volle schaduw is de kortegolfstraling die het oppervlak bereikt (R_{global}) nul. R_{global} wordt berekend met formule (2.1)

$$R_{\text{global}} = Q \times (1 - \text{Schaduw}) \quad (2.1)$$

met Q de globale straling op basis van KNMI gegevens, (J cm^{-2})

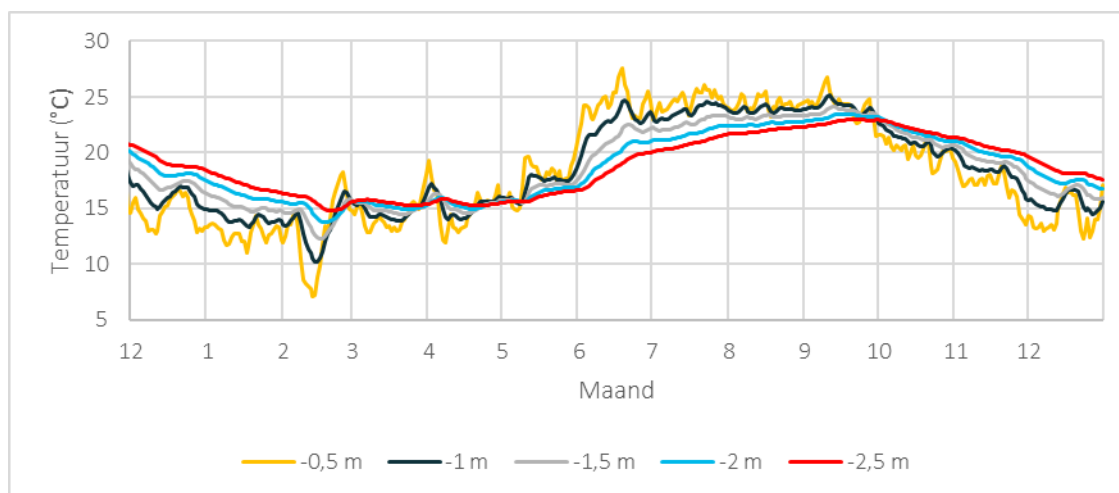
Schaduw:

Geen schaduw	= 0
Halfschaduw	= 0.5
Volle schaduw	= 1

De R_{global} die het oppervlak bereikt heeft vervolgens effect op netto straling (R_n). R_n heeft vervolgens effect op de bodemtemperatuur.

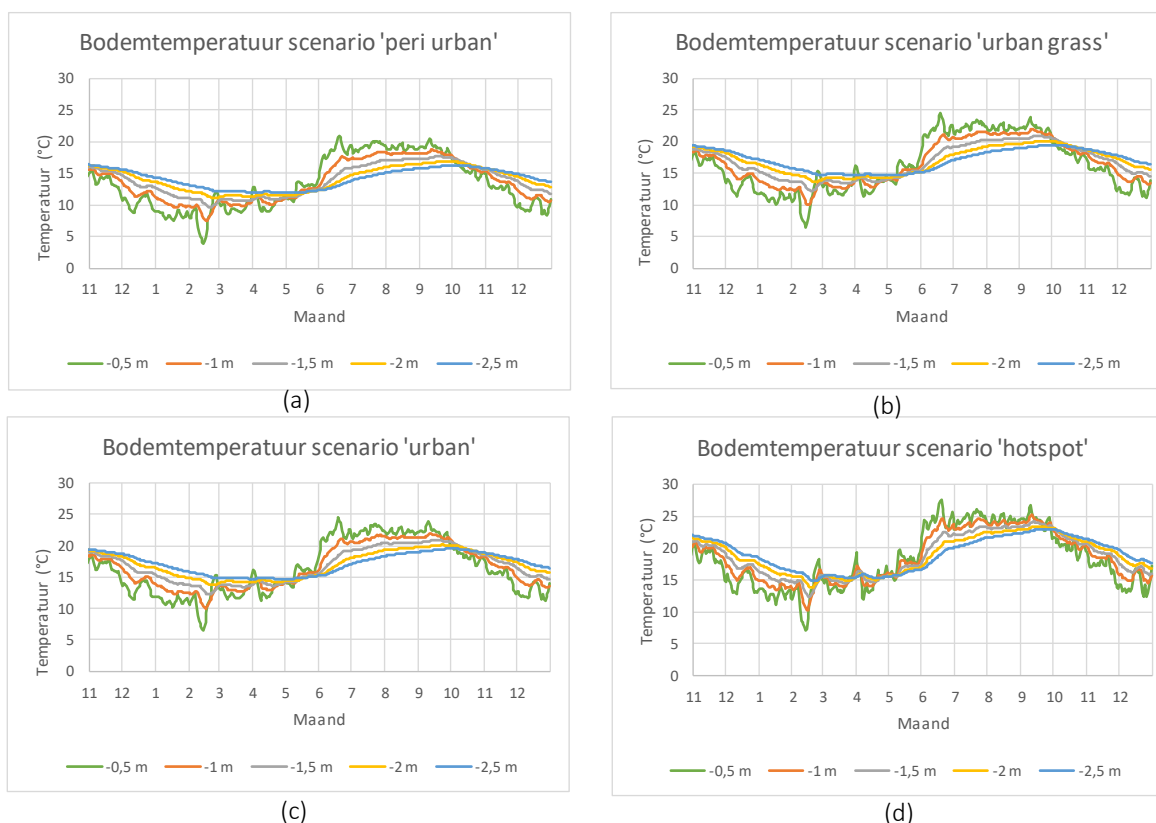
2.4.3 Diepte

Diepteligging heeft effect op de bodemtemperatuur. Figuur 4 laat de bodemtemperatuurvoorspelling zien voor scenario 'Hotspot', zonder schaduw, volgens het BTM. Figuur 4 toont dat de temperatuur minder grillig verloopt op grotere diepte. We zien dat de hoogste temperatuur tijdens de zomermaanden en de laagste temperatuur tijdens de wintermaanden in de ondiepe bodem optreden. Figuur 4 toont ook dat het gemiddelde verschil in bodemtemperatuur per 0,5 m diepte beperkt is, minder dan 1°C . Gezien het beperkte temperatuurverschil wordt aanbevolen om de bodemtemperatuur te meten per 0,5 m diepte. Het BTM berekent de temperatuur tussen maaiveld en 5,5 m diepte in stapjes van 5 cm. Aangeraden wordt om de diepte waarop gemeten wordt vast te stellen met een nauwkeurigheid van de helft daarvan, dus tenminste 2,5 cm.



Figuur 4. Bodemtemperatuurvoorspelling o.b.v. data weerstation Gilze-Rijen 2021. Geel is bodemtemperatuurvoorspelling op 0,5 m diepte, zwart op 1 m diepte, grijs op 1,5 m diepte, blauw op 2 m diepte, en , rood op 2,5 m diepte.

Figuur 5 laat het effect zien van de buitentemperatuur op de bodemtemperatuur op verschillende dieptes voor 4 scenario's; peri urban, urban grass, urban, en hotspot, tijdens de zomer van 2020. De effecten van diepte op de bodemtemperatuur voor de 4 scenario's zijn min of meer vergelijkbaar, circa 3°C temperatuurverschil tussen bodemdieptes van 0,5 m en 1 m tijdens de warmste dag van het jaar. Scenario 'peri-urban' (lage stedelijkheid, type oppervlaktebedekking gras) heeft de laagste bodemtemperatuur. Scenario 'hotspot' (hoge stedelijkheid, type oppervlaktebedekking bestrating) heeft de hoogste bodemtemperatuur. Het verschil tussen scenario 'peri-urban' en 'hotspot' tijdens de warmste dag van het jaar is circa 7°C voor alle bodemdieptes (diepte 0.5 m, 1 m, 1.5m, 2 m, en 2.5 m).



Figuur 5. Gesimuleerde bodemtemperatuur scenario peri-urban (a), urban grass (b), urban (c), en hotspot (d) o.b.v. data weerstation Gilze-Rijen 2021.

2.4.4 Afstand tot andere warmtebronnen

De studie van Van Esch (2021) laat zien dat een secundaire warmteleiding met een temperatuur van 70 °C, op 2,5 meter afstand van de drinkwaterleiding, een bodemtemperatuurverhoging van 0,6 °C veroorzaakt (van 23,8 °C naar 24,4 °C). Een kleinere afstand tussen warmteleiding en drinkwaterleiding zal een grotere temperatuurverhoging veroorzaken: 3,1 °C temperatuurverhoging voor een afstand van 0,25 m, 2,4 °C voor een afstand van 0,5 m, en 1,4 °C voor een afstand van 1 m. Het wordt daarom aanbevolen om de afstand tot andere warmtebronnen, afhankelijk van het doel van de temperatuurmetingen, als volgt te bepalen:

- Voor onderzoek naar het effect van buitentemperatuur en omgeving op de drinkwatertemperatuur, met beperkte invloed van andere warmtebronnen (warmtenet enz.) moet de afstand tussen waterleiding en warmtebron meer dan 2,5 m bedragen.
- Voor onderzoek naar het effect van andere warmtebronnen op de bodemtemperatuur moet de bodemtemperatuur op meerdere afstanden van andere warmtebronnen worden gemeten, van 0,25 m afstand tot minder dan 2,5 m afstand.

2.5 Randvoorwaarden en checklist voor locaties van bodemtemperatuurmetingen

De randvoorwaarden voor de bodemtemperatuurmetingen, op basis van de informatie in vorige hoofdstukken, zijn als volgt:

- De bodemtemperatuurmetingen worden uitgevoerd in de zomermaanden (tussen 1 juni – 1 Oktober), dat is de periode waarbij het effect van de omgeving op bodemtemperatuur het meest zichtbaar is.

- De duur van de temperatuurmetingen is minimaal één week vanaf het moment dat de dichtheid en de vochtigheid van de grond terug is naar de oorspronkelijke situatie. Voor locatiemetingen met gras is de looptijd van de temperatuurmetingen één week nadat het gras terug is gegroeid.
- Voor een vergelijkende analyse m.b.t. mitigerende effecten zijn minimaal twee groepen temperatuurmetingen nodig (met en zonder maatregelen), waarbij minimaal 10 temperatuurmetingen nodig zijn voor elke groep. Er kan altijd worden gekozen voor een hoger aantal metingen, echter hoe meer metingen hoe hoger de kosten. Alle bodemtemperatuurmetingen moeten vergelijkbare omstandigheden hebben (vergelijkbare periode van metingen, bodemtype, stedelijke morfologie, type oppervlaktebedekking, schaduwconditie, afstand tot andere warmtebronnen), en alleen verschillen in de maatregelen die onderzocht gaan worden.

2.6 Kostenindicatie

Tabel 2 geeft een kostenindicatie voor bodemtemperatuurmetingen.

Tabel 2. Kostenindicatie voor bodemtemperatuurmetingen.

Actie	Toelichting	Kostenschatting (€)	Kostenschatting 2022# (€)
Metingen	Sensoren		
	1. Met glasvezelskabel en DTS machine		
	Glasvezel 2,5 m	12	16
	Sentinel DTS-LR* precisie < 0,01 °C, vermogen 120 W, gewicht 21 kg	45000	59680
	Halo DTS* precisie < 0,01 °C, vermogen 40-50 W, gewicht 9 kg	25000	33156
	DTS huurkosten****	2500 – 3500 / week	€ 2500 – 3500 / week
	2. Met puntsensoren		
	PT-500** PT-100 zal iets goedkoper zijn, PT-1000 iets duurder	395	€ 395
	Kosten datatransmissie	Nader te bepalen	
	Kosten dataopslag	Nader te bepalen	
	Controle en analyse van data	Nader te bepalen	
Aanschaf (voor glasvezelkabel en DTS machine) ***	Zeecontainer 10 FT 8/6 of kleiner	4000	4843
	Veldkast voor elektra-aansluiting+ elektrameter	1000	1210
	Elektra-aansluiting 3 x 25 Ampère	650	787
	2 x aardplus	700	848
	Luchtdroger ter voorkoming van condensvorming in container	300	363
	kachel t.b.v vorstbescherming	100	121
Installatie***	Boring, monteur en grondwerker per dag, ca. ½ dag nodig	1500	1816

Actie	Toelichting	Kostenschatting (€)	Kostenschatting 2022# (€)
Omgeving***	Locatie zoeken en overleg met gemeente/grondeigenaar	40 uur	2000
	Vergunningen	diverse	300
	Div. schadevergoeding gras of landbouwgrond		100
			2421
			363
			121

Info:

*bron: Rioned, 2010

** bron: Techniekwebshop, 2022

***bron: Blokker et al, 2016

**** bron: ervaring Evides

Berekend met consumentenprijsindex (CPI) op basis van data uit CBS in Bijlage 3

Aanschaf van sensoren is eenmalig; de container, veldkast en sensoren zijn verplaatsbaar. Twee containers, twee veldkasten en twee sensoren zijn mogelijk nodig om de situatie met maatregelen en de situatie zonder maatregelen tegelijkertijd te kunnen meten. Wanneer de locaties met en zonder maatregelen dichtbij elkaar zijn, is slechts één container en veldkast nodig voor de temperatuurmetingen.

2.7 Interpretatie van bodemtemperatuurmetingen en vergelijking met het BTM

Met het resultaat van bodemtemperatuurmetingen kan een temperatuurverschil tussen twee of meer parameters worden gekwantificeerd. De bodemtemperatuurmetingen kunnen ook worden vergeleken met de temperatuurvoorspelling volgens *BTM*.

Om de nauwkeurigheid van de voorspelling van het BTM te toetsen, wordt de gemiddelde absolute fout (Mean Absolute Error, MAE) berekend tussen de gemeten temperatuur en de voorspelling volgens het BTM. Hoe kleiner de MAE waarde is, hoe hoger de nauwkeurigheid van de voorspelling.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|}{n} \quad (2.1)$$

Waar:

y_i = Gemeten temperatuur op tijdstip i

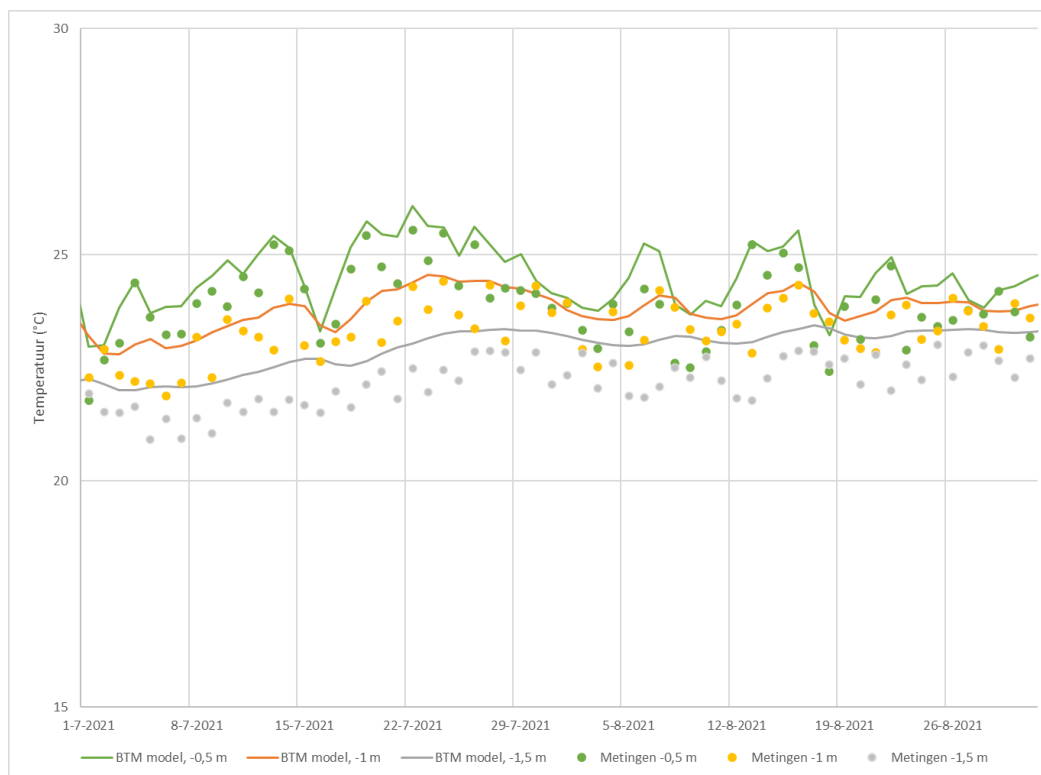
x_i = Temperatuurvoorspelling op tijdstip i

n = aantal temperatuurmetingen

Als de MAE klein is (er is geen duidelijke regel, maar bijvoorbeeld < 2 °C), dan kunnen MAE en het BTM gebruikt worden om de bodemtemperatuur op andere plekken en andere dieptes te voorspellen voor een vergelijkbare bodemsoort. Als de MAE groot is, dan moet worden onderzocht wat de reden is. Het kan zijn dat de omgeving waarop de bodemtemperatuur wordt gemeten andere parameters heeft dan de parameters die worden gebruikt in het BTM in Tabel 1. Met name bodem- en stedelijke morfologieparameters kunnen verschillen per locatie. De bodemtemperatuurmetingen kunnen dan worden gebruikt om het BTM te kalibreren voor de specifieke meetsituatie (d.w.z. aanpassen van bodemspecifieke parameters zodat de MAE klein wordt) of indien daar aanleiding voor is om de aannames van het BTM verder aan te scherpen (bijv. het toevoegen van een ondergrondse warmtebron die nog niet in het model was meegenomen, maar er wel blijkt te zijn).

Figuur 6 laat een voorbeeld zien van de vergelijking tussen de bodemtemperatuurvoorspelling volgens het BTM en de (fictieve) gemeten temperatuur op drie verschillende dieptes (-0,5m, -1 m en -1,5m). De MAE tussen de temperatuurvoorspelling en de gemeten temperatuur op -0,5 m, -1 m en -1,5 m diepte zijn relatief klein, 0,65, 0,53 en 0,78 °C respectievelijk. Dit betekent dat het BTM kan worden gebruikt om de bodemtemperatuur op andere

dieptes of andere locaties onder vergelijkbare omstandigheden te voorspellen. Op basis van de metingen kunnen de drinkwaterbedrijven en de gemeenten besluiten om de leidingen wel of niet dieper te gaan leggen.



Figuur 6. Voorbeeld van vergelijking tussen gemeten temperatuur en de voorspelling volgens het bodemtemperatuur model (synthetische data, geen echte metingen). De MAE tussen de temperatuurvoorspelling en de gemeten temperatuur op - 0,5 m, -1 m en -1,5 m diepte zijn 0,65, 0,53 en 0,78 °C respectievelijk.

3 Stappen en voorbeelden voor bodemtemperatuurmetingen

3.1 Stappen tot een concreet plan voor bodemtemperatuurmetingen

Om tot een concreet plan te komen voor de bodemtemperatuurmetingen, zijn de volgende stappen nodig:

1. Bepaal het doel van het onderzoek en welke parameters worden gemeten (zie checklist in Tabel 1).
2. Bepaal het aantal en de locaties van de bodemtemperatuurmetingen op basis van de gekozen parameters.
3. Bepaal welke methode wordt gebruikt om bodemtemperatuur te meten (met puntsensoren of met glasvezelkabels).
4. Indien nodig, maak een bouwtekening of situatietekening.
5. Installeer en test de meetopstelling.

3.2 Bodemtemperatuurmeting, voorbeeld I

1. Bepaal het doel van het onderzoek en welke parameters worden gemeten

Het doel van het onderzoek is om aan te tonen wat het effect is van dieper leggen van leidingen op de temperatuur. De temperatuur wordt bijvoorbeeld op 3 verschillende dieptes gemeten:

- Diepte A = -0,5 m
- Diepte B = -1 m
- Diepte C = - 1,5 m

Andere parameters die worden gebruikt in de bodemtemperatuurmetingen zijn:

- Periode: Zomermaanden tussen 1 juni en 1 september
- Stedelijke morfologie: urban
- Schaduwconditie: geen schaduw
- Type oppervlaktebedekking: verhard oppervlak
- Bodemtype: zand

Behalve de diepte, moeten alle bodemtemperatuurmetingen vergelijkbare parameters hebben.

2. Bepaal het aantal en de locaties van de bodemtemperatuurmetingen op basis van de gekozen parameters
Aantal bodemtemperatuurmetingen is (minimaal) 10 temperatuurmetingen per diepte
3. Bepaal welke methode wordt gebruikt om de bodemtemperatuur te meten
Puntsensoren zijn gebruikt om de *bodemtemperatuur* te meten.

Figuur 7 laat een voorbeeld zien van bodemtemperatuurmetingen op verschillende dieptes op Locatie X.



Figuur 7. Voorbeeld bodemtemperatuurmetingen op verschillende diepte in Locatie X.

3.3 Bodemtemperatuurmeting, voorbeeld II

1. Bepaal het doel van het onderzoek en welke parameters worden gemeten

Het doel van het onderzoek is aan de Gemeente te laten zien in hoeverre drinkwater onder gras koeler blijft dan onder asfalt als mogelijke onderbouwing voor een aanbeveling om meer leidingen onder gras te plaatsen. Er wordt gemeten onder 2 verschillende oppervlaktetypes:

- Punt A, Type oppervlak = verhard (asfalt)
- Punt B, Type oppervlak = gras

Andere parameters die worden gebruikt in de bodemtemperatuurmetingen zijn als volgt:

- Periode: Zomermaanden tussen 1 juni en 1 september
- Stedelijke morfologie: urban
- Schaduw conditie: geen schaduw
- Diepte = - 1 m
- Bodemtype: zand

Behalve het type oppervlaktebedekking moeten alle bodemtemperatuurmetingen vergelijkbare parameters hebben.

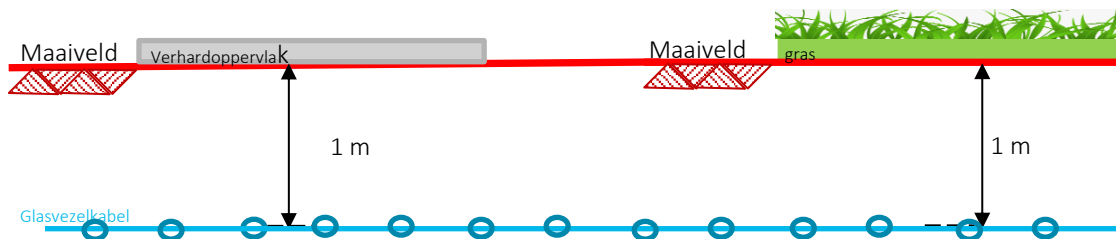
2. Bepaal het aantal en de locaties van de bodemtemperatuurmetingen op basis van de gekozen parameters

Aantal bodemtemperatuurmetingen is (minimaal) 10 temperatuurmetingen per type oppervlaktebedekking.

3. Bepaal welke methode wordt gebruikt om bodemtemperatuur te meten

Glasvezelkabel met DTS-machine wordt gebruikt om bodemtemperatuur te meten. Hierdoor kunnen de drinkwaterbedrijven het verschil in temperatuur zien tussen verschillende dikte van gras. De drinkwaterbedrijven kunnen ook het effect van de overgang van oppervlakte op bodemtemperatuur meten.

Figuur 8 laat het voorbeeld zien van bodemtemperatuur metingen onder verhard oppervlak en onder gras.



Figuur 8. Voorbeeld bodemtemperatuurmetingen onder verhard oppervlak en onder gras.

3.4 Bodemtemperatuurmeting, voorbeeld III

1. *Bepaal het doel van het onderzoek en welke parameters worden gemeten*

Het doel van het onderzoek is om aan te tonen wat het effect is van een andere warmtebron, zoals warmtenet, voor de bodemtemperatuur. Er wordt gemeten onder 3 verschillende afstanden:

- Punt A = 0,5 m vanuit warmtenet
- Punt B = 1 m vanuit warmtenet
- Punt C = 1,5 m vanuit warmtenet

2. *Bepaal andere parameters die worden gebruikt in de bodemtemperatuurmetingen*

Andere parameters die worden gebruikt in de bodemtemperatuurmetingen zijn:

- Periode: Zomermaanden tussen 1 juni – 1 September
- Stedelijke morfologie: urban
- Schaduwconditie: geen schaduw
- Diepte = - 1 m
- Bodemtype: zand

Behalve het type oppervlaktebedekking moeten alle bodemtemperatuurmetingen vergelijkbare parameters hebben.

3. *Bepaal het aantal en de locaties van de bodemtemperatuurmetingen op basis van de gekozen parameters*

Aantal bodemtemperatuurmetingen is (minimaal) 10 temperatuurmetingen per afstand tot de warmtebron.

4. *Bepaal welke methode wordt gebruikt om grondwatertemperatuur te meten*

Glasvezelkabel met DTS-machine wordt gebruikt om grondwatertemperatuur te meten. Hiermee kunnen de drinkwaterbedrijven eenvoudig het effect van warmtebron op verschillende afstanden meten. Echter, er moet gekozen worden voor een DTS-machine met een resolutie van 0,5 meter of minder. Indien dit niet beschikbaar is, dan kan worden gekozen voor puntsensoren.

Figuur 9 laat een voorbeeld zien van bodemtemperatuurmetingen op verschillende afstanden tot een warmtenet op Locatie X.



Figuur 9. Voorbeeld bodemtemperatuurmetingen op verschillende afstanden vanuit Warmtenet.

Literatuur

Agudelo-Vera, C., Blokker, E. J. M., Van der Wielen, P., Raterman, B. (2015). "Drinking water temperature in future urban areas". KWR BTO 2015.012, Nieuwegein

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

Agudelo-Vera, C. M., Fujita, C. (2017). Hotspots in het leidingnet. BTO 2017.023, Nieuwegein

Agudelo-Vera, C. M. (2018). Aanpak om de hotspots in het leidingnet terug te dringen. BTO 2018.024, Nieuwegein

CBS. (2022). Stedelijk gebied. <https://www.cbs.nl/nl-nl/onze-diensten/methoden/begrippen/stedelijk-gebied>

Blokker, E. J. M. and I. Pieterse-Quirijns. (2013). "Modeling temperature in the drinking water distribution system." AWWA 105: E19-E28. <https://awwa.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.5942/jawwa.2013.105.0011>

Blokker, E. J. M., Schaap, P., van der Leer, R., van Alena, B. en van Ewijk, R. (2016). "Voordelen continue metingen in transport en distributie (notitie)." KWR 2016.074, KWR, Nieuwegein

Eletricaldec. (2021). "Resistance Thermometer or RTD - Construction, Working & Advantages". <https://www.electricaldeck.com/2021/06/resistance-thermometer-or-rtd-construction-working-and-advantages.html>

Mazee, A. N., Jilderda, R. (2005) Verbetering bodemtemperatuurmetingen, Improvement of soil temperature measurements. <https://cdn.knmi.nl/knmi/pdf/bibliotheek/knmipubTR/TR280.pdf>

Nieuwenhuizen, M. (2011). "Meten met glasvezelkabels". Available online: <https://www.nemokennislink.nl/publicaties/meten-met-glasvezelkabels/>

RF wireless world. (2022). Fiber Optic Temperature Sensor structure, working, advantages, disadvantages. <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Fiber-Optic-Temperature-Sensor.html>

Rioned. (2010). Temperatuurmeting met glasvezelkabel (DTS) in een leiding, methode en materialen. <https://www.riool.net/temperatuurmeting-met-glasvezelkabel-dts-in-een-leiding-methode-en-materialen>

Stewart, I. D., Oke, T. R. (2012). "Local climate zones for urban temperature studies." Bulletin of the American Meteorological Society 93(12): 1879-1900. Available online: https://www.researchgate.net/publication/258607564_Local_Climate_Zones_for_Urban_Temperature_Studies

Techniekwebshop. (2022). <https://www.techniekwebshop.nl/itron-temperatuursensoren-pt500-tdf-27-dn15-25-l-5m-temperatuursensor-tdf-27-5m-pt500-dn15-25-toebehoren-onderdelen-voor-vloeistofstromingsmeter-verkoop-per-1-x-1-stuk-73393-8717044733932-1450194-1065104-type-toebehoren-onderdelen.html?msclkid=0ab62fd1620315e38efe4c4aa01f8b80>

Van Summeren, J. R. G., Beuken, R. H. S. (2018). Wetenschappelijke onderbouwing ontwerp proeftuin Veghel voor beproeving lekdetectie en warmte water. BTO 2018.080, Nieuwegein

Van Summeren, J. R. G. (2022). Validation of STM+ model with heat transport measurements of ICAIR test facility. KWR 2022.120, Nieuwegein

Van Esch, J. (2021). "Engine BTM+ model development and validation and Expert tool computations". Deltares.

Bijlage 1 Protocol plaatsing bodemtemperatuursensoren

Het protocol voor het plaatsing van de bodemtemperatuur sensoren volgens Mazee en Jilderdaa (2005)* is als volgt:

- De plaats waar de kuil gegraven wordt staat op tekening en moet van tevoren door Stations Beheer gemarkeerd worden met piketpaaltjes.
- De plaats waar de sensoren in de grond gestoken zullen worden moet vlak zijn en moet eventueel met wat extra aarde geëgaliseerd worden.
- De kuil wordt volgens tekening gegraven
- De toplaag van 10 cm wordt verwijderd en apart gelegd om later inclusief gras, weer als toplaag aangebracht te worden.
- De aarde wordt verwijderd in ca. 4 lagen van ca. 25 cm verwijderd. De lagen worden apart gelegd om later in de zelfde volgorde terug gestort te kunnen worden.
- De verticale wand, waar de sensoren in geplaatst worden wordt glad gemaakt, zodat het bodemprofiel door Stations Beheer opgenomen kan worden.
- De mal wordt op maaiveldhoogte geplaatst. Met behulp van een waterpas of schietlood wordt de mal verticaal geplaatst.
- Voor het bepalen van maaiveldhoogte wordt het gras zo kort mogelijk geknipt en worden oneffenheden in de bodem plat gedrukt of op een andere manier verwijderd.
- De gaten voor de sensoren worden met de bijbehorende priem voorgestoken.
- De mal wordt verwijderd.
- De geleide staf wordt op de bodem van de kuil geplaatst, er wordt een laagje aarde van ca. 5 cm op gelegd
- De sensoren worden in de daarvoor bestemde gaten gestoken en maximaal doorgedrukt.
- De kabels van de sensoren worden met wurgbandjes aan de geleide staf vastgemaakt. Het overblijvende deel van de wurgbandjes moet van de sensoren af wijzen, zodat deze als indicatie kunnen dienen bij het opnieuw graven van de kuil als de sensoren vervangen dienen te worden. Op de plaats waar de kabels de grond verlaten wordt een flexibele bescherming aangebracht die tot ca. 10 cm boven grond doorloopt.
- Drinkwaterbedrijf Controleert of alle sensoren naar behoren functioneren.
- De kuil wordt dicht gemaakt. Laag voor laag en in dezelfde volgorde, wordt de aarde terug gestort. Iedere laag wordt stevig aangedrukt c.q. voorzichtig aangestampt. Indien er aarde overblijft, dan wordt dit boven op de kuil gelegd, zodat als e.e.a. inklinkt het boven oppervlak gelijk wordt. De toplaag met gras wordt weer aangebracht.
- Controleer nogmaals of alle sensoren naar behoren functioneren.
- Na enige weken wordt gecontroleerd of het gras is aangeslagen, eventueel wordt (deels) nieuw gras gelegd.

*) Gekopieerd vanuit Bijlage D

Bijlage 2 Bodemtemperatuurmetingen met glasvezelkabel en DTS-machine

De methode voor de bodemtemperatuurmetingen met glasvezelkabel en DTS-machine volgens Nieuwenhuizen (2011)** is als volgt:

- Glasvezelkabel wordt gebruikt die dienst doet als één langgerekte thermometer
- De glasvezelkabel is ingegraven tot de maximale gewenste bodemdiepte, om warmtestromen in de bodem te meten.
- DTS-machine schiet een laserstraal door de kabel.
- De laserstraal botst tegen de binnenkant van de kabel, waarbij het licht op verschillende manieren wordt gereflecteerd (het Raman-effect). Een deel van het licht komt terug met dezelfde frequentie en golflengte als de laserstraal, maar bij de rest verlaagt de frequentie en wordt de golflengte groter (Stokes-verstrooiing), of de frequentie wordt hoger en de golflengte kleiner (Anti-Stokes-verstrooiing).
- De gereflecteerde lichtdeeltjes komen uiteindelijk aan bij een uiteinde van de kabel. Op basis van het verschil in aankomsttijd kan de DTS-machine bepalen waarvandaan het licht afkomstig is.
- DTS-machine berekent de temperatuur op basis van het verschil in intensiteit tussen de Stokes- en Anti-Stokes-verstrooide deeltjes. De intensiteit van de Anti-Stokes-verstrooiing is namelijk erg temperatuurafhankelijk en die van de Stokes-verstrooiing vrijwel niet.
- Door naar de verhouding Stokes/Anti-Stokes-intensiteit te kijken, bepaalt de DTS-machine de temperatuur op een plek. Dus voor elke plek in de kabel is de temperatuur af te leiden.

**) Vrij naar Nieuwenhuizen (2011).

Bijlage 3 CPI Index

Jaar	Jaarmutatie CPI (%)
2001	4.5
2002	3.4
2003	2.1
2004	1.2
2005	1.7
2006	1.1
2007	1.6
2008	2.5
2009	1.2
2010	1.3
2011	2.3
2012	2.5
2013	2.5
2014	1
2015	0.6
2016	0.3
2017	1.4
2018	1.7
2019	2.6
2020	1.3
2021	2.7
2022	10

Bron: <https://opendata.cbs.nl/#/CBS/nl/dataset/70936ned/table?ts=1683643155677>