

A network diagram consisting of various sized light blue circles connected by thin white lines, set against a solid blue background. The circles vary in size and are scattered across the page, with some larger circles acting as hubs.

KWR 2019.080 | November 2019

**Effectiviteit
maatregelen tegen
opwarming drinkwater
in leidingen**

Effectiviteit maatregelen tegen opwarming drinkwater in leidingen

KWR 2019.080 | November 2019

Opdrachtnummer

402635-007

Projectmanager

ir. A. (Andreas) Moerman

Opdrachtgever

DPWE Stuurgroep

Auteur(s)

dr. J. (Jozanneke) van Vossen

dr. S.F. (Sija) Stofberg

dr. ir. C. (Claudia) Agudelo-Vera

Kwaliteitsborger(s)

dr. ir. M. (Mirjam) Blokker

dr. ir. D.G. (Gijsbert) Cirkel

Verzonden naar

DPWE Stuurgroep

Dit rapport is een jaar na publicatie openbaar.

Keywords

Temperatuur

Jaar van publicatie
2019

Meer informatie

ir. A. (Andreas) Moerman

T 030 6069 605

E andreas.moerman@kwrwater.nl

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511

F +31 (0)30 60 61 165

E info@kwrwater.nl

I www.kwrwater.nl



November 2019 ©

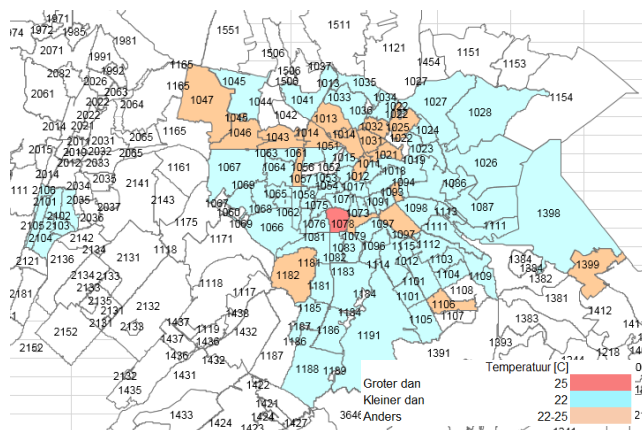
Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden veeelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevens bestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming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

Managementsamenvatting

Modelstudie identificeert effectieve maatregelen tegen ongewenste opwarming van drinkwater in leidingen, maatschappelijke afweging nodig

Auteur(s): dr. J. (Jojanneke) van Vossen, dr. S.F. (Sija) Stofberg en dr. ir. C. (Claudia) Agudelo-Vera

Klimaatverandering en veranderingen in de ondergrond in verband met de energietransitie vergroten de kans op hotspots in de ondergrond waardoor het drinkwater in de leidingen regelmatig een te hoge temperatuur kan krijgen. Aan de hand van een casusstraat die representatief is voor veel steden in West-Nederland zijn kansrijke maatregelen geanalyseerd op effectiviteit en praktische haalbaarheid. Daarbij bleek dat het dieper leggen van leidingen, leidingen aanleggen onder groenstroken en/of in de schaduw en het verhogen van het vochtgehalte van de bodem een effectieve reductie van de drinkwatertemperatuur in de distributieleiding kunnen opleveren van 1 tot 3 graden. Daarmee hangt het af van lokale omstandigheden welke maatregel op welke locatie optimaal zal zijn. Dit vraagt om een maatschappelijke afweging en samenwerking met gemeenten.



Maximum temperatuur vanuit het reguliere monsterprogramma in 2019 per stadsdeel in Amsterdam (Waternet)

Belang: zonder maatregelen kan drinkwater-temperatuur straks steeds vaker te hoog worden

De komende decennia zal door klimaatverandering de kans op weersextremen toenemen. Deze extremen kunnen zich voordoen in de vorm van (langere perioden van) hoge luchttemperatuur, zwaardere regenbuien en langere perioden van droogte. Ook zal de energietransitie (fossiele energiebronnen maken plaats voor hernieuwbare energiebronnen) leiden tot meer antropogene warmtebronnen in de ondergrond, zoals warmtenetten, en een groter ondergronds *Urban Heat Island*-effect. Er is dus een kans op toename van hotspots in de ondergrond en meer overschrijdingen van de eis in het Drinkwaterbesluit dat de temperatuur van drinkwater aan de tap niet boven 25°C mag komen.

Aanpak: kwantificeren effect van kansrijke maatregelen met hydrologisch en warmtemodel

Kansrijke maatregelen om ongewenste opwarming van drinkwater tegen te gaan zijn geanalyseerd op effectiviteit aan de hand van een casus die representatief is voor veel steden in West-Nederland. Om de effectiviteit van de maatregelen te bepalen, zijn ze geanalyseerd met een hydrologisch model van de ondergrond dat ook warmtestromen modelleert (Hydrus) en met een temperatuurmodel van water in een leiding. Een uitbreiding in deze benadering ten opzichte van eerdere studies is dat er nu tweedimensionale temperatuurmodellen mogelijk zijn, waardoor dwarsdoorsnedes mogelijk zijn van straten. Hierdoor kon naast de hoofdleiding ook de aansluitleiding in de analyses worden meegenomen. Ook kunnen er gedetailleerdere scenario's worden

geanalyseerd (zoals het effect van smallere versus bredere groenstroken) en thermische eigenschappen die variëren in tijd en ruimte. Naast de kwantitatieve analyse van de effectiviteit van maatregelen is op basis van een bureaustudie en in overleg met de projectgroep een analyse gemaakt van de kosten en praktische haalbaarheid van verschillende maatregelen.

Resultaten: maatregelen zijn effectief, maar modellen vragen om verdere validatie

De modellen blijken in staat om het effect van maatregelen te kwantificeren. Op basis van de huidige inzichten zijn verschillende effectieve maatregelen kansrijk voor toepassing in een stedelijke omgeving, zoals:

- leidingen dieper leggen;
- leidingen leggen in groenstroken of in de schaduw van bomen;
- de bodemvochtconcentraties verhogen, bijvoorbeeld door klimaatadaptieve drainage.

Elk van deze maatregelen apart kan de temperatuur van het leidingwater met 1 tot 3 graden verlagen.

De modellen blijken gevoelig voor de verticale bodemopbouw en randvoorwaarden als temperatuur aan het oppervlak, de diepte waarop de bodemtemperatuur niet meer wordt beïnvloed door het oppervlak en uitwisseling van warmte met de bodem onder de huizen. Door onzekerheden in die randvoorwaarden en in de bodemopbouw kunnen verschillende graden verschil bestaan tussen de gesimuleerde en geobserveerde temperaturen in de bodem in West-Nederland. Daarom kan met deze aanpak wel worden beoordeeld of een maatregel

effectief is, maar kan niet met zekerheid worden gesteld of een locatie maatregelen nodig heeft en zo ja, met hoeveel maatregelen nodig zijn om het temperatuur-probleem op te lossen. Verdere validatie van de modellen met veldmetingen moet het mogelijk maken om de bodemopbouw en de randvoorwaarden beter in beeld te brengen.

Toepassing: maatschappelijke afweging vraagt samenwerking met gemeenten

De meeste effectieve maatregelen tegen ongewenste opwarming van drinkwater (zoals het dieper leggen van leidingen, het aanleggen van leidingen onder groenstroken of in de schaduw van bomen en het verbeteren van de vochthuishouding in de bodem) hebben resultaten in dezelfde grootteorde. Lokale aspecten, kosten en praktische haalbaarheid zullen daarom een belangrijke rol spelen bij de keuze. Omdat veel van deze maatregelen betrekking hebben op de bovengrondse openbare ruimte, vallen zij ook binnen het werkterrein van gemeenten. Een maatschappelijke afweging per locatie is daarom noodzakelijk. Omdat veel van deze maatregelen ook gunstig uitpakken voor bijvoorbeeld het voorkomen van wateroverlast en het tegengaan van hittestress, is het aan te raden samen met gemeenten naar een effectieve combinatie van maatregelen te zoeken.

Rapport

Dit onderzoek is beschreven in het rapport *Effectiviteit maatregelen tegen ongewenste opwarming van drinkwater in leidingen* (KWR 2019.080). De begeleidingsgroep bij dit onderzoek bestond uit Rob Geers (Dunea), Peter Horst (PWN), Joost Louter (Waternet) en Marc Hooijmans (Evides).

Inhoud

Managementsamenvatting	3
Inhoud	5
1 Achtergrond	7
1.1 Motivatie	7
1.2 Aanpak	7
1.3 Leeswijzer	7
2 Energiebalans van het oppervlak in de stad	8
3 Casus	12
3.1 Beschrijving situatie	12
3.2 Te kwantificeren maatregelen	14
3.2.1 Koelen van het leidingwater	14
3.2.2 Vegetatie	14
3.2.3 Beschaduwning op andere manieren	15
3.2.4 Groene bestrating	16
3.2.5 Infiltratiekragen	16
3.2.6 Tijdelijke maatregelen tijdens een hittegolf	16
4 Kwantificeren maatregelen met een hydrologisch model	18
4.1 Introductie	18
4.1.1 Schematisatie en discretisatie	18
4.1.2 Randvoorwaarden	19
4.1.3 Initiële condities	22
4.1.4 Uitkomsten	22
4.1.5 Scenario's	23
4.2 Resultaten basisscenario en gevoeligheidsexperimenten	24
4.2.1 Basisscenario	24
4.2.2 Type ondergrond	26
4.2.3 Materiaal van de bovengrond / wegfundering	27
4.2.4 Droge en vochtige omstandigheden	29
4.2.5 Materiaal van het wegdek	30
4.3 Kwantificeren effect maatregelen	31
4.3.1 Betegelde stoep versus groenstrook	31
4.3.2 Bredere straat en trottoirs	33
4.3.3 Zon en schaduw	33
4.3.4 Aangepast bodemmateriaal rondom waterleiding	35
4.4 Discussie	38
4.4.1 Kanttekeningen bij resultaten van de modellering	38
4.4.2 Interpretatie van de resultaten	38

5	Kwantificeren maatregelen met een watertemperatuurmodel	40
5.1	Aanpak bepalen watertemperatuur	40
5.2	Enkelzijdig versus dubbelzijdig aanleggen	40
5.2.1	Achtergrond	40
5.2.2	Resultaten modelberekeningen	41
5.3	Effect WKO op drinkwatertemperatuur	45
5.3.1	Achtergrond	45
5.3.2	Casus	46
6	Overzicht effect van klimaat- adaptieve maatregelen	50
6.1	Koelen leidingwater	50
6.1.1	WKO/TED	50
6.1.2	Diepteligging	50
6.1.3	Bodemvocht	50
6.2	Vegetatie	51
6.3	Overige vormen van beschaduwning	53
6.3.1	Enkelzijdig versus dubbelzijdig aanleggen	53
6.3.2	Tijdelijke beschaduwning tijdens een hittegolf	53
6.3.3	Overspannen van straten met luifels	54
6.4	Nieuw gevonden mogelijke maatregelen	54
6.5	Samenvatting	55
7	Conclusie en aanbevelingen	56
7.1	Conclusies en overblijvende aandachtspunten	56
7.2	Randvoorwaarden pilot	57
7.2.1	Metingen	57
7.2.2	Modelvergelijkingen	60
	Referenties	61
I	Parameters bodemfysica en gewas Hydrus	64
II	Vergelijking tussen Hydrus en 1D- BodemTemperatuurModel	67
III	Resultaten gevoeligheidsanalyse Hydrus	69
IV	Richtlijnen KNMI weerstation	70

1 Achtergrond

1.1 Motivatie

De komende decennia zal door klimaatverandering de kans op weersextremen toenemen. Deze extremen kunnen zich voordoen in de vorm van (langere perioden van) hoge luchttemperatuur, zwaardere regenbuien en langere perioden van droogte. In een stedelijke omgeving zal de temperatuur nog extra kunnen stijgen onder invloed van het zogenaamde Urban Heat Island (UHI) effect. Daarnaast is er de energietransitie waarbij fossiele energiebronnen plaats maken voor hernieuwbare energiebronnen. Dit zal er mede toe leiden dat het aantal kilometers stadsverwarming in de nabije toekomst toe zal gaan nemen, in het bijzonder in stedelijke gebieden. Dit leidt tot meer antropogene warmtebronnen in de ondergrond en een groter ondergronds Urban Heat Island effect. Alles bij elkaar betekent dit een kans op toename van hotspots in de ondergrond en het vaker voorkomen van temperaturen van drinkwater hoger dan 25°C aan de tap.

In voorgaande studies binnen BTO en DPWE is geïnventariseerd wat de invloed is van mogelijke maatregelen om opwarming van het drinkwater tegen te gaan. Met de uitkomsten van deze studies hebben de drinkwaterbedrijven argumentatie om bewustwording te creëren bij stakeholders, zoals gemeenten. Hoewel er zicht is op maatregelen die opwarming van het drinkwater mitigeren (zoals groenstroken, schaduw en afstand tot warmte afgevend infrastructuur) is met de huidige kennis niet duidelijk hoe groot de mitigerende effecten van dergelijke oplossingen op lokale schaal zijn. Dit betreft vragen als 'hoe breed moeten groenstroken zijn?', 'hoeveel water heeft vegetatie nodig om daadwerkelijk de bodem te koelen en onder welke omstandigheden is dit water beschikbaar?' en 'welke vegetatie is acceptabel in welke situatie?'. Dergelijke kennislacunes hinderen de stap naar daadwerkelijke toepassing van mitigerende maatregelen. Voorliggend voorstel is bedoeld om de technische kennis te leveren om daadwerkelijke toepassing in een pilot mogelijk te maken.

1.2 Aanpak

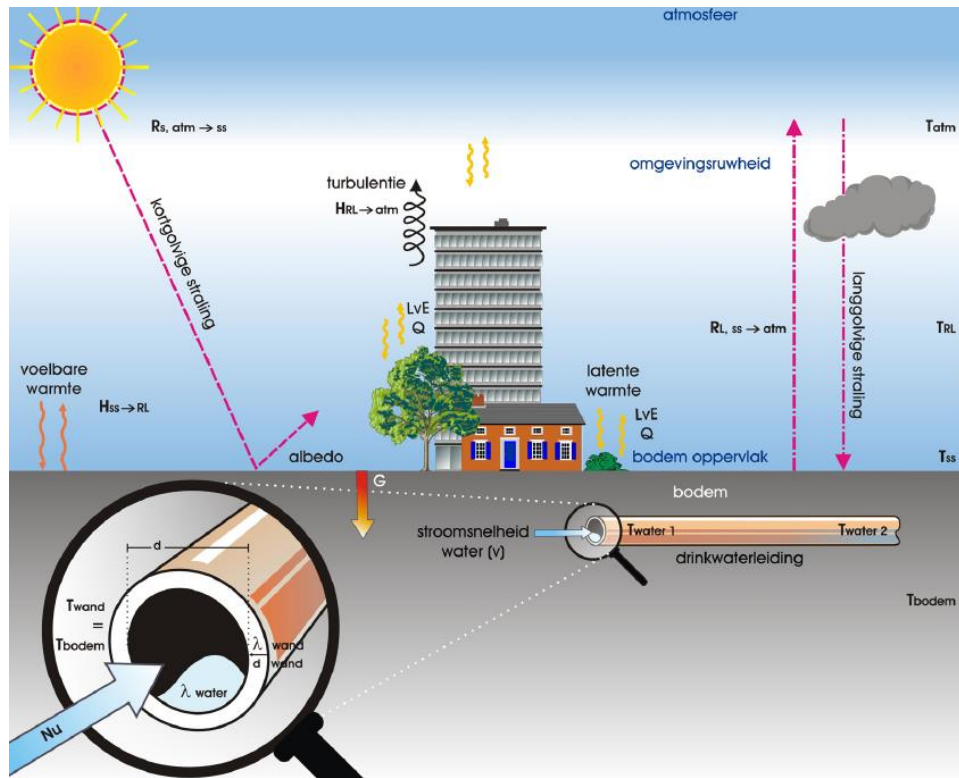
Om effecten van maatregelen te analyseren, zijn alle maatregelen beschouwd in een specifieke situatie: de casus. Deze casus is gekozen als zijnde representatief voor veel wijken in West-Nederland. In een overleg met de projectgroep zijn kansrijke maatregelen benoemd. Om de effectiviteit te bepalen, zijn deze maatregelen zoveel mogelijk geparameteriseerd in modellen: een hydrologisch model van de ondergrond dat ook warmtestromen modelleert (Hydrus) en een temperatuurmodel van het water in een leiding. Naast de effectiviteit van maatregelen is op basis van een bureaustudie en in overleg met de projectgroep een analyse gemaakt van kosten en praktische haalbaarheid. Door alle maatregelen voor deze casus te analyseren, kunnen de resultaten worden vergeleken.

1.3 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 bevat een inleiding in de klimatologie van de stad en een analyse van potentiële kansrijke maatregelen. In Hoofdstuk 3 staat de casus beschreven alsmede de maatregelen die zijn gekozen door de projectgroep om te analyseren. In Hoofdstuk 4 staan de analyses met het hydrologische model, in hoofdstuk 5 de analyses met het watertemperatuurmodel. In Hoofdstuk 6 staat een beschouwing van kosten en praktische haalbaarheid. In Hoofdstuk 7 staan de aanbevelingen voor vervolg.

2 Energiebalans van het oppervlak in de stad

De temperatuur van drinkwater wordt beïnvloed door de omringende bodemtemperatuur. Deze is afhankelijk van bodemeigenschappen, weersomstandigheden en menselijke activiteiten (antropogene warmtebronnen), zie ook Figuur 2-1. In dit hoofdstuk wordt beschreven op welke manier de temperatuur van de bodem hierdoor wordt beïnvloed.



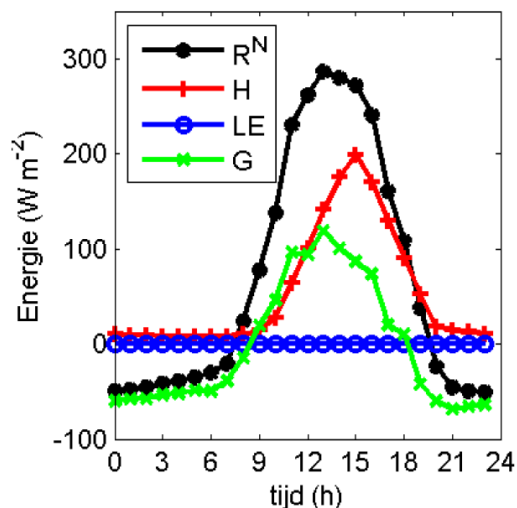
Figuur 2-1 Schematische weergave van de opwarming van het leidingwater onder invloed van weer en omgeving. Figuur overgenomen uit Pieterse-Quirijns (2011).

De energiebalans van het aardoppervlak bepaalt de temperatuur van de bodem (van der Molen et al., 2008):

$$(1 - \alpha)R_{K,in} + R_{L,in} + F = R_{L,emissie} + H + LE + G \quad (1)$$

Hier staat R voor de straling, het subscript 'K' staat voor kortgolvlige straling, oftewel directe zonnestraling, waarvan een deel reflecteert van het oppervlak, gerepresenteerd door het albedo α . Het subscript 'L' staat voor langgolvlige straling of warmtestraling. Ieder object met een temperatuur zendt straling uit. De inkomende langgolvlige straling is de straling uitgezonden door bijvoorbeeld wolken. Het aardoppervlak zelf zendt ook straling uit ($R_{L,emissie}$). Hoe warmer een oppervlak, hoe groter de uitgezonden straling. H is de voelbare warmteflux, oftewel de warmte die wordt gebruikt om de lucht op te warmen door conductie en convectie. LE is latente warmte, ofwel de warmte benodigd voor verdamping. G is de bodemwarmteflux, ofwel de energie die wordt gebruikt om de bodem op te warmen of af te koelen. Vergelijking (1) gaat uit van evenwicht, bij opwarming is de hoeveelheid inkomende energie groter dan de uitgaande. Een voorbeeld van de gemiddelde dagelijkse variaties boven bestrating staat weergegeven in Figuur 2-2. Hierin is duidelijk dat de netto straling de grootste component is, maar dat ook de

voelbare warmteflux aanzienlijk is. De verdamping van bestrating is nihil. De verdamping van groen kan een aanzienlijke contributie geven aan de energiebalans. Een oppervlak met bestrating kan de aanwezige opgeslagen warmte moeilijker kwijt aan de lucht dan vegetatie. F staat voor de antropogene warmtebronnen, zoals airco's, verkeer, industrie en dergelijke. Dit is de bovengrondse antropogene warmteflux. Totaal beschrijft formule (1) hoeveel warmte er naar de bodem gaat. Samen met de ondergrondse antropogene warmtebronnen, vanuit bijvoorbeeld warmtenetten of elektriciteitskabels, en de thermische eigenschappen van de bodem bepaalt dit de temperatuur van de bodem als functie van diepte.

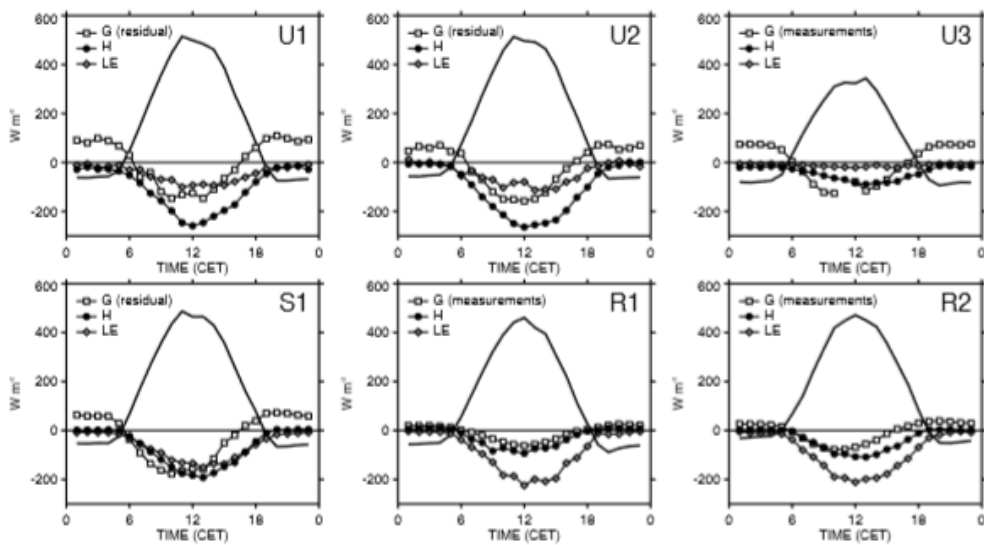


Figuur 2-2 Figuur 2 uit van der Molen et al. (2008). Gemiddelde dagelijkse gang van nettostraling (R), voelbare warmte (H), latente warmte (LE) en bodemwarmteflux (G) boven bestrating (waardoor de verdamping LE nul is).

Als we het verschil beschouwen tussen de energiebalans van een stedelijke omgeving t.o.v. een rurale omgeving, dan zien we het volgende (Agudelo-Vera et al., 2015), zie ook Figuur 2-3:

- Een grotere netto stralingscomponent door de vele reflecties op gebouwen en verticale oppervlakken (R);
- Gebouwen kunnen hun warmte moeilijk afgeven aan de lucht doordat er een beperkt contactoppervlak is tussen objecten en de vrije atmosfeer (H);
- Grotere warmtecapaciteit van de stedelijke omgeving door gebouwen en bestrating dan in rurale gebieden (H);
- Minder latente warmte door minder vegetatie en gebrek aan water (LE);
- Meer warmtebronnen (F).

Alles bij elkaar leidt dit tot het Urban Heat Island Effect (UHI), waarbij steden een aantal graden warmer kunnen worden dan hun omgeving en trager afkoelen.








Figuur 2-3 Typische zomer energiebalansen voor een rurale (R1,2), suburban (S1) en een stedelijke omgeving (U1,2,3). Figuur overgenomen uit (Christen et al., 2003). In deze figuren is de doorgetrokken lijn de inkomende straling.

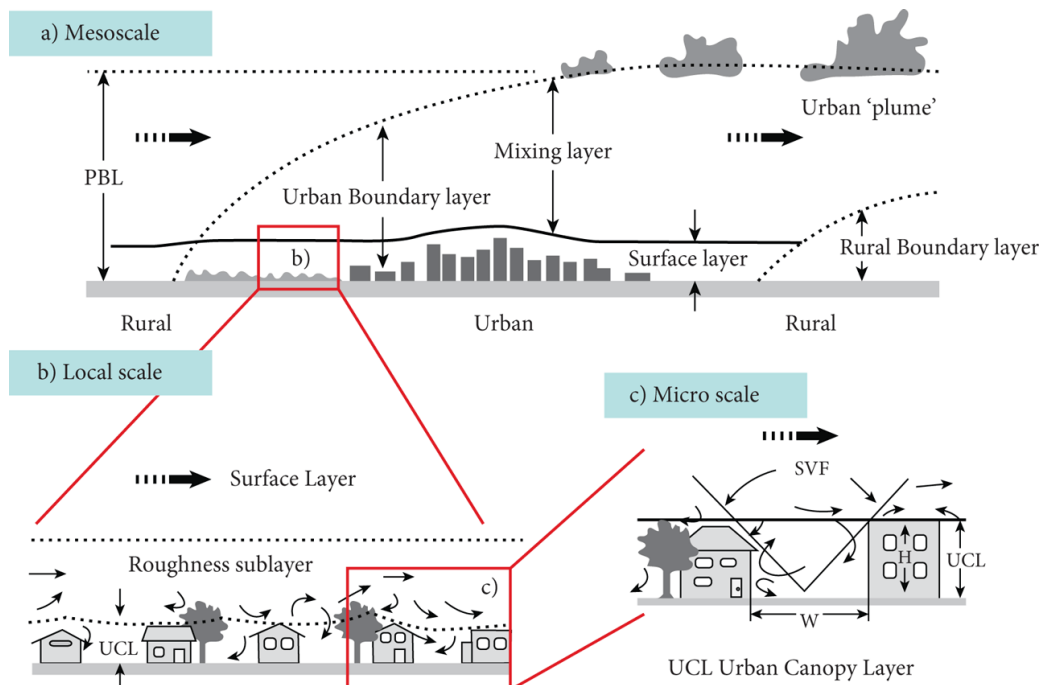
De getallen in Figuur 2-3 suggereren dat maatregelen het grootste effect hebben, indien ze uitgaan van:

- Beschaduwing: effectieve afname inkomende straling (R) (minder energie naar het aardoppervlak toe);
- Toename verdamping: toename latente warmteflux (LE), meer energie van het aardoppervlak af);
- Afname antropogene warmtebronnen (F), minder energie naar het aardoppervlak toe.

De mogelijkheden om de energiebalans door te rekenen voor de stad zijn afhankelijk van de schaal waarop de balans wordt berekend. Figuur 2-4 en Figuur 2-5 laten de verschillende relevante schalen zien voor de stedelijke energiebalans en hoe de schalen voor klimaat en stadsplanning verbonden zijn. De schaal die relevant is voor de huidige studie, namelijk voor het bepalen van de effectiviteit van maatregelen op straatniveau, is de microschaal. Figuur 2-5 laat zien hoe de verschillende stedelijke schalen in energiebalansmodellen zijn verwerkt. De microschaal bevat de individuele huizen, bomen e.d.. Deze vormen samen de zogenaamde urban canopy layer. Deze laag wordt in de meeste energiebalansmodellen meegenomen als een oppervlakteruimte, dat wil zeggen dat het totale effect van deze laag op de bovenliggende luchtlage wordt vereenvoudigd tot een gemiddelde. Vervolgens kunnen wel verschillende gemiddeldes worden gecombineerd (bv. een vierkante kilometer stad bestaat voor 25% uit park, voor 10% uit wegen etc.). Het effect op het stadsklimaat kan hiermee worden bepaald, maar dit is niet voldoende om in de huidige studie het effect van bijvoorbeeld een boom te berekenen. Een gedetailleerde vergelijking op het niveau van de volledige energiebalans is in deze studie daarom niet mogelijk.

Administration level	Planning level	Climatic scale	Urban climate issue
 region	regional development plan M 1: 100.000	meso scale	regional wind circulation
 city	urban development, master plan M 1: 25.000	meso scale	heat island effects; ventilation and air paths
 neighbourhood	urban structures M 1: 5.000	meso scale	thermal comfort, air pollution
 block	open space design M 1: 2.000	micro scale	thermal comfort
 building	building design M 1: 500	micro scale	radiation and ventilation effects

Figuur 2-4 Figuur overgenomen uit (Burghardt, 2014).



Figuur 2-5 Figuur overgenomen uit Georgiadis (2017). Relevante schalen voor het stedelijke gebied in energiebalansmodellen.

3 Casus

3.1 Beschrijving situatie

In de voorliggende studie wordt een casus gebruikt om maatregelen te kunnen kwantificeren en met elkaar te vergelijken. De casus is geanonimiseerd, maar betreft een straat in een vooroorlogse buurt (gebouwd rond 1900-1930) in een stad in West-Nederland met rond 75,000 inwoners. De straat is smal met een breedte van zo'n 7 meter met klinkerbestrating, een parkeerstrook aan één zijde van de straat en een smal trottoir aan weerszijden van de straat (een voorbeeld van een zogenaamde 1-5-1 straat). De bebouwing is voor het grootste deel beperkt tot begane grond met één verdieping. Er zijn geen voortuinen en er is vrijwel geen vegetatie in de straat.

Het inwoneraantal is representatief voor veel steden in West-Nederland (bv. Purmerend, Schiedam, Leidschendam-Voorburg, Hoorn, Vlaardingen, Gouda, Velsen). In grotere steden zijn de huizen soms hoger en de straat soms breder, maar hiervoor is de situatie van een straat met aan weerszijden bebouwing zonder noemenswaardige vegetatie ook representatief, zie Figuur 3-1, Figuur 3-2 en Figuur 3-3 als voorbeelden.



Figuur 3-1 Frankenstraat, Katwijk aan Zee. [https://nl.wikipedia.org/wiki/Rooie_Buurt_\(Katwijk_aan_Zee\)](https://nl.wikipedia.org/wiki/Rooie_Buurt_(Katwijk_aan_Zee)) (Richardkiwi)



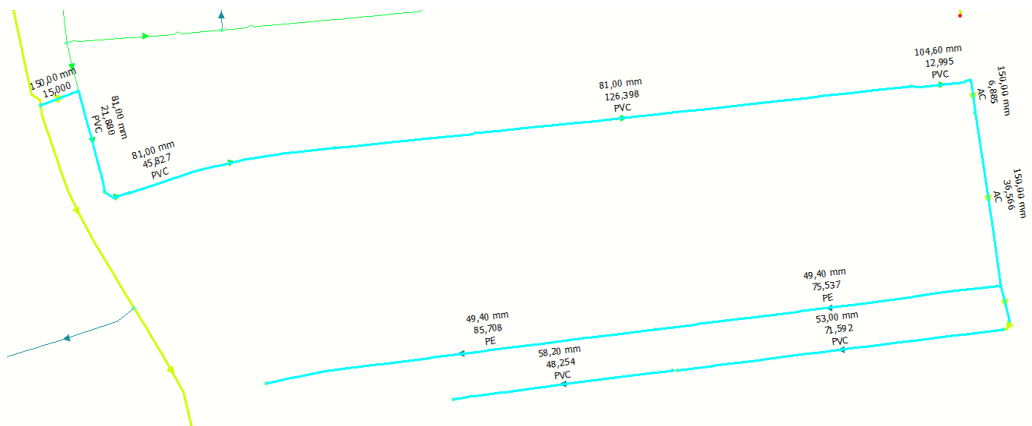
Figuur 3-2 Haarlem, [https://huizenanpak.nl/voorbeeldwoningen/vooroorlogs-herenhuis-garenkokerskwartier-bijna-energieneutraal/#iLightbox\[3bfe2e1faa454235a08\]/1](https://huizenanpak.nl/voorbeeldwoningen/vooroorlogs-herenhuis-garenkokerskwartier-bijna-energieneutraal/#iLightbox[3bfe2e1faa454235a08]/1).



Figuur 3-3 Planciusstraat, Amsterdam, Amsterdam Municipal Department for the Preservation and Restoration of Historic Buildings and Sites (bMA)

Het drinkwaternetwerk in de specifieke casusstraat bestaat grotendeels uit \varnothing 90 en 110 mm PVC, met een stukje \varnothing 150 mm AC en een vertakking in \varnothing 50 mm PVC en \varnothing 50 mm PE. De lengte van het net in de straat is ongeveer 200 meter lang. De riolering midden in de straat. Verder is er een gasnetwerk aanwezig, een laagspanningsnet en diverse telecomkabels. Het drinkwaterleidingnet ligt enkel- en dubbelzijdig onder de stoep. Het laagspanningsnet en telecomkabels liggen dubbelzijdig onder de stoep, gas ligt enkelzijdig. In de straat ligt geen warmtenet en

vooralnog zijn er nog geen plannen om een warmtenet aan te leggen. De aanwezige kabels en leidingen zijn daarmee representatief voor veel woonwijken in steden in de verstedelijkte omgeving van West-Nederland.



Figuur 3-4 Weergave van het netwerk in de casusstraat.

3.2 Te kwantificeren maatregelen

De maatregelen worden zowel geanalyseerd vanuit de distributieleiding (in de lengterichting van de straat) als vanuit de aansluitleidingen (dwarsprofiel). Tijdens het startoverleg op 22 januari 2019 zijn de volgende maatregelen benoemd:

3.2.1 Koelen van het leidingwater

Koelen van het leidingwater kan actief middels WKO (Warmte Koude Opslag) of TED (Thermische Energie Drinkwater) (zoals opgenomen in de lijst te analyseren maatregelen). Deze maatregel is uitgewerkt in Hoofdstuk 5. Koeler drinkwater kan ook worden bewerkstelligd door passief koelen middels een koelere bodem. Het effect van een koelere bodem door het aanhouden van een grotere diepte, een bodem met andere warmte-eigenschappen en/of vochtcondities is uitgewerkt in Hoofdstuk 4.

3.2.2 Vegetatie

Vegetatie kan op verschillende manieren effect hebben op de temperatuur van de bodem. Niet elke soort vegetatie is even effectief in het reduceren van temperatuur, dit is ook afhankelijk van de omgeving waarin de vegetatie staat. De volgende processen zijn van belang:

- Verdamping of beter gezegd evapotranspiratie: dit is het netto effect van verdamping van water op het oppervlak van de vegetatie (evaporatie) en het verdampen van water via de huidmondjes (transpiratie). Er zijn drie termen gangbaar als het gaat om verdamping, namelijk actuele verdamping, potentiële verdamping en referentiegewasverdamping¹. Tabel 3-1 geeft de gewasfactoren van een aantal verschillende landgebruiken, waarbij de gewasfactor de relatie aangeeft tussen de referentiegewasverdamping en de potentiële verdamping. Te zien is dat bijvoorbeeld bos meer verdampt dan grasland en grasland meer dan kaal zand (dit komt o.a. doordat kaal zand alleen evaporatie heeft en geen transpiratie). Let wel dat dit getallen zijn die variëren door

¹ De referentiegewasverdamping is de verdamping van een grasveld (10 cm) met voldoende water en nutriënten. Het KNMI levert voor een aantal neerslagstations de waarde van deze referentiegewasverdamping op basis van de formule van Makkink. Dat betekent dat de referentiegewasverdamping wordt bepaald door de inkomende straling en de temperatuur. De referentiegewasverdamping wordt dus niet rechtstreeks gemeten door het KNMI. Met een tabel met gewasfactoren kan deze referentiegewasverdamping worden omgezet naar het daadwerkelijke landgebruik. Deze berekening geeft de potentiële verdamping, oftewel de verdamping van deze gewassen bij voldoende water en nutriënten. De actuele verdamping is de werkelijke verdamping.

het jaar heen (want dit is bijvoorbeeld afhankelijk van bladvoerendheid) en nog niet de actuele verdamping behelzen.

Tabel 3-1 Typische gewasfactoren voor een aantal vegetatietypes (Runhaar et al., 1998) (gebaseerd op Makink).

Gewas	Gewasfactor
Kaal zand	0,4
Schraal grasland	1,0
Loofbos	1,1
Naaldbos	1,2

- **Schaduwwerking:** Schaduwwerking is het direct tegenhouden van inkomende kortgolvlige straling. Niet iedere vorm van vegetatie heeft dezelfde schaduwwerking, hierbij hebben hoogte, omvang van de bladeren en de dichtheid van de bladeren een rol. De mate van beschaduwing is ook afhankelijk van de tijd in het jaar en het tijdstip van de dag.
- **Ventilatie:** Een bos of grote bomen in een kleine straat kunnen de uitwisseling van lucht tussen het straatniveau en de atmosfeer beperken, waardoor warmte mogelijk langer blijft hangen aan het eind van de dag. Dit is afhankelijk van turbulentie en van de hoogte en omvang van de vegetatie in relatie met de omgeving.

Metingen ter validatie van het temperatuureffect van vegetatie zijn beperkt beschikbaar en niet altijd representatief voor Nederland en de casus). De beschikbare metingen zijn vaak representatief voor een park en niet zozeer voor een straat of individuele bomen en ook niet altijd met monitoring door de hele dag. Leuzinger et al. (2010) melden voor een studie in Basel, Zwitserland, rond het middaguur tijdens een warme zomerdag verschillen tussen verharding en luchttemperatuur van 12-35°C en bladeren van bomen die 1-4°C koeler waren dan de luchttemperatuur. Armson et al. (2012) hebben metingen verricht in Manchester, Verenigd Koninkrijk, aan verharde oppervlakken, gras en bomen in de zon en in de schaduw. De metingen zijn verricht in de zomer van 2010, metingen van drie dagen met luchttemperaturen van 23,5-25 °C lieten zien dat verharde oppervlakken (beton) altijd warmer waren dan de lucht tot zo'n 40 °C in de zon en 28 °C in de schaduw. De temperatuur van gras piekte rond 23 °C in de zon en 19 °C in de schaduw (dat is even warm en koeler dan de luchttemperatuur op die dagen). Zowel schaduw als verdamping hebben daarmee een effect op de temperatuur. In Nederland zijn bij groenblauwe daken temperatuurmetingen verricht en zijn verschillende typen oppervlak met elkaar vergeleken (Cirkel et al., 2018). Deze metingen worden in Hoofdstuk 3 gebruikt om de randvoorwaarden voor het bodemtemperatuurmodel af te leiden.

Modelresultaten met een energiebalansmodel door Whitford et al. (2001) suggereren een relatie tussen het percentage "groen" in een wijk en de temperatuur tot 7°C verschil zonder groen, maar de beperking hieraan is dat dit uiteindelijk een analyse op wijkniveau is en dus niet het lokale effect van een boom meet.

Effecten van vegetatie worden gekwantificeerd in Hoofdstuk 4. Hierin is geen onderscheid gemaakt in beschaduwing door verschillende typen vegetatie en andere oorzaken van beschaduwing, zoals bebouwing.

3.2.3 Beschaduwing op andere manieren

Voorbeelden van beschaduwing door andere manieren dan het aanbrengen van vegetatie zijn o.a. luifels en bebouwing. Net als bij beschaduwing door vegetatie is beschaduwing door luifels of bebouwing afhankelijk van de tijd in het jaar en het tijdstip van de dag.

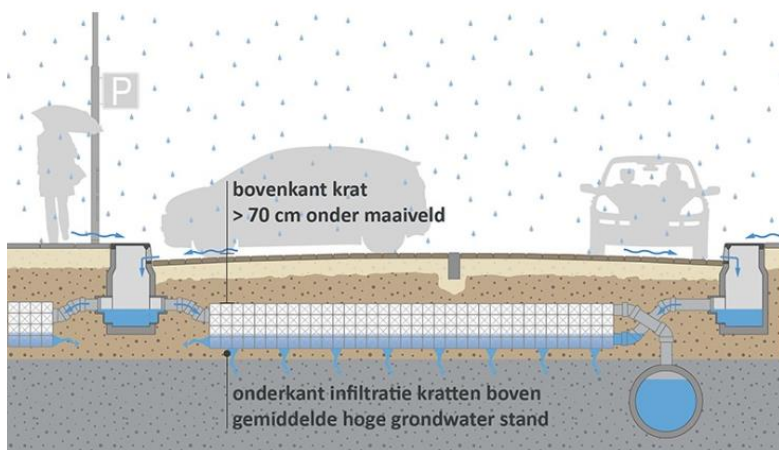
Voor luifels en andere vormen van schaduw op basis van textiel geldt dat de mate van beschaduwing (lichtdoorlatendheid en warmtewerend) afhankelijk is van het soort textiel (bv. weefdichtheid) en de kleur. De schaduw van bebouwing is volledig.

3.2.4 Groene bestrating

Groene bestrating is open bestrating waarin vegetatie kan groeien. Er zijn verschillende soorten, zoals vakjes gras tussen klinkerbestrating, open stenen, verbrede voegen tussen tegels of klinkers, lijnelementen e.d. Het was binnen dit project en deze modellen niet mogelijk om specifieke groene bestrating door te rekenen. Daarom is er van uitgegaan dat de vegetatie in deze groene bestrating in de meeste gevallen gras zal zijn. Dit is bijvoorbeeld het geval als er groene bestrating in de rijweg of onder parkeerstroken wordt geplaatst. Groene bestrating wordt daarom doorgerekend als het equivalent van een strook gras, zie hoofdstuk vegetatie. Dit is waarschijnlijk een optimistische benadering, omdat het begroeide oppervlak kleiner is dan bij een grasstrook en ook de omstandigheden niet altijd optimale grasgroei bevorderen (zoals wanneer er auto's geparkeerd zijn). Deze maatregel is uitgewerkt in Hoofdstuk 4.

3.2.5 Infiltratiekratten

Deze maatregel is bedoeld om water beter te laten infiltreren in de ondergrond, zie Figuur 3-5. Het water stroomt naar de kolken en in plaats van weg te stromen via de riolering, wordt het water opgevangen in de kratten waar het vertraagd afvoert naar de bodem. Het voordeel is (los van verminderde kans op wateroverlast) dat de bodem langer vochtig blijft, wat gunstig is voor eventuele verdamping door vegetatie en invloed heeft op de thermische eigenschappen van de bodem, zie ook hoofdstuk 4. Inmiddels zijn ook systemen beschikbaar waarbij het geborgen water wordt teruggevoerd naar de bovenliggende bodem en (eventuele) beplanting. Hierdoor kunnen planten in groenstroken langer optimaal verdampen. In het huidige model is dit niet meegenomen.



Figuur 3-5 Schematische doorsnede van een straat met infiltratiekratten (Figuur overgenomen van Amsterdam Rainproof (<http://www.rainproof.nl/toolbox/maatregelen/infiltratiekratten>, geraadpleegd 19-8-2019)

3.2.6 Tijdelijke maatregelen tijdens een hittegolf

Tijdelijke maatregelen tijdens een hittegolf kunnen inhouden:

- Tijdelijke beschaduwing;
- Actief het straatoppervlak koelen door sproeien met water. Dit gebeurt bijvoorbeeld bij stalen bruggen en het spoor, maar ook in Zuid-Europese steden (sproeiers en vernevelaars in Parijs en watergevechten in Spanje, <https://www.rtlnieuws.nl/nieuws/nederland/artikel/4788906/hitegolf-weer-correspondenten-tips-hitte-frankrijk-spanje-midde>). Deze laatste maatregelen zijn overigens in eerste instantie gericht op het rechtstreeks koelen van mensen, niet van de straat.

Omdat actief koelen met water leidt tot meer drinkwaterverbruik, wordt deze maatregel niet als een duurzame oplossing gezien. We richten ons daarom op tijdelijke beschaduwning tijdens officiële hittegolven. Dit is uitgewerkt in Hoofdstuk 4.

4 Kwantificeren maatregelen met een hydrologisch model

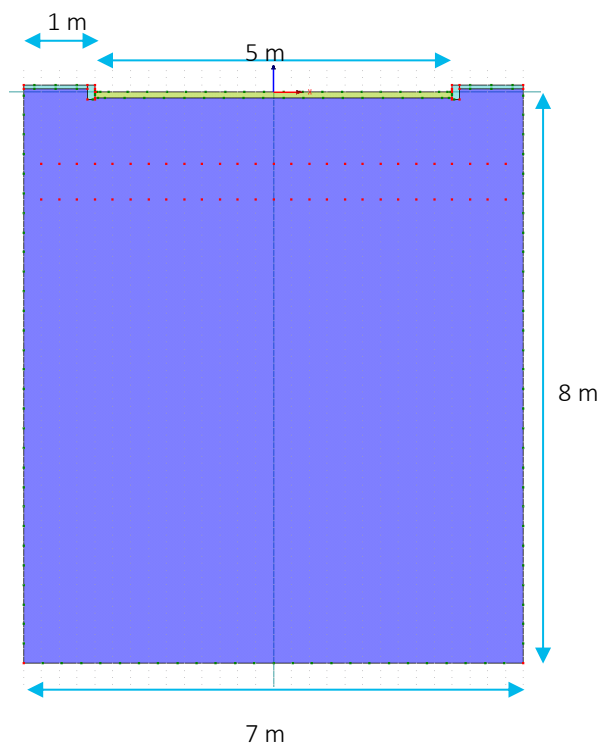
4.1 Introductie

De lokale effecten van klimaatadaptatiemaatregelen op de temperatuur van de ondergrond zijn onderzocht door het warmtetransport vanaf het oppervlak naar de ondergrond door te rekenen met behulp van een eindige elementenmodel² dat gemaakt is met behulp van het softwarepakket Hydrus 2D/3D (Šimůnek and van Genuchten, 2008). Deze software simuleert bodemfysische processen, waaronder de stroming van water in de bodem (zowel verzadigd als onverzadigd), warmtetransport, stoftransport en de opname van water door planten. Het pakket simuleert geen processen die (deels) buiten de bodem plaatsvinden, zoals de vertaling van de energiebalans naar de temperatuur van het aardoppervlak (dit wordt als randvoorwaarde aan het model opgelegd). Het model wordt hier gebruikt om het transport van warmte in de bodem te onderzoeken, op basis van opgelegde temperatuurreksen aan het oppervlak. Warmtetransport hangt af van bodemeigenschappen (warmtecapaciteit en geleiding), die op hun beurt afhangen van vochtgehalte en bodemtype.

4.1.1 Schematisatie en discretisatie

Het domein bestaat uit een doorsnede van een straat met aan beide zijden een trottoir. De trottoirs zijn 1 meter breed en het weggedeelte is 5 meter breed. Het trottoir ligt 10 cm boven de hoogte van de weg. Het modeldomein loopt door tot 8 meter diepte onder het wegdek (op deze diepte wordt een constante temperatuur verondersteld, zie ook Bijlage III). De dikte van de stoeptegels is 5 cm en de trottoirband is 10 cm breed en 20 cm diep. Het wegdek heeft een dikte van 8 cm. Er wordt vanuit gegaan dat het wegfunderingsmateriaal zand is. In praktijk kan er ook ander materiaal worden gebruikt.

² Het gebruik van eindige elementen is een methode om differentiaalvergelijkingen op te lossen. Het domein waar de oplossing wordt berekend, wordt opgedeeld in een set discrete elementen. Kleinere elementen betekent een nauwkeurigere oplossing, een domein kan opgedeeld worden in zones met kleinere en grotere elementen waar de oplossing dit vraagt.



Figuur 4-1. Het gemodelleerde domein: een doorsnede van een straat met een trottoir en trottoirbanden (lichtblauw), een wegdek (lichtgroen) en de ondergrond (donkerblauw). De straat is 7 m breed, waarvan er 2 trottoirs zijn van 1 m breed. Het model loopt tot een diepte van 8 meter, op welke diepte een constante temperatuur wordt verondersteld.

Op een diepte van 1 en 1.5 meter zijn zogenaamde waarnemingspunten geplaatst, waar de temperatuur gemonitord wordt. De maximale afmeting van de eindige elementen is in het trottoir en wegdek 4 cm. In de ondergrond zijn de elementen maximaal 5 cm tot de diepte van de waarnemingspunten, daaronder worden de elementen groter tot ongeveer 25 cm.

4.1.2 Randvoorwaarden

De beide zijkanten van het model zijn aangeduid als 'no flow' boundaries, er wordt dus verondersteld dat er geen stroming van water of warmte aan- of afvoer door deze randen plaatsvindt. Aan de onderzijde van het model wordt een constante stijghoogte en temperatuur voorgeschreven, die gelijk is aan:

- Stijghoogte in evenwichtssituatie met een grondwaterstand op een diepte van 1.5 m onder het wegdek. Deze grondwaterstand is representatief voor grondwaterstanden in steden in de Randstad (Gemeente Den Haag, 2019; Gemeente Rotterdam, 2019; Waternet, 2019).
- Temperatuur gelijk aan jaargemiddelde temperatuur (11°C). Op een diepte van maximaal 10 meter wordt doorgaans een constante temperatuur verondersteld (pers. comm. Niels Hartog, KWR en (TNO, 2019)).

De bovenzijde van het model bestaat uit een zogenaamde atmosferische randvoorwaarde, wat wil zeggen dat hier een variabele flux (neerslag en/of verdamping) of temperatuur kan worden opgelegd. In het basisscenario wordt geen neerslag en of evapotranspiratie opgelegd (verharding zonder enige infiltratie). In het scenario met de groenstrook wordt data van neerslag en potentiële evapotranspiratie gebruikt van het KNMI (station Schiphol) voor de betreffende periode (10 april 2018 tot 25 september 2018). Hierbij wordt een gewasfactor van 1 en een worteldiepte van 20 cm aangenomen, dit is representatief voor een gras vegetatie.

De temperatuur van een oppervlak hangt onder anderen af van de meteorologische randvoorwaarden (instraling, luchttemperatuur, wind, etc) en het materiaal van het oppervlak (van der Molen et al., 2008). Gedetailleerde tijdreeksen van typische grondoppervlakken in een warm jaar zijn niet gevonden. In de literatuur worden

temperatuuramplitudes beschreven die verschillen tussen typen oppervlak en zonnige of schaduwrijke omstandigheden (Armson et al., 2012; Herb et al., 2008).

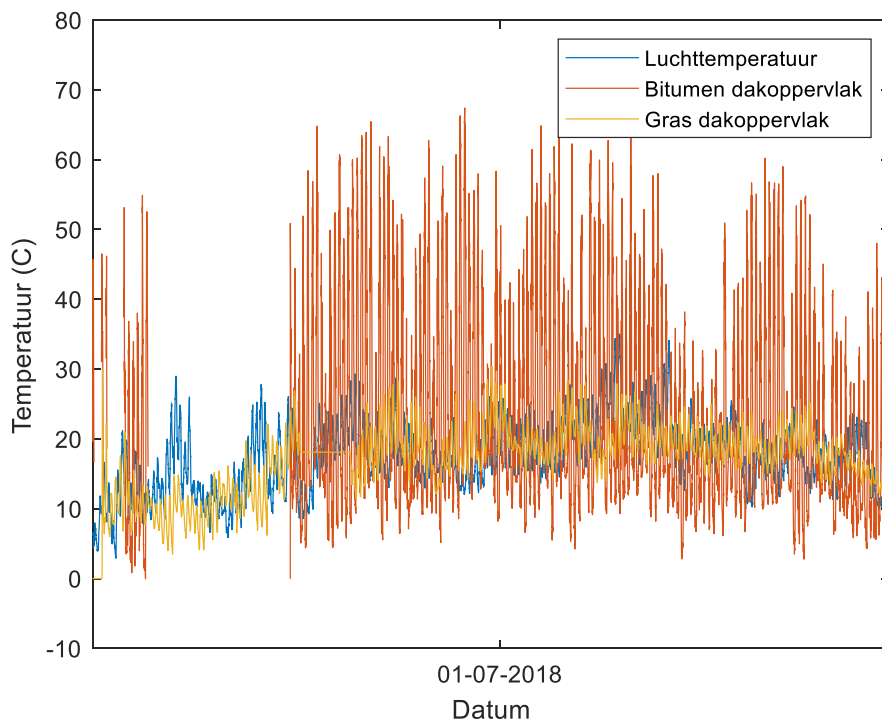
Data van dakoppervlakken met bitumen en gras zijn wel beschikbaar, afkomstig uit het TKI-project Smartroof 2.0 (Cirkel et al., 2018) (<https://www.kwrwater.nl/projecten/blauwgroen-daksysteem-actieve-koeling-stedelijke-biodiversiteit-en-reductie-regenwaterafvoer/>, zie Figuur 4-2). In deze omstandigheden zijn op het bitumendak gemiddelde dagelijkse temperatuurverschillen van 35°C gemeten, terwijl de dagelijkse variaties over de tijd op het dak met gras gemiddeld 6°C bedroegen. Hierbij moet rekening worden gehouden dat het gras tijdens deze periode vrijwel altijd van voldoende water was voorzien. Aangenomen wordt dat de temperaturen op deze oppervlakken representatief zijn voor extremen die op grondoppervlakken in een stedelijke omgeving in Nederland kunnen voorkomen.

Op basis van de meetdata en temperatuuramplitudes uit de literatuur, zoals Higashiyama et al. (2016), zijn voorbeeldreeksen samengesteld die temperatuurfluctuaties op verschillende typen oppervlakken simuleren tijdens een warme zomer. Aangezien niet bekend is hoe typerend deze temperaturen zijn voor werkelijke omstandigheden, wordt aangeraden bij de interpretatie rekening te houden met de gebruikte temperatuur-range (en de gebruikte namen (beton, asfalt, groenstrook) niet te letterlijk te nemen, maar deze voorbeeldtijdreeksen te zien als illustratie van mogelijke extreme en minder extreme omstandigheden die in de praktijk zouden kunnen optreden). De voorbeeldreeksen zijn als volgt verkregen:

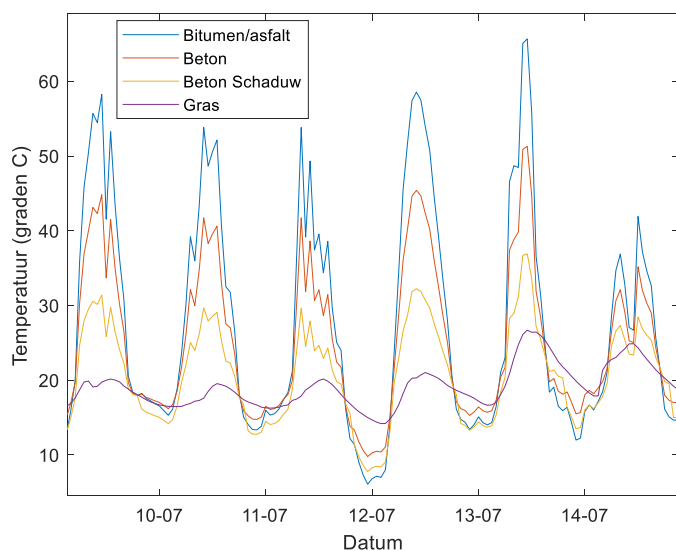
- Asfalt: de aanname is gemaakt dat de temperatuurfluctuaties in asfalt vergelijkbaar zijn met bitumen dakoppervlak, waar gegevens van zijn (Cirkel et al., 2018);
- Beton in de zon (bv. klinkers en trottoirtegels): het uitgangspunt is dat de temperatuurfluctuaties van beton $2/3^{\circ}$ bedragen van de temperatuurfluctuaties van het bitumen dak;
- Beton in de schaduw: het uitgangspunt is dat de temperatuurfluctuaties van beton in de schaduw overdag $1/3^{\circ}$ van de temperatuurfluctuaties van het bitumen dak bedragen en 's nachts altijd 2 graden koeler dan beton in de zon
- Groenstrook met gras: gelijk aan de meetgegevens van gras op het groene dak (Cirkel et al., 2018).

De resulterende eigenschappen van de voorbeeldtijdreeksen zijn weergegeven in

Tabel 4-1 en in Figuur 4-3 zijn de waarden van enkele dagen weergegeven. De temperatuurtijdreeksen zijn toegepast als type 1 (Dirichlet) temperatuur-randvoorwaarden in het model, wat wil zeggen dat de temperaturen als vaste randvoorwaarden (wel variërend als functie van tijd) zijn opgelegd aan de betreffende boven- en onderrand. De tijdreeksen bestaan uit tijdstappen van 1 uur over een periode van 168 dagen (gebaseerd op de periode van 10 april 2018 tot 25 september 2018).



Figuur 4-2. Gemeten temperaturen op een bitumendak en een groen dak met gras in Amsterdam in de zomer van 2018 (Cirkel et al., 2018). Op de x-as staat het zomerhalfjaar in 2018.



Figuur 4-3. Reeksen van temperatuurflictuaties op verschillende typen oppervlakken, op basis van data van een bitumen dak en groen dak in Amsterdam (Cirkel et al., 2018) en getransformeerde reeksen van minder extreme fluctuaties op betonoppervlakken.

Tabel 4-1 Gemiddelde en maximum temperatuur op de verschillende oppervlakken in de simulaties.

Oppervlak	Gemiddelde temperatuur (°C)	Maximum temperatuur (°C)
Asfalt	21	67
Beton (tegels/klinkers)	20	51
Beton schaduw	17	37
Groenstrook	18	30

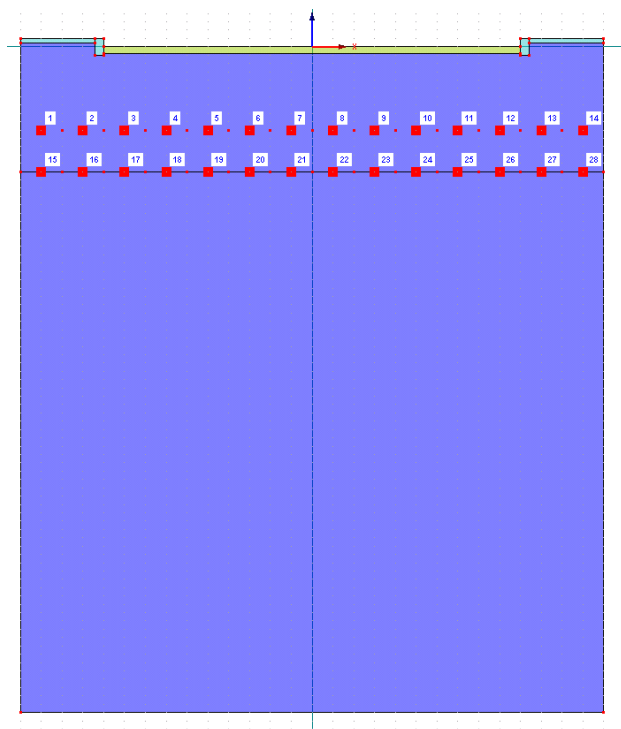
4.1.3 Initiële condities

De volgende omstandigheden zijn toegepast als startsituatie van de modelruns:

- Stijghoogte in evenwichtssituatie met grondwaterstand, voor het basisscenario op een diepte van 1.5 m onder het wegdek. De grondwaterstand blijft hierdoor constant over de tijd. In combinatie met de temperatuur zoals opgelegd aan de boven- en onderrand wordt hiermee het vochtgehalte in de bodem berekend en daarmee ook de thermische eigenschappen van de bodem (deze variëren dus over het model, zowel in tijd als ruimte).
- De bodemtemperatuur in het model bij de start van de simulatie is gelijk aan de jaargemiddelde temperatuur (11°C).

4.1.4 Uitkomsten

De uitkomsten van de simulaties bestaat uit data omtrent drukhoogte, vochtgehalte en temperatuur van de ondergrond over de verschillende tijdstappen. De eerste maand (tot 10 mei) is buiten beschouwing gelaten, als inlooperperiode van het model. Van 28 punten (hierna observatiepunten genoemd) is de temperatuur over de tijd bijgehouden (Figuur 4-4), zodat een eenvoudige vergelijking van de resultaten van de verschillende simulaties mogelijk is. Deze observatiepunten zijn gekozen op 1 en 1,5 meter onder straatniveau en representeren de huidige ligging van drinkwaterleidingen en de gevolgen van een maatregel om drinkwaterleidingen dieper te leggen.



Figuur 4-4. Observatiepunten. Punt 1-14 liggen op 1 meter diepte en punt 15-28 op 1,5 meter diepte.

4.1.5 Scenario's

In dit onderzoek is uitgegaan van een basisscenario dat vervolgens vergeleken wordt met andere omstandigheden. Tabel 4-2 geeft een overzicht van de scenario's weer. In het basisscenario is de straat verhard met betonklinkers en is het trottoir bedekt met betonnen stoeptegels en een trottoirband. Aanvankelijk is getest hoe eigenschappen die losstaan van klimaatadaptatiemaatregelen effect hebben op de temperatuur in de ondergrond, waaronder de diepte van de onderrand van het model (de diepte waarop een constante temperatuur wordt verondersteld), de eigenschappen van de diepere ondergrond en de bovengrond/wegfundering.

Het effect van droge en natte omstandigheden is gesimuleerd door de grondwaterstand van het basisscenario lager dan wel hoger te plaatsen. Ook is het basisscenario vergeleken met een simulatie waarin het wegdek van asfalt is gemaakt. Het effect van groen is vervolgens onderzocht door één van de trottoirs te vervangen door een strook gras. Voor zowel het basisscenario als de groenstrook is tevens gekeken wat de effecten zijn wanneer de straat en de trottoirs breder zijn. Verder is het effect van zonnige en schaduwrijke omstandigheden onderzocht, door ook één helft van de straat (zowel trottoir als wegdek) en de gehele straat als beschaduwde te modelleren. Hierbij is ook gekeken naar het scenario waarin er tijdens een hittegolf (15 juli tot 27 juli 2018, de eerste hittegolf van die zomer (KNMI, 2019)) schaduw wordt gecreëerd in een zonnige straat. Als laatste is een scenario doorgerekend waarbij lokaal de bodemeigenschappen zijn aangepast, zodat er meer vocht wordt vastgehouden. Voor een overzicht van gebruikte parameters, zie Bijlage I.

Tabel 4-2. Scenario's. Voor een overzicht van gebruikte parameters, zie Bijlage I.

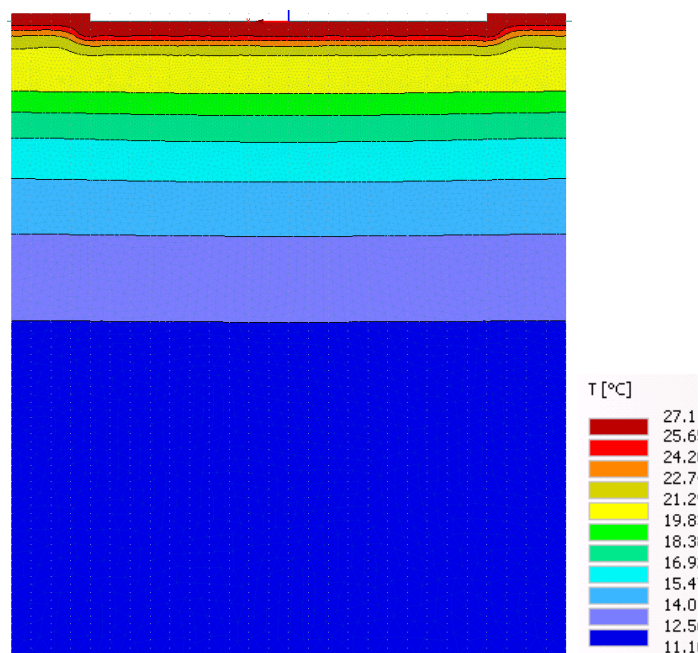
Scenario	Grondwater-stand t.o.v. wegdek	Wegdek	Trottoir/groen	Zon/Schaduw	Bodemtype
Basis	-1,5 m	Beton (klinkers)	Beton (tegels)	Zon	Zand
Onderrand model	-1,5 m	Beton (klinkers)	Beton (tegels)	Zon	Zand
Diepere ondergrond					
Lichte klei	-1,5 m	Beton (klinkers)	Beton (tegels)	Zon	Zand + lichte klei (diep)
Veen	-1,5 m	Beton (klinkers)	Beton (tegels)	Zon	Zand + veen (diep)
Matig fijn zand	-1,5 m	Beton (klinkers)	Beton (tegels)	Zon	Zand + matig fijn zand (diep)
Bovengrond/wegfundering					
Leemarm zand	-1,5 m	Beton (klinkers)	Beton (tegels)	Zon	Leemarm zand + zand (diep)
Lemig zand	-1,5 m	Beton (klinkers)	Beton (tegels)	Zon	Lemig zand + zand (diep)
Grof zand	-1,5 m	Beton (klinkers)	Beton (tegels)	Zon	Grof zand + zand (diep)
Grind	-1,5 m	Beton (klinkers)	Beton (tegels)	Zon	Grind + zand (diep)
Bodemvocht					
Zeer droog	-5 m	Beton (klinkers)	Beton (tegels)	Zon	Zand
Droog	-2 m	Beton (klinkers)	Beton (tegels)	Zon	Zand
Nat	-1 m	Beton (klinkers)	Beton (tegels)	Zon	Zand
Wegdek					
Asfalt	-1,5 m	Asfalt	Beton (tegels)	Zon	Zand

Scenario	Grondwater-stand t.o.v. wegdek	Wegdek	Trottoir/groen	Zon/Schaduw	Bodemtype
Trottoir/groen					
Groen	-1,5 m	Beton (klinkers)	Gras (1 trottoir) en beton	Zon	Zand en bodem groenstrook
Bredere straat					
Basis 2-6-2 m	-1,5 m	Beton (klinkers)	Beton (tegels)	Zon	Zand
Groenstrook 2-6-2 m	-1,5 m	Beton (klinkers)	Gras (1 trottoir) en beton	Zon	Zand en bodem groenstrook
Zon/schaduw					
Halfschaduw	-1,5 m	Beton (klinkers)	Beton (tegels)	Half schaduw	Zand
Schaduw	-1,5 m	Beton (klinkers)	Beton (tegels)	Geheel schaduw	Zand
Tijdelijk schaduw	-1,5 m	Beton (klinkers)	Beton (tegels)	Tijdelijk schaduw	Zand
Extra					
Aangepast bodemmateriaal	-1,5 m	Beton (klinkers)	Beton (tegels)	Zon	Zand en lokaal aangepast zand

4.2 Resultaten basisscenario en gevoeligheidsexperimenten

4.2.1 Basisscenario

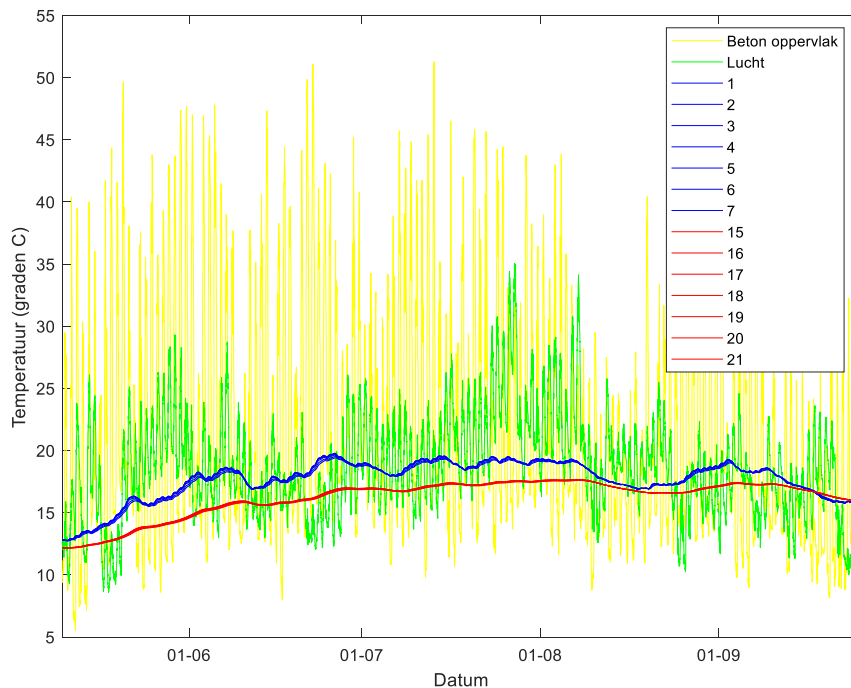
In het basisscenario is het trottoir bedekt met betonnen stoeptegels en een stoeprand, en is het wegdek bedekt met betonnen klinkers. De temperatuur aan het oppervlak is over de hele straat gelijk. De verspreiding van de warmte naar de ondergrond verloopt vrijwel gelijkmatig (Figuur 4-5 geeft een voorbeeld van de temperatuurverdeling na een warme dag), hoewel kleine verschillen optreden door verschillen in afstand naar het oppervlak (verschillende hoogten van trottoir en wegdek) en dikten van de verharding (vooral de stoeprand is zichtbaar).



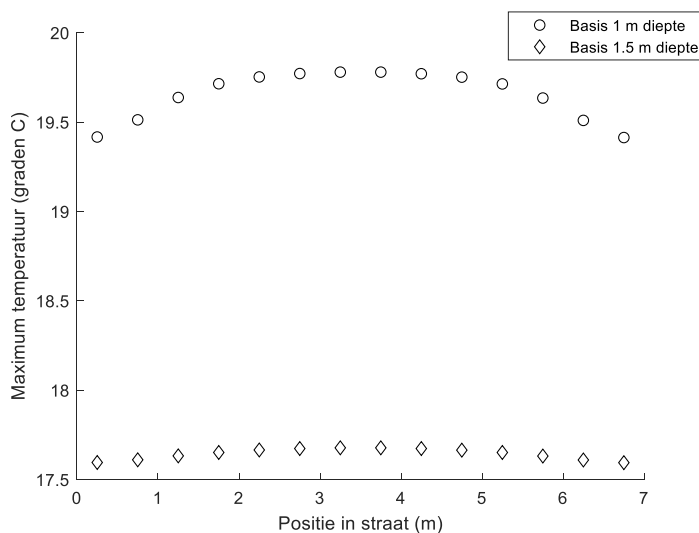
Figuur 4-5. Verspreiding van temperatuur over de diepte in het basisscenario op dag 78 (27 juni, 17 uur) in het basisscenario.

Figuur 4-6 geeft weer hoe de temperatuur op de observatiepunten varieert over de tijd. Ten opzichte van de randvoorwaarde aan de bovenrand (de temperatuur op het betonoppervlak) vindt er afkoeling en een vertraging en een afvlakking van de fluctuaties plaats. Korte perioden met hoge temperaturen hebben hierbij beperkt effect, maar langere hittegolven zorgen voor verdere opwarming (en beperkte afkoeling) van de ondergrond. Tussen de observatiepunten op gelijke diepte zijn kleine verschillen waargenomen door de ongelijkmatige verspreiding van warmte naar de ondergrond. Op 1 meter werd een maximum temperatuur van ca. 19,7 graden bereikt. Op 1,5 meter waren temperatuurpieken en -dalen wat uitgedoofd vergeleken met 1 meter diepte. Voor een analyse van de verschillen tussen de resultaten van Hydrus en het 1D-BTM voor dezelfde periode, zie Bijlage II. Het 1D-BTM is een ééndimensionaal bodemtemperatuurmodel dat de afgelopen jaren is ontwikkeld en ingezet binnen diverse BTO, DPWE en TKI projecten, zie o.a. Blokker and Pieterse-Quirijns (2012), van der Molen et al. (2008) en Agudelo-Vera (2018).

Figuur 4-7 geeft weer hoe de maximumtemperatuur op de observatiepunten varieerde per punt. Hierbij valt op dat het midden van de straat iets warmer wordt dan de zijkanten nabij de trottoirs. Dit effect lijkt vooral verklaard te worden doordat de trottoirs iets hoger liggen dan de straat (de meting op 1 meter diepte betekent 1 meter onder het straatniveau).



Figuur 4-6. Temperatuur over de tijd op het betonoppervlak, de lucht en verschillende observatiepunten op 1 meter diepte (blauw) en 1.5 meter diepte (rood) in het basisscenario.



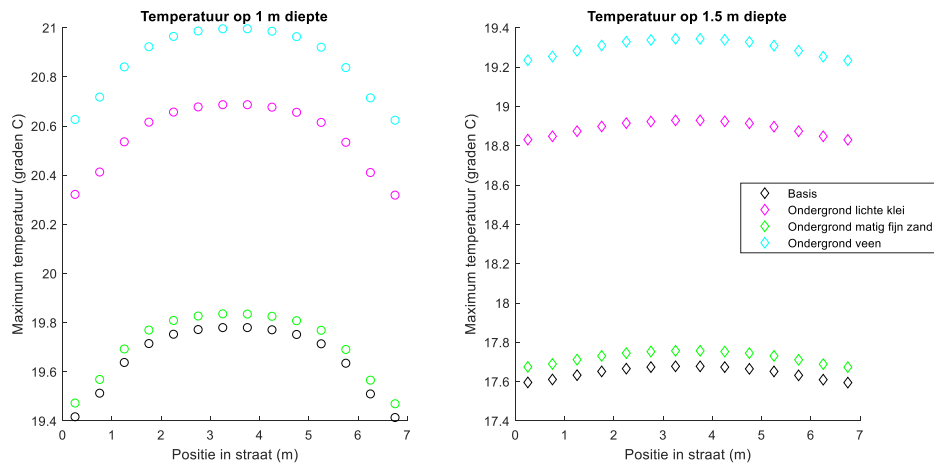
Figuur 4-7. Verdeling van de maximum temperatuur op de observatiepunten over de breedte van de straat in het basisscenario.

In Bijlage III staan de resultaten van de gevoeligheidsanalyse naar het effect van een grotere diepte van de onderrand van het model (15 meter diepte i.p.v. 8 meter). Het model is gevoelig voor de diepte van de onderrand in termen van absolute temperatuur, maar verschillen door maatregelen hebben dezelfde orde van grootte. Welke temperatuur en diepte het beste kan worden gebruikt is moeilijk te zeggen, dit hangt onder andere af van het type ondergrond en de grondwaterstand en moet worden gevalideerd.

4.2.2 Type ondergrond

Vanuit eerdere modelstudies met het 1D-BTM (Blokker and Pieterse-Quirijns, 2012) is bekend dat de gevoeligheid van de bodem voor opwarming verschilt per bodemtype, waarbij zandige bodems i.h.a. meer opwarmen dan

bijvoorbeeld veenbodems. Een veel voorkomende situatie in stedelijke gebieden in West-Nederland is dat er een zandlaag bovenop de oorspronkelijke bodemsoort is gelegd. Daarom wordt in deze en volgende paragraaf de gevoeligheid van het model geanalyseerd voor verschillen in de boven- en ondergrond. Het effect van de eigenschappen van de ondergrond (vanaf 1,5 meter diepte) is weergegeven in Figuur 4-8. Hieruit blijkt dat simulatie met de eigenschappen van matig fijn zand (O2 uit de Staringreeks (Wosten et al., 2001)) leidt tot zeer vergelijkbare resultaten als het standaardtype zand dat in Hydrus zit. Klei en veen leiden daarentegen tot hogere maximumtemperaturen, omdat deze materialen warmte minder goed geleiden.

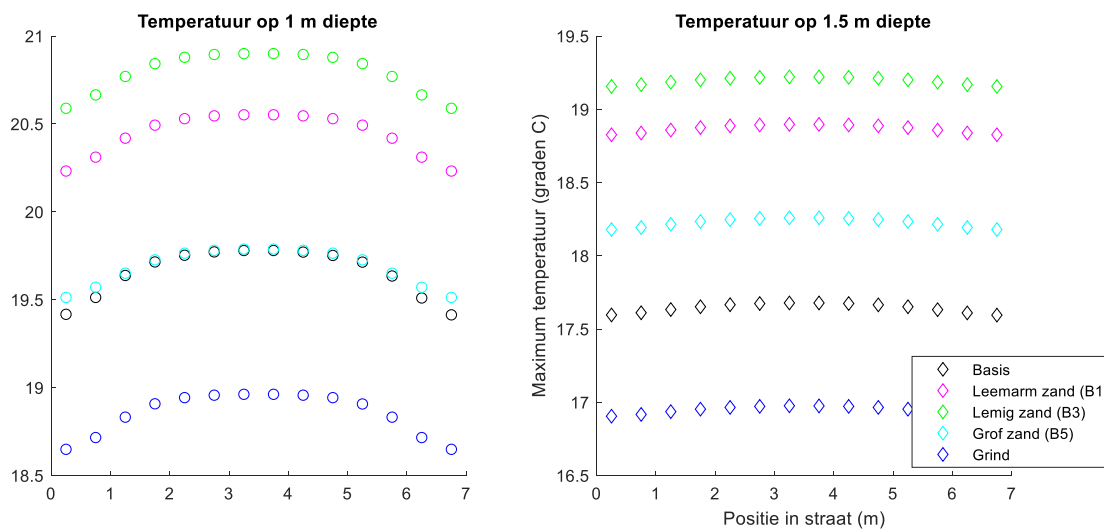


Figuur 4-8. Verdeling van de maximum temperatuur op de observatiepunten over de breedte van de straat in het basisscenario, vergeleken met modelresultaten waarin voor de ondergrond (vanaf 1.5 m diepte) andere materialen zijn gekozen.

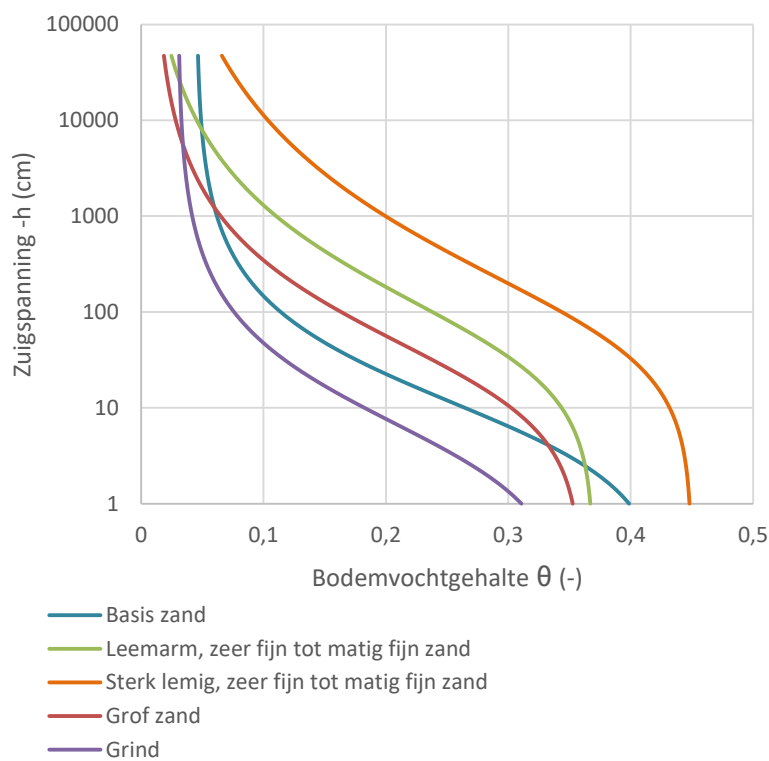
4.2.3 Materiaal van de bovengrond / wegfundering

In het basismodel zijn voor de wegfundering (de bodem tot 1.5 meter diepte) de parameterwaarden van een standaard zandtype gebruikt zoals deze in Hydrus is ingebouwd (zie Bijlage I). Simulaties voor verschillende materialen in de bovengrond zijn uitgevoerd, waarvan de resultaten in Figuur 4-9 zijn weergegeven. De resultaten laten zien dat de eigenschappen van de bovengrond invloed hebben op de temperatuur op 1 en 1,5 meter diepte. De parameters zijn gebaseerd op de Staringreeks (Wosten et al., 2001, zie Bijlage I). Dit is een set standaard bodemeigenschappen representatief voor Nederlandse bodems. In eerdere modelstudies naar bodemtemperatuur zijn thermische parameters gevalideerd met het 1D-BTM. Deze zijn echter niet direct toepasbaar in Hydrus, omdat in dit model deze eigenschappen worden berekend vanuit de vochtbalans en de temperatuur en zal daarmee variëren over de diepte, terwijl in het 1D-BTM wordt uitgegaan van constante bodemeigenschappen over de diepte. Het is bekend dat literatuurwaardes sterk variëren met bodemtype. De werkelijke eigenschappen van het materiaal van wegfunderingen zijn niet bekend en kunnen per locatie verschillen, maar zullen meestal een goed doorlatend grof materiaal zijn. Naar verwachting zullen deze materiaalsoorten niet heel ander gedag laten zien dan de resultaten voor zand en fijn zand (in tegenstelling tot veen en klei).

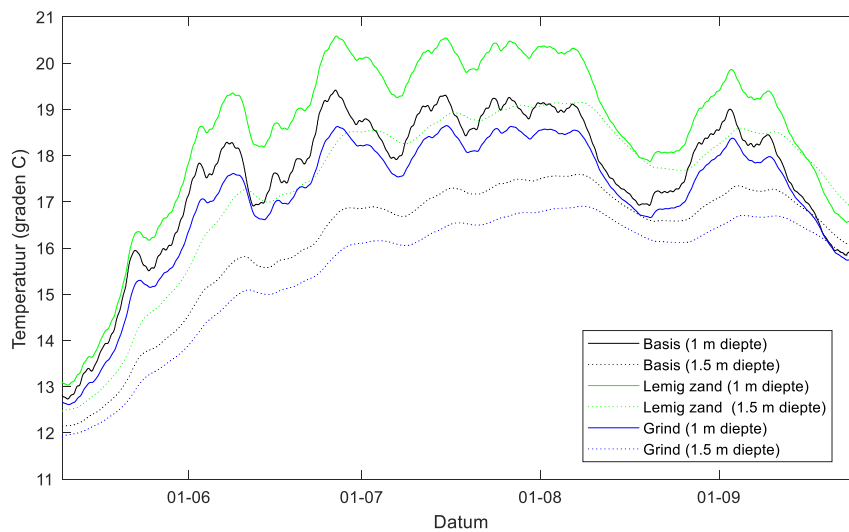
De belangrijkste verklaring van deze verschillen blijkt uit de bodemvocht karakteristieken van deze bodems (Figuur 4-10). De maximumtemperatuur hangt namelijk samen met het (gemiddelde) vochtgehalte tussen 0 en 100 tot 150 cm boven de grondwaterspiegel. Hierbij moet in gedachten worden gehouden dat een hoger vochtgehalte enerzijds zorgt voor een grotere warmtecapaciteit (meer energie nodig om het op te warmen en koelt langzamer af), maar anderzijds zorgt voor een grotere geleiding van de warmte (ten opzichte van lucht). Het laatste effect is in dit geval leidend, de bodemtypen die meer water kunnen bevatten bij gelijke drukhoogte, isoleren minder goed en warmen op tot hogere temperaturen (Figuur 4-11). De conclusie is dat modelvalidatie met lokale data belangrijk is bij toepassen van het model.



Figuur 4-9. Verdeling van de maximum temperatuur op de observatiepunten over de breedte van de straat in het basisscenario, vergeleken met andere materialen als bovengrond/wegfundering tot een diepte van 1.5 meter.



Figuur 4-10. Waterretentiekarakteristieken van bodemtypen die als wegfundering zijn gebruikt in de simulaties. De grafiek geeft het bodemvochtgehalte weer bij verschillende zuigspanningen (negatieve drukhoogten). Onder evenwichtsomstandigheden komt de zuigspanning overeen met de afstand tot de grondwaterspiegel.



Figuur 4-11. Tijdreeksen van de temperatuur op 1 en 1.5 m diepte (op een afstand van 0.25 vanaf de linkerrand van het model) voor de basissimulatie en de simulaties met lemig zand en grind als wegfundering/bovengrond.

4.2.4 Droge en vochtige omstandigheden

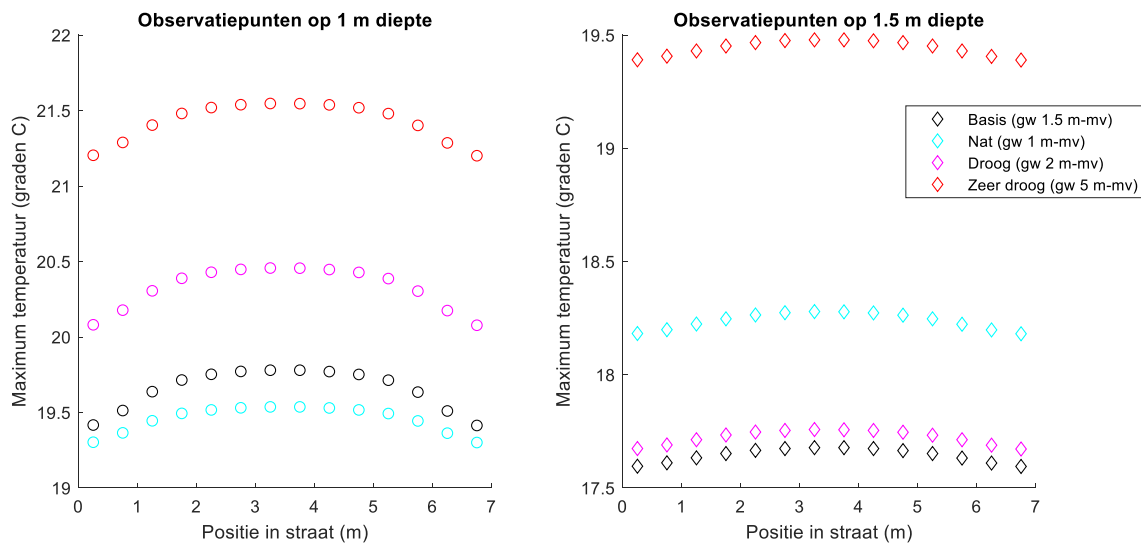
Het effect van aanwezig bodemvocht is ook gesimuleerd door de opgelegde grondwaterstand te variëren (Tabel 4-3) ten opzichte van het basisscenario. De bodemvochtpercentages verschillen op 1 meter diepte relatief weinig, door het slechte vochthoudende vermogen van zand. In de praktijk wordt de hoeveelheid bodemvocht beïnvloed door verschillende factoren, zoals drainageniveau, bodemtype en infiltratiecapaciteit van het oppervlak (type verharding of speciale constructies zoals wadi's).

Het effect van de verschillende vochtgehalten op de maximumtemperatuur op de observatiepunten is weergegeven in Figuur 4-12. Onder droge omstandigheden bereikt de bodem op 1 meter diepte een hogere temperatuur dan onder vochtige omstandigheden. Dit wordt onder andere verklaard door de relatief hoge warmtecapaciteit van water; om een droge bodem op te warmen is minder energie nodig dan om een vochtige bodem op te warmen.

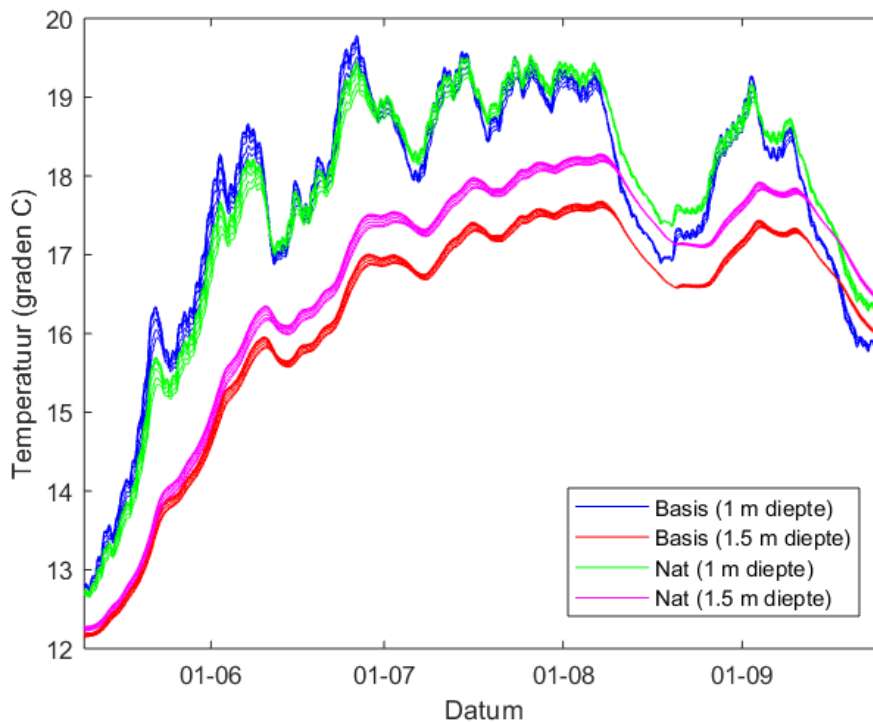
Opvallend is dat dit effect op 1,5 m diepte niet lijkt te gelden voor het natte scenario (grondwaterstand op 1 m onder het maaiveld). Op deze diepte gaat namelijk warmtegeleiding een grotere rol spelen, die in verzadigde omstandigheden veel groter is dan onder onverzadigde omstandigheden (lucht geleidt warmte slecht). Figuur 4-13 geeft het temperatuurverloop over de tijd weer voor het basisscenario en het natte scenario. In het natte scenario zijn de temperatuurfluctuaties afgezwakt; een vochtige bodem warmt minder snel op, maar koelt ook minder snel af. De temperatuurverschillen tussen de twee verschillende observatiedieptes zijn in het natte scenario kleiner door de grotere warmtegeleiding.

Tabel 4-3. Grondwaterstand en gemiddeld bodemvochtgehalte op 1 meter diepte in het basisscenario en het droge en natte scenario.

Scenario	Grondwaterstand (m-mv)	Bodemvocht op 1 m (cm ³ /cm ³)
Nat	1	0,4300
Basis	1,5	0,0593
Droog	2	0,0495
Zeer droog	5	0,0454



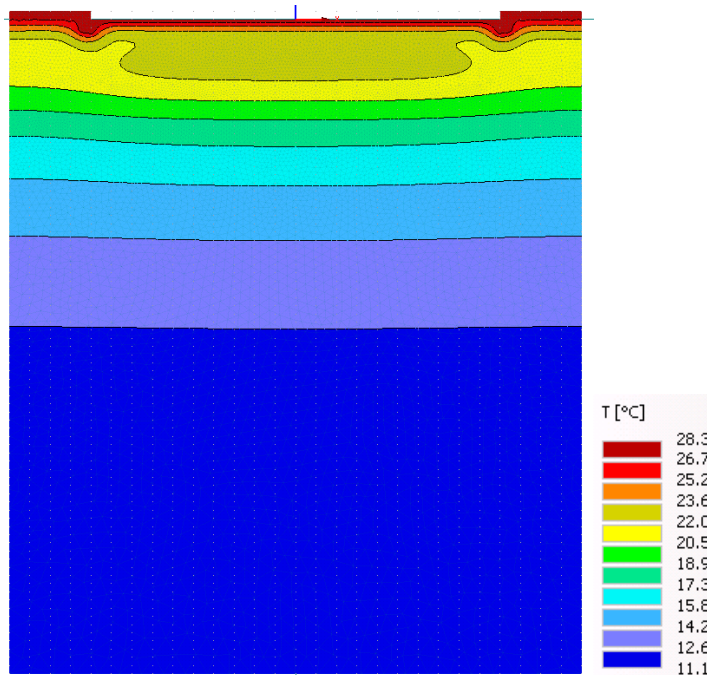
Figuur 4-12. Verdeling van de maximum temperatuur op de observatiepunten over de breedte van de straat in het basisscenario, droge en natte scenario.



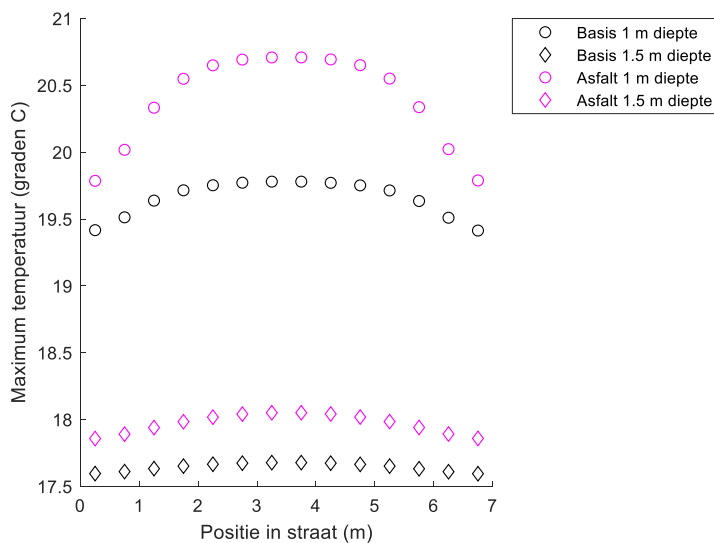
Figuur 4-13. Temperatuurverloop op de waarnemingspunten in het basisscenario en het natte scenario (met de grondwaterstand verhoogd tot 1 m onder maaiveld).

4.2.5 Materiaal van het wegdek

Het effect van het materiaal van het wegdek is onderzocht door de basissimulatie te vergelijken met een wegdek van asfalt, waarop de temperatuur tijdens warme dagen hoger wordt dan op beton (Figuur 4-14). Door de hogere temperatuur op het wegdek vindt er in deze situatie meer warmtetransport naar de ondergrond plaats, waardoor ook de maximumtemperaturen (Figuur 4-15) in de ondergrond hoger worden. Dit effect beperkt zich niet tot enkel onder het wegdek, maar straalt uit naar de ondergrond onder het trottoir.



Figuur 4-14. Temperatuurverdeling onder een straat met een wegdek van asfalt en een trottoir met betonnen tegels op dag 78 (27 juni, 17 uur). Dit is een namiddag tijdens een typische warme dag, gekozen omdat het illustratief was.



Figuur 4-15. Verdeling van de maximum temperatuur op de observatiepunten over de breedte van de straat met een wegdek met betonnen klinkers (basis) en asfalt.

4.3 Kwantificeren effect maatregelen

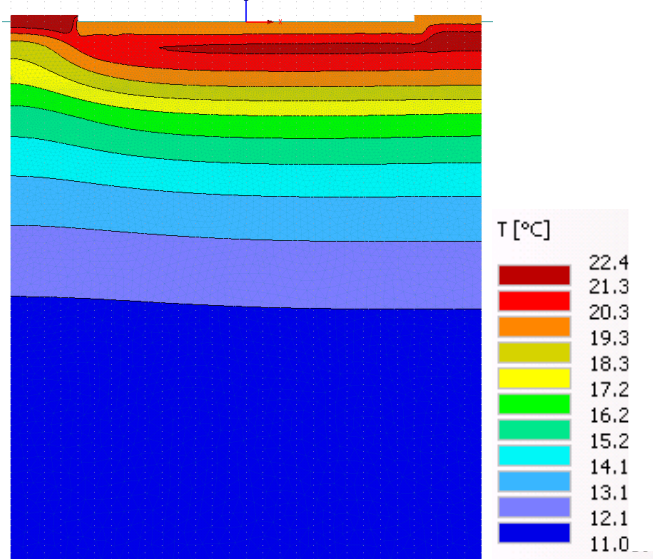
4.3.1 Betegelde stoep versus groenstrook

Wanneer één van de trottoirs wordt vervangen door een groenstrook van 1 meter breed, verandert de opgelegde temperatuur op het oppervlak op deze strook sterk (zie Figuur 4-2 en Figuur 4-3). Ook veranderen de eigenschappen van de ondergrond en is er infiltratie van regenwater mogelijk, waardoor er hogere vochtgehalten kunnen voorkomen.

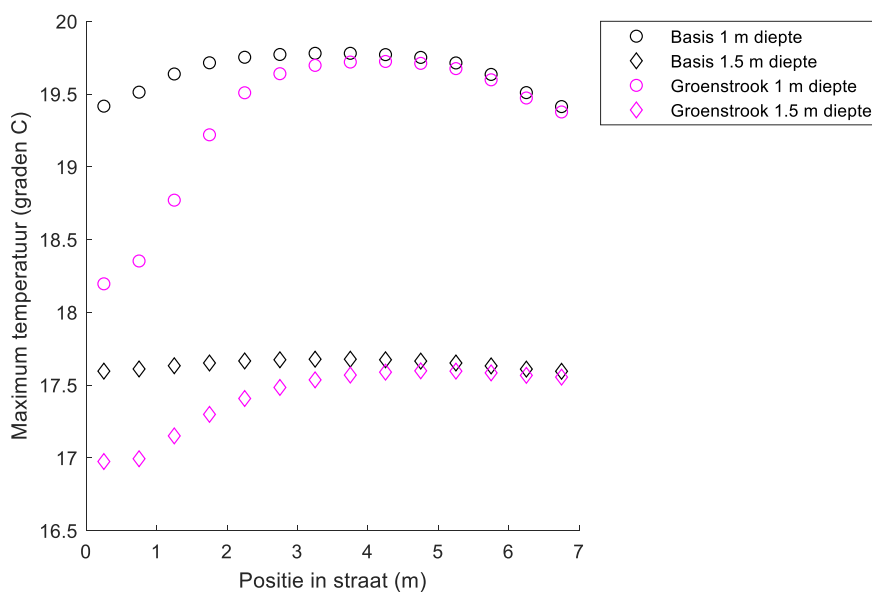
De resultaten laten zien dat de maximum temperatuur onder de groenstrook (Figuur 4-19) duidelijk lager zijn dan de temperatuur onder het betegelde trottoir. Het koelende effect is ook buiten de groenstrook nog enkele meters

zichtbaar. Wel wordt het effect snel minder, aanbeveling is dan ook om de ligging van de drinkwaterleiding middenin de groenstrook te positioneren.

Bij de interpretatie van dit scenario moet rekening worden gehouden met het feit dat de gebruikte temperatuurdata van het oppervlak met gras gebaseerd zijn op gras dat meestal van voldoende water was voorzien. De groenstrook die in dit scenario is doorgerekend was gedurende de simulatie vaak niet van voldoende water voorzien (werkelijke totale transpiratie was 201 mm terwijl de potentiële transpiratie van deze periode 530 mm bedroeg). In werkelijkheid zouden daarom aan het oppervlak hogere temperaturen te verwachten zijn dan nu opgegeven in de randvoorwaarden (gras met voldoende water dat bijna optimaal verdampt), doordat er minder transpiratie plaatsvindt en mogelijk ook door eventuele verdroging van het gewas, waarbij eigenschappen zoals albedo (de mate waarin het aardoppervlak energie weerkaatst), warmtecapaciteit en bedekking kunnen veranderen. Hoeveel hogere temperaturen te verwachten zijn is binnen de scope van het huidige onderzoek niet na te gaan.



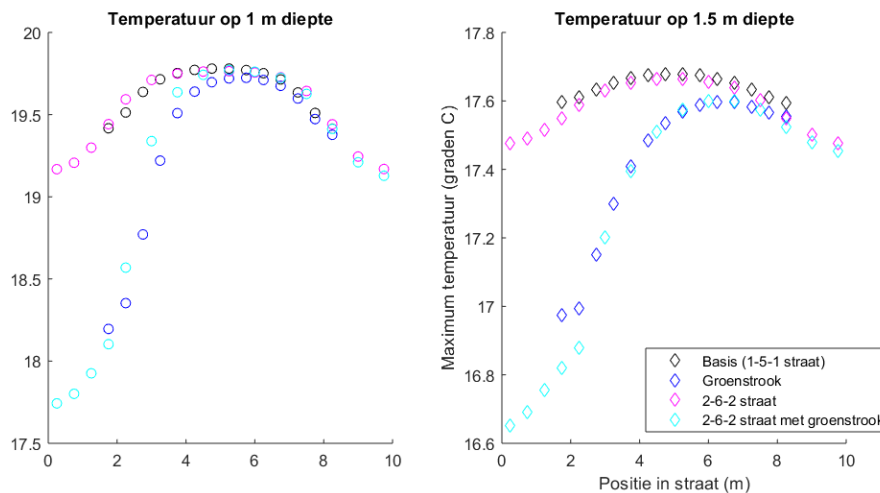
Figuur 4-16. Temperatuurverdeling onder een straat met een wegdek van betonklinkers, waarbij het linker trottoir vervangen is door een groenstrook met gras, 's nachts na een warme dag (28 juni, 2:00 uur).



Figuur 4-17. Verdeling van de maximum temperatuur op de observatiepunten over de breedte van de straat met een trottoir met tegels (basis) en een groenstrook.

4.3.2 Bredere straat en trottoirs

Het basisscenario en de simulatie met de groenstrook zijn tevens uitgevoerd voor een bredere straat, met trottoirs van 2 meter breed en een weg van 6 meter breed. De totale breedte van het model is hiermee 10 meter t.o.v. 7 meter in het basisscenario. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 4-18. Uit de simulaties blijkt dat in het midden van een bredere straat de maximumtemperatuur niet sterk afwijkt van een smallere straat. Een breder trottoir zorgt echter wel voor iets meer koeling. Ook een bredere groenstrook zorgt voor meer koeling, omdat het koelere grasoppervlak in verhouding tot het volledige oppervlak groter is.

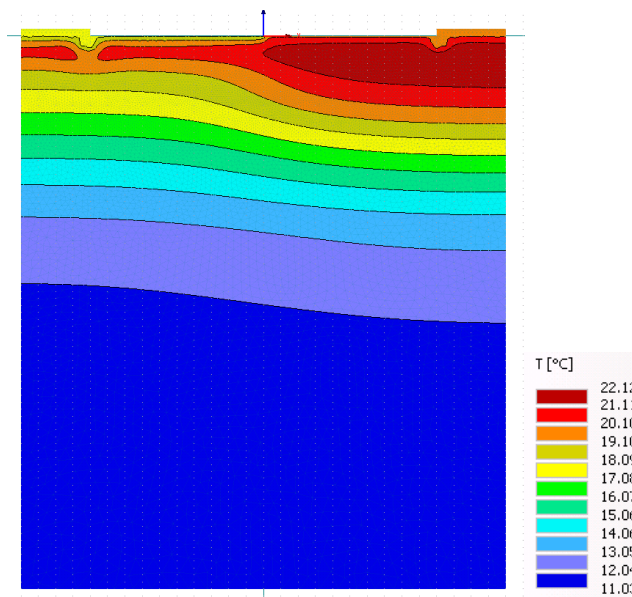


Figuur 4-18. Verdeling van de maximumtemperatuur op de observatiepunten over de breedte van de straat met een trottoir met tegels (basis) en een groenstrook voor een smallere straat (1-5-1 m verdeling) en een bredere straat (2-6-2 verdeling).

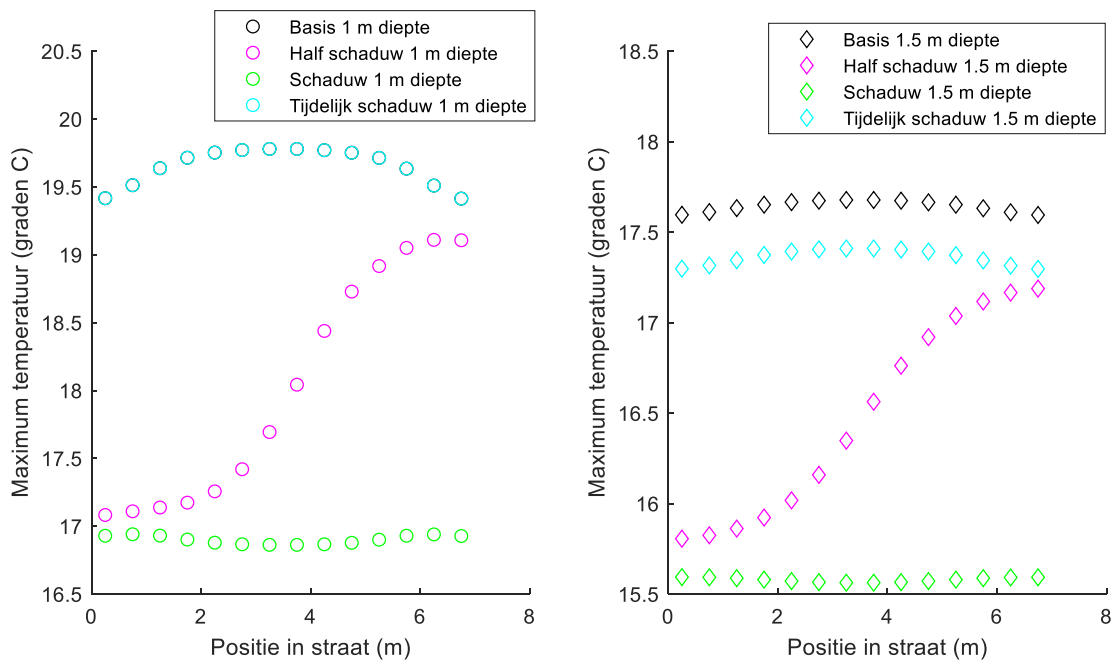
4.3.3 Zon en schaduw

Het effect van schaduw (zoals door bomen) is onderzocht door het basisscenario te vergelijken met de simulaties waarin de helft (in dit geval de linkerhelft van het dwarsprofiel) of de hele straat is voorzien van schaduw. Dit betekent dat er een lagere oppervlaktetemperatuur is (een halvering van de temperatuurpieken tijdens de dag vergeleken met beton in de zon, zoals beschreven in paragraaf 4.1.2 en Figuur 4-3). Naast deze simulatie is ook onderzocht wat de invloed is van de **tijdelijke** creatie van schaduw tijdens een hittegolf. Hierbij is uitgegaan van de temperatuur onder zonnige omstandigheden, behalve tijdens de eerste hittegolf van die zomer (15 juli tot 27 juli 2018). Gedurende deze eerste hittegolf is de temperatuur van schaduwomstandigheden opgelegd (halvering van de temperatuurpieken tijdens de dag vergeleken met beton in de zon).

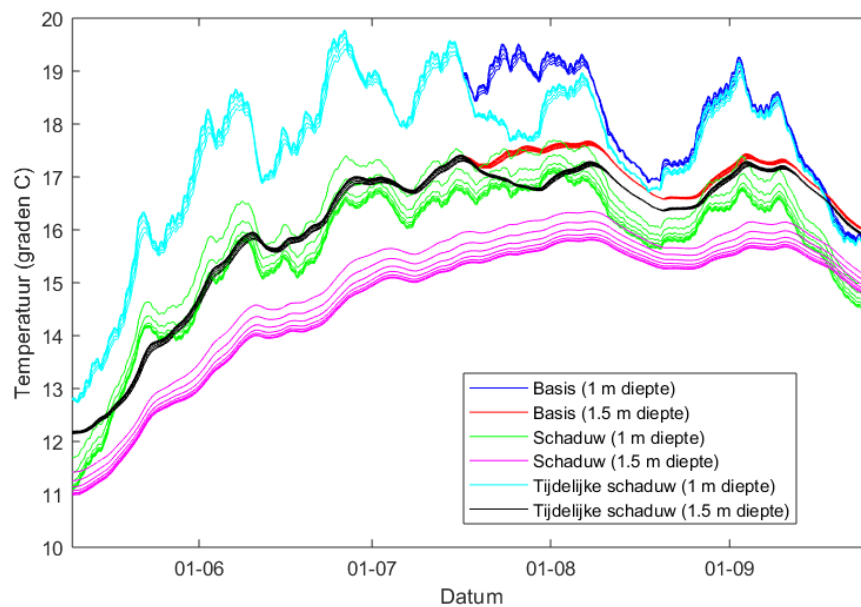
Figuur 4-19 geeft de temperatuurverdeling weer na een warme dag op een hal beschaduwde straat. Door de lagere temperaturen op het beschaduwde deel is het warmtetransport naar de ondergrond op die plek lager. Figuur 4-20 geeft het effect op de maximumtemperatuur op de verschillende observatiepunten weer voor de verschillende schaduwscenario's. Hieruit blijkt dat schaduw een duidelijk koelend effect heeft, dat ook bij halfschaduw nog kan uitstralen naar het zonnige deel van de straat. Andersom heeft het zonnige deel een verwarmende invloed op het beschaduwde deel. Tijdelijke creatie van schaduw tijdens de hittegolf had weinig invloed op de maximumtemperatuur op 1 m diepte, omdat de piektemperatuur reeds voor deze periode bereikt was. Het effect van de tijdelijke schaduw is beter zichtbaar in Figuur 4-21 waaruit blijkt dat tijdelijke schaduw wel een effect heeft op de temperatuur in de ondergrond, waarbij verdere opwarming wordt tegengegaan.



Figuur 4-19. Temperatuurverdeling in de doorsnede van de ondergrond van de straat op $t = 78.6$ in de simulatie waarin de linkerhelft van de straat beschadwd is (zoals door een boom).



Figuur 4-20. Verdeling van de maximum temperatuur op de observatiepunten over de breedte van de straat op 1 m diepte (links) en 1.5 m diepte (rechts). In het linkerfiguur ligt het basisscenario over de tijdelijke schaduw heen, omdat de maximum temperatuur niet tijdens de hittegolf viel.



Figuur 4-21. Verloop van de temperatuur over de tijd voor verschillende observatiepunten (1 m en 1.5 m diepte) voor het basisscenario, het scenario met volledige schaduw en de tijdelijke schaduw tijdens de hittegolf.

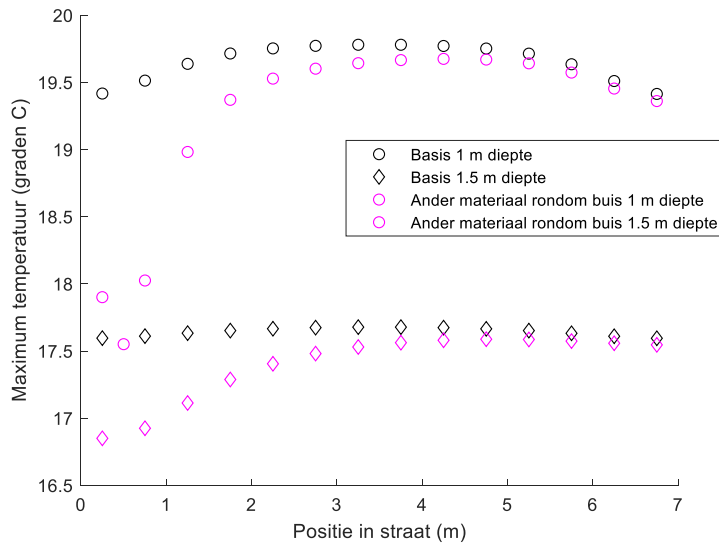
4.3.4 Aangepast bodemmateriaal rondom waterleiding

Funderingen onder straten en trottoirs bevatten vaak zand, grind of ander materiaal, waardoor water goed weg kan stromen en dat water niet goed vasthoudt (in de voorliggende studie is hiermee geen rekening gehouden, er is uitgegaan van zand in de bovenste 1,5 meter). Andere bodemmateriaal zoals mengsels met meer klei of veenachtig materiaal houden water beter vast, maar zijn minder geschikt voor funderingen, omdat deze mechanisch minder sterk zijn (bijvoorbeeld kans op inklinking, waardoor delen kunnen verzakken).

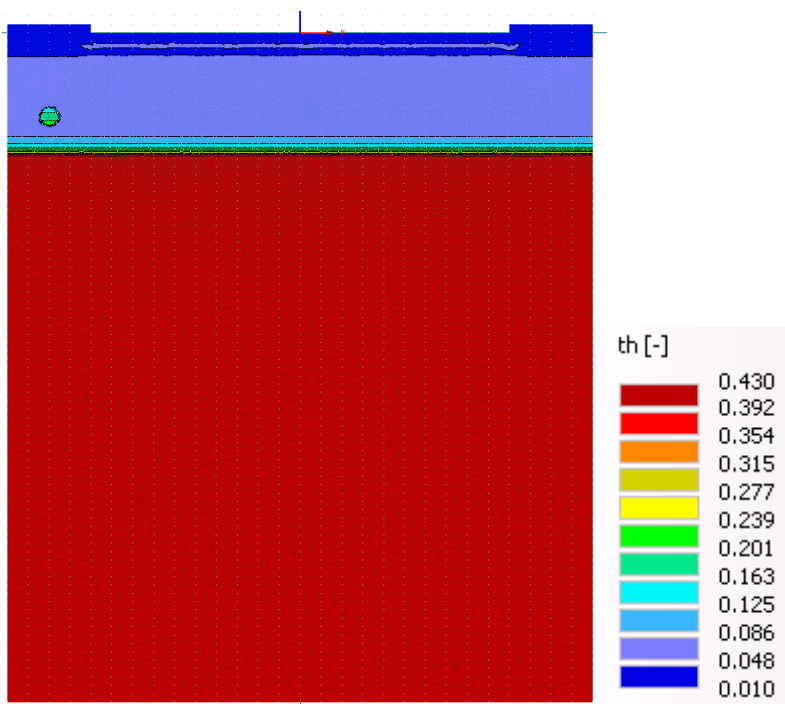
Aangezien bodemvocht (4.2.4) een sterke invloed heeft op de maximumtemperatuur die bereikt wordt, wordt in dit onderdeel aanvullend onderzocht of de aanpassing van het bodemmateriaal rondom de waterleiding invloed zou kunnen hebben op de maximumtemperatuur, door middel van een hoger vochtgehalte onder evenwichtsomstandigheden. Door dit materiaal alleen rondom de leidingen te gebruiken, kan de isolatie door de drogere zandlaag erbovenop behouden blijven (zie 4.2.3 en 4.2.4). Hierbij kan gedacht worden aan zand van een fijnere textuur of het toevoegen van materiaal dat vocht beter vasthoudt, zoals organische stof, leem of klei, of speciaal voor de landbouw ontwikkelde chemische toevoegingen, zoals hydrogels (Farrell et al., 2013; Montesano et al., 2015). Steenwol met hydrofiele vezels is een materiaal dat reeds onder sportvelden wordt toegepast, en kan bijdragen aan een verhoogd vochtgehalte en een stabielere bodem (het wordt toegepast in keepeergebieden van voetbalvelden, pers. comm. Gijsbert Cirkel, KWR). Rondom elektriciteitskabels kan speciaal soort zand ('backfill sand' of 'thermal sand') worden gebruikt. Dit zand kenmerkt zich door een zeer hoge warmtegeleiding, doordat het vochtig blijft, ook wanneer er veel hitte van de kabels af komt (Parmar and Steinmanis, 2003). Deze eigenschap wordt verkregen door een bepaalde korrelgrootteverdeling en compactie. Verdere eigenschappen van dit materiaal zijn niet bekend. Verbeterde bodemeigenschappen kunnen gebaseerd zijn op warmtegeleiding (dit is bijvoorbeeld ook het principe van isolatiemateriaal, zoals PUR, die is gebaseerd op het creëren van weerstand tegen warmtestroom) of het veranderen van de warmtecapaciteit. Dit zijn andere principes.

Figuur 4-22 geeft de maximumtemperatuur aan op de observatiepunten in het scenario waar in een straal van 10 cm rondom een punt onder het midden van het trottoir, op 1 m diepte, aangepast materiaal is aangebracht. Om het effect goed weer te geven, is een extra observatiepunt op $X=0,5$ m op 1 m diepte ingevoegd. Rondom deze zone is de maximumtemperatuur lager dan de rest van de straat, wat te verklaren is door het hogere vochtgehalte rondom dit punt (18%, Figuur 4-23), terwijl het materiaal er omheen relatief droog blijft, waardoor temperatuurfuctuaties minder snel doordringen (Figuur 4-24). Hierbij moet worden opgemerkt dat niet

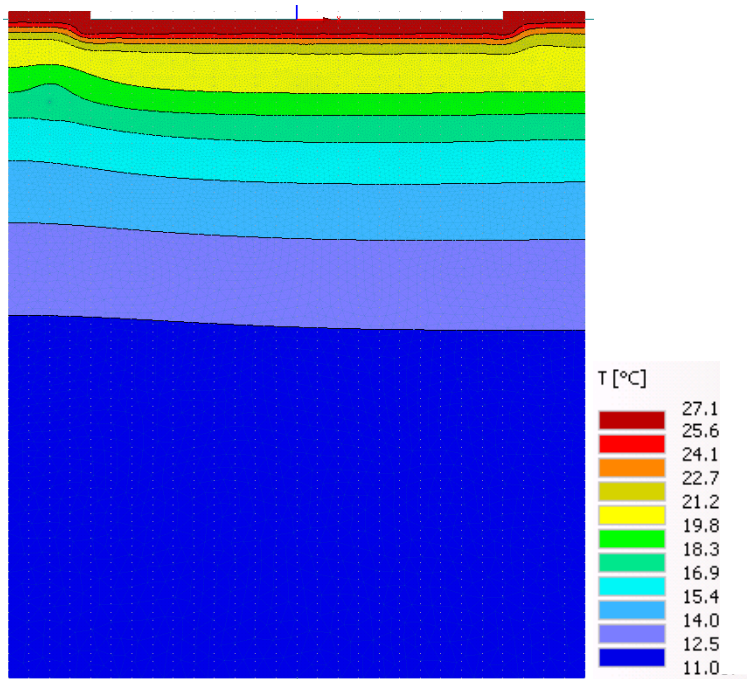
onderzocht is wat de invloed van deze aanpassingen is op de mechanische eigenschappen van de ondergrond zijn en of dergelijk materiaal anderzijds geschikt zou zijn voor het gebruik in (trottoir)funderingen. Ook kan de nabijheid tot de zijrand van het model (waar geen warmtetransport plaatsvindt) hier van invloed zijn en het waargenomen koelende effect versterken.



Figuur 4-22. Verdeling van de maximum temperatuur op de observatiepunten over de breedte van de straat, met aangepast materiaal onder het midden van het linker trottoir, op 1 meter diepte. Let op: met ander materiaal wordt hier ander bodemmateriaal bedoeld, geen isolatielaag.



Figuur 4-23. Volumetrisch vochtgehalte in de ondergrond in het scenario waarbij het bodemmateriaal rondom een punt op 1 m diepte onder het trottoir is vervangen door materiaal dat vocht beter vasthoudt.



Figuur 4-24. Temperatuurverdeling in de ondergrond op dag 78 (27 juni, 17 uur) in het scenario waarbij het bodemmateriaal rondom een punt op 1 m diepte onder het trottoir is vervangen door materiaal dat vocht beter vasthoudt.

4.4 Discussie

4.4.1 Kanttekeningen bij resultaten van de modellering

De beschreven simulaties vertegenwoordigen een beperkt aantal voorbeelden van mogelijke situaties, waarbij uitgegaan is van vrij extreme randvoorwaarden (temperatuur van een bitumen dak in de zon en een van voldoende water voorzien gras-oppervlak, volledige zon en/of volledige schaduw). De resultaten hiervan zijn niet gevalideerd aan de werkelijkheid. Werkelijke situaties kunnen allerlei combinaties en varianten van deze (en andere) randvoorwaarden en materiaaleigenschappen bevatten, waardoor de berekende temperaturen mogelijk niet goed vergelijkbaar zijn met de werkelijkheid. Wel kunnen deze simulaties een indruk geven van de mogelijke effecten van bepaalde omstandigheden, door de resulterende temperaturen onderling te vergelijken.

Eén van de aannamen is dat er geen water- en warmtetransport plaatsvindt aan de zijkanten van het model (geen laterale stroming). Deze aanname is niet terecht in situaties waarin er sprake is van sterkere of juist kleinere temperatuurfluctuaties aan het oppervlak naast het trottoir. In het geval dat er direct naast het trottoir gebouwen staan, wordt verwacht dat deze invloed hebben op de temperatuurfluctuaties aan het bodemoppervlak (kruipruimte of de kelder). Hoewel beperkt data beschikbaar is (in Mihalakakou et al. (1995) wordt aannemelijk gemaakt dat temperatuurfluctuaties optreden door het jaar heen, maar deze situatie is niet representatief voor een gemiddelde straat in West-Nederland), wordt verwacht dat temperatuurfluctuaties onder een gebouw doorgaans gematigder zijn dan daarbuiten. Tijdens een warme zomer zou dit betekenen dat het oppervlak onder een gebouw minder snel opwarmt dan op de weg en het trottoir. Het gevolg hiervan is dat de warmte zich ook in laterale richting kan verspreiden, waardoor er op 1 m diepte iets minder opwarming plaatsvindt onder het trottoir, nabij het gebouw. Voor groene tuinen of schaduwrijke plekken naast het trottoir zou ook verwacht worden dat deze een lichte afname van de opwarming kunnen betekenen. Ook zijn er situaties denkbaar waarbij er juist sterke temperatuurfluctuaties voorkomen naast het trottoir. Bijvoorbeeld wanneer kelders en kruipruimten ook opwarmen bij warm weer, maar ook bij kaderanden (langs grachten) kunnen de verticale randen (net als andere verharde oppervlakken) relatief grote temperatuurfluctuaties vertonen. Nabij dergelijke locaties kan daarom juist een sterkere opwarming van de bodem bij de waterleiding plaatsvinden. Ook kunnen andere omstandigheden of materialen in de bodem zelf effect hebben, zoals veranderde temperatuurfluctuaties nabij rioleringsbuizen, straatkolken of elektriciteitskabels.

Er is in deze studie niet gekeken naar het gecombineerde effect van omstandigheden en/of maatregelen. Bijvoorbeeld, een bovenlaag van lemig zand in combinatie met een ondergrond van veen, of maatregelen om het bodemvocht langer vast te houden in combinatie met het aanbrennen van schaduw door bomen. Het is niet gezegd dat de individueel gesimuleerde effecten van deze omstandigheden en maatregelen bij elkaar optellen als ze in combinatie optreden. Dit zal nader moeten worden onderzocht.

4.4.2 Interpretatie van de resultaten

Verschillende factoren dragen bij aan minder verhitting rondom drinkwaterleidingen tijdens warme perioden:

- **Lokale omstandigheden.** Verschillende lokale omstandigheden, waaronder de eigenschappen van de ondergrond en de diepte waarop de temperatuur constant is, zijn van invloed op de (maximum) temperatuur in de ondergrond. De resultaten zijn daarom niet direct vertaalbaar naar de omstandigheden op een willekeurige locatie, maar kunnen wel gebruikt worden om de relatieve effecten van verschillende maatregelen onderling te kunnen vergelijken.
- **Bodemvocht.** Bodemvocht tussen het oppervlak en de drinkwaterleiding zorgt voor een verhoogde warmtecapaciteit en minder opwarming. Hogere vochtgehalten kunnen echter zorgen voor meer warmtegeleiding, terwijl lucht juist isoleert.

De resultaten van 1.2.3 en 1.2.4 laten zien dat het effect van het bodemvochtgehalte niet eenduidig is, doordat zowel geleiding als warmtecapaciteit een rol kunnen spelen voor de uiteindelijke temperatuur van de ondergrond. Een meer systematische analyse zou hier meer inzicht kunnen bieden. Mogelijk is het gunstig als van zowel isolatie met lucht gebruik gemaakt kan worden in de bovenste bodemlagen als van vertraging van de opwarming door hogere vochtgehalten in diepere bodemlagen. Bij verder onderzoek kan gezocht worden naar een verhoging van de warmtecapaciteit en een verlaging van de warmtegeleiding van het (bodem)materiaal.

- **Type verharding.** Asphalt warmt sterker op tijdens warme zomerdagen dan andere typen verharding. De ondergrond bereikt daarbij hogere temperaturen. Dit effect straalt ook uit naar de ondergrond onder nabijgelegen oppervlakken, zoals onder het trottoir.
- **Groen.** De temperatuurfluctuaties op groenstroken zijn (in ieder geval wanneer deze van voldoende vocht worden voorzien) veel gematigder dan op verharde oppervlakken. Dit effect werkt door naar de ondergrond.
- **Diepere ligging.** Dieper in de ondergrond wordt de temperatuur stabiel en lager.
- **Schaduw.** Schaduw met bijvoorbeeld bomen voorkomt sterke opwarming van het oppervlak tijdens warme dagen met veel zon. Tijdelijk aanbrengen van schaduw tijdens hittegolven (zoals luifels of parasols) kan pieken afvlakken (en daarmee kunnen voorkomen dat de temperatuur op één of meerdere dagen boven 25°C uit komt), maar in dit onderzoek bleek dat hoogste temperatuurpiek reeds vóór een hittegolf te verwachten zou zijn, waardoor dit lastig toepasbaar zou zijn. Of dit in werkelijkheid en in andere jaren ook het geval is zou verder onderzocht kunnen worden.

5 Kwantificeren maatregelen met een watertemperatuurmodel

5.1 Aanpak bepalen watertemperatuur

In Moerman (2013) staat de achtergrond beschreven van het modelleren van de temperatuur van drinkwater in het leidingnet als een functie van tijd.

$$\ln\left(\frac{T_{\infty} - \langle T \rangle}{T_{\infty} - T_0}\right) = \frac{-4h}{\rho c_p D} t$$

Waarbij $\langle T \rangle$ de temperatuur in een controlevolume in de leiding is, $T_{\infty} - \langle T \rangle$ het temperatuurverschil met de bodem en $T_{\infty} - T_0$ het oorspronkelijke temperatuurverschil, D is de leidingdiameter, ρ de dichtheid en c_p de warmtecapaciteit van water. De parameter h is de warmte-overdrachtscoëfficiënt (ofwel de “weerstand tegen opwarmen”). Deze parameter bestaat uit 3 delen, namelijk de coëfficiënt van water, de leiding en de omringende bodem. In de berekeningen is rekening gehouden met een laag om de leiding heen van 0,5 diameter waarbinnen warmte-uitwisseling met de leiding plaatsvindt. Het meenemen van dit bodemlaagje rond de leiding betekent in praktijk dat het langer duurt voordat het leidingwater is opgewarmd dan zonder de uitwisseling met dit bodemlaagje. Er is nog niet bekend hoe dik dit bodemlaagje precies moet zijn, de inschatting is een beperkte dikte bij kleine diameters.

Warmteoverdracht vindt plaats via conductie, convectie en straling. Afhankelijk van de stroomsnelheid van het water is de convectieve term meer of minder van belang. Het Nusselt getal beschrijft de verhouding tussen convectie en conductie. Dit is afhankelijk van het Reynolds getal, een maat voor de turbulentie.

$$Re = \frac{vD\rho}{\mu}$$

Waar v de stroomsnelheid is en μ de dynamische viscositeit. We hebben het volgende aangenomen voor het Nusselt getal (Blokker and Pieterse-Quirijns, 2013, 2018; Moerman, 2013):

$$Nu = \begin{cases} 1, & \text{als } v < 10^{-5} \\ 5.8, & \text{als } Re \leq 2300 \\ 0.027 Re^{0.8} Pr^{1/3}, & \text{als } Re > 2300 \end{cases}$$

Waarbij $Re < 2300$ duidt op laminaire omstandigheden en $Re > 2300$ op turbulente omstandigheden. De parameter Pr is het Prandtl getal en beschrijft de verhouding tussen impulsoverdracht en warmteoverdracht.

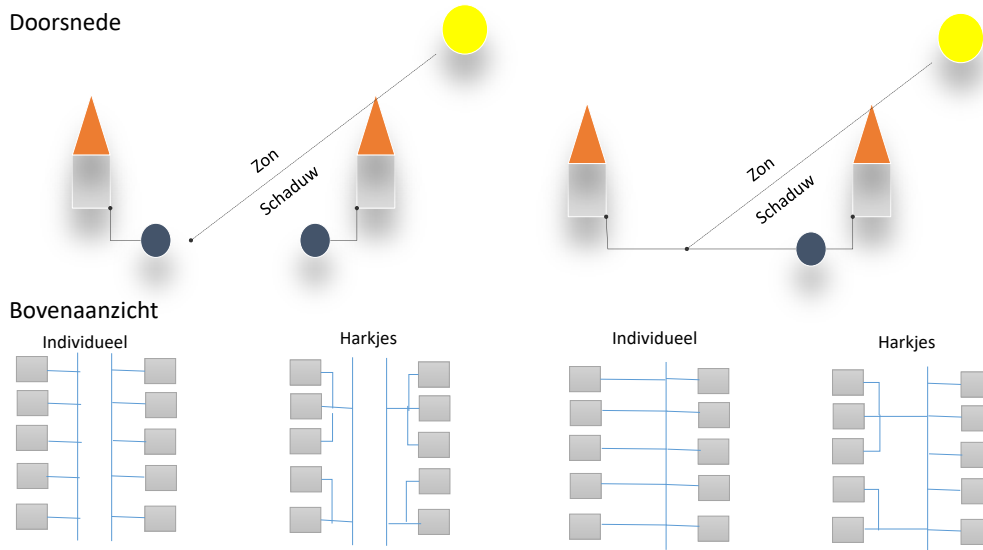
5.2 Enkelzijdig versus dubbelzijdig aanleggen

5.2.1 Achtergrond

Er zijn verschillende opties om distributienetten aan te leggen, zie ook Figuur 5-1:

- Dubbelzijdig: bij deze optie worden distributieleidingen aan weerszijden van de straat aangelegd en takken de aansluitleidingen individueel middels de kortste route naar de watermeter af van deze distributieleidingen.
- Dubbelzijdig variant harkjes: bij deze optie worden distributieleidingen aan weerszijden van de straat neergelegd, maar takken de aansluitleidingen gebundeld in harkjes af naar de watermeters (bv. bij portiekwoningen).

- Enkelzijdig: bij deze optie worden distributieleidingen aan één zijde van de straat aangelegd en takken de aansluitleidingen individueel af met de kortste route naar de watermeters. De aansluitleidingen voor één zijde van de straat lopen dus onder de weg door en zijn gemiddeld langer dan bij dubbelzijdig aanleggen. Van de enkelzijdige varianten is dit de variant met de minst lange aansluitleidingen.
- Enkelzijdig variant harkjes: bij deze optie worden distributieleidingen aan één zijde van de straat aangelegd, maar takken de aansluitleidingen gebundeld in harkjes af naar de watermeters. In deze optie zijn er dus maar een aantal locaties waar een bundel aansluitleidingen onder de weg door loopt. Dit is de variant met de langste aansluitleidingen.



Figuur 5-1 Schematische weergave van enkelzijdig versus dubbelzijdig aanleggen.

In de Richtlijn drinkwaterleidingen buiten gebouwen staat aangegeven dat aansluitleidingen zo recht mogelijk moeten zijn en de kortst mogelijke route moeten volgen tussen distributieleiding en het leveringspunt. De DPWE drinkwaterbedrijven houden daarnaast de volgende standaarden aan om te kiezen tussen de verschillende opties in Figuur 5-1 (drie bedrijven hebben een werkwijze aangeleverd):

- Eén bedrijf gaat uit van een standaard situatie met enkelzijdig aanleggen (er wordt geen variant gespecificeerd). De randvoorwaarden op basis waarvan wordt afgeweken van de standaard en wordt gekozen voor dubbelzijdige aanleg zijn o.a. >15m tussen erfgrenzen, de aanwezigheid van drukke (asfalt)verkeerswegen, onacceptabele beheerkosten i.v.m. afwijkende wegfundatie, de aanwezigheid van een tramspoor in de middenberm, het aanwezig zijn van ondergrondse obstakels, veel bomen en beplanting.
- Eén bedrijf kiest voor dubbelzijdig aanleggen indien aan weerszijden van de straat woningen staan en de afstand van de onderlinge tracés meer dan 8 meter bedraagt. Hiervan kan worden afgeweken indien de som van 'oversteken' van de aansluitleidingen groter is dan de eventuele benodigde tweede drinkwaterleiding.
- Eén bedrijf hanteert een lokale afweging op kosten, waarbij ook aspecten relevant voor het lokale netwerk ontwerp worden meegewogen, zoals zelfreinigendheid en de mogelijkheid tot het plaatsen van brandkranen.

5.2.2 Resultaten modelberekeningen

We gaan er vanuit dat bij enkelzijdig aanleggen de distributieleiding aan de schaduwzijde van de straat wordt aangelegd. We gaan uit van PE aansluitleidingen met een diameter van 25 mm of 32 mm. Het gevolg van het aanleggen in harkjes is dat aansluitleidingen langer worden. Daarom hieronder een overzicht van leidinglengtes met gevolgen voor verblijftijd, Tabel 5-1 en Tabel 5-2, en opwarming, Tabel 5-3 en

Tabel 5-4. De verschillende debieten of volumestromen zijn gekozen op basis van de gemiddelde dagelijkse volumestroom in de aansluitleiding (480 liter per 24 uur voor een gezin met twee volwassenen en twee kinderen) en volumestromen die representatief zijn als er een keukenkraan wordt aangezet (600 l/uur) of wastafelkraan (300 l/uur). We gaan er vanuit dat de temperatuur in de distributieleiding gelijk is aan de temperatuur van de bodem.

Tabel 5-1 Verblijftijden (minuten) in een aansluitleiding van 25 mm onder verschillende omstandigheden.

Scenario	1 m	5m	10m	15m	20m	25m	50m
Debiet 20 l/uur*	1,47	7,36	14,72	22,08	29,44	36,80	73,59
Debiet 300 l/uur	0,1	0,49	0,98	1,47	1,96	2,45	4,90
Debiet 600 l/uur	0,05	0,25	0,49	0,74	0,98	1,23	2,45

*Gemiddeld debiet uitgaand van een gezin met 2 volwassenen en 2 kinderen (480 l/dag)

Tabel 5-2 Verblijftijden (minuten) in een aansluitleiding van 32 mm onder verschillende omstandigheden.

Scenario	1 m	5m	10m	15m	20m	25m	50m
Debiet 20 l/uur*	2,41	12,06	24,12	36,17	48,23	60,29	120,58
Debiet 300 l/uur	0,16	0,80	1,61	2,41	3,22	4,02	8,04
Debiet 600 l/uur	0,08	0,40	0,80	1,21	1,61	2,01	4,02

*Gemiddeld debiet uitgaand van een gezin met 2 volwassenen en 2 kinderen (480 l/dag)

De opwarmtijd in de aansluitleiding is afhankelijk van het temperatuurverschil tussen leidingen in de zon en in de schaduw. Figuur 5-2 laat de opwarmtijden zien van het drinkwater in de aansluitleiding voor temperatuurverschillen tussen zon en schaduw van 1, 2 of 3 °C. Deze temperatuurverschillen zijn realistisch voor de verschillen tussen leidingen die geheel in de zon of geheel in de schaduw liggen. We gaan uit van een hotspotsituatie, waarbij de bodem rond de drinkwaterleiding in de zon 25 °C is. Dat betekent dat we uitgaan van temperaturen in de schaduw van 24, 23 en 22 °C. Tabel 5-3 en

Tabel 5-4 laten de temperatuur zien na 0,5 tot 10 minuten opwarmtijd bij verschillende debieten.

Tabel 5-3 Temperatuur na minuten opwarming voor de verschillende debieten en initiële temperatuurverschillen in een PE aansluitleiding van 25 mm. Voor ieder debiet zijn 3 scenario's uitgewerkt met verschillende temperatuurverschillen tussen zon en schaduw. De kolommen gelabeld met 0,5 tot 10 laten de temperaturen in de aansluitleiding zien na het corresponderende aantal minuten verblijftijd.

Scenario	T0	0,5	1	2	3	5	10
Debiet 20 l/uur*	22	22,08	22,16	22,32	22,47	22,74	23,29
	23	23,05	23,11	23,21	23,31	23,49	23,86
	24	24,03	24,05	24,11	24,16	24,26	24,43
Debiet 300 l/uur	22	22,10	22,19	22,37	22,54	22,85	23,46
	23	23,07	23,13	23,25	23,36	23,57	23,98
	24	24,03	24,06	24,13	24,18	24,28	24,49
Debiet 600 l/uur	22	22,10	22,20	22,38	22,55	22,86	23,48
	23	23,07	23,13	23,25	23,37	23,58	23,99
	24	24,03	24,07	24,13	24,18	24,29	24,49

Tabel 5-4 *Temperatuur na minuten opwarming voor de verschillende debieten en initiële temperatuurverschillen in een PE aansluitleiding van 32 mm. Voor ieder debiet zijn 3 scenario's uitgewerkt met verschillende temperatuurverschillen tussen zon en schaduw. De kolommen gelabeld met 0,5 tot 10 laten de temperaturen in de aansluitleiding zien na het corresponderende aantal minuten verblijftijd.*

Scenario	ΔT	0,5	1	2	3	5	10
Debiet 20 l/uur*	22	22,05	22,10	22,20	22,29	22,47	22,87
	23	23,03	23,07	23,13	23,20	23,31	23,58
	24	24,02	24,03	24,07	24,10	24,16	24,29
Debiet 300 l/uur	22	22,06	22,12	22,23	22,34	22,55	23,00
	23	23,04	23,08	23,16	23,23	23,37	23,67
	24	24,02	24,04	24,08	24,11	24,18	24,33
Debiet 600 l/uur	22	22,06	22,12	22,24	22,35	22,56	23,01
	23	23,04	23,08	23,16	23,23	23,37	23,68
	24	24,02	24,04	24,08	24,12	24,19	24,34

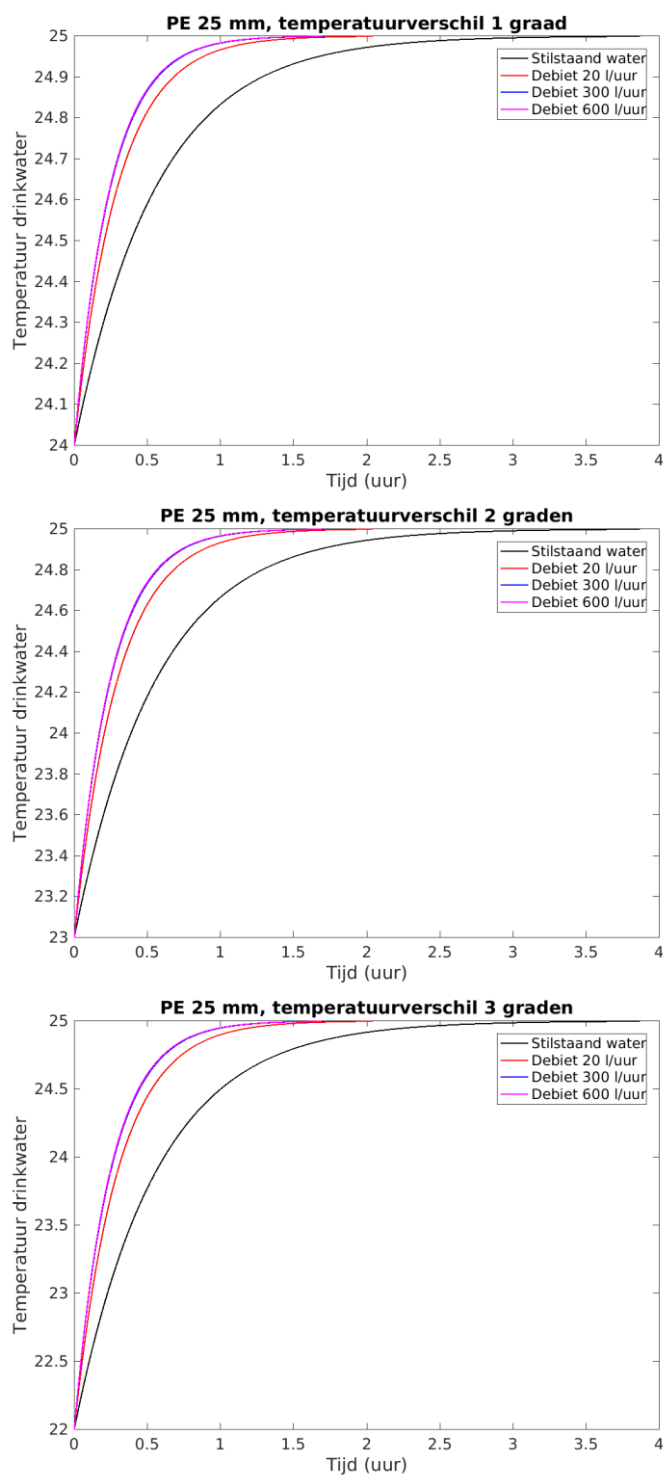
Als wordt uitgegaan van 1 minuut doorspoelen om het water te verversen (dit hanteren alle drinkwaterbedrijven in Nederland als advies aan consumenten na afwezigheid van een week), dan betekent dit bij aansluitleidingen van $\varnothing 25$ mm PE een maximum leidinglengte van 10 meter (300 l/uur) tot 20 meter (600 l/uur), Tabel 5-1. Na deze periode warmt het aangevoerde water vanuit de distributieleiding minder dan een halve graad op in de aansluitleiding, Tabel 5-3. Bij een aansluitleiding van $\varnothing 32$ mm PE is de maximum lengte bij deze doorspoelperiode 5 meter (300 l/uur) tot 10 meter (600 l/uur), Tabel 5-2.3

Indien een acceptabele doorspoeltijd 2 minuten wordt, dan betekent dit bij aansluitleidingen van $\varnothing 25$ mm PE een maximum leidinglengte van 20 meter (300 l/uur) tot 40 meter (600 l/uur). Bij een aansluitleiding van $\varnothing 32$ mm PE is de maximum lengte bij deze doorspoelperiode 12,5 (300 l/uur) tot 25 meter (600 l/uur). Ook binnen deze doorspoelperiode warmt het water uit de distributieleiding minder dan een halve graad in de aansluitleiding².

Een doorspoeltijd van 1 tot 2 minuten komt overeen met de schattingen van afstanden die aansluitleidingen mogen overbruggen vanuit de richtlijnen die de bedrijven hebben opgegeven. Aangezien in de situatie van enkelzijdig aanleggen met individuele aansluitleidingen de aansluitleidingen korter zijn dan in het geval van enkelzijdig aanleggen met harkjes (Figuur 5-1), blijven de temperaturen in aansluitleidingen het laagst in de variant van enkelzijdig aanleggen met individuele aansluitleidingen.

Let wel dat deze analyse alleen over temperatuur gaat en niet over het effect van eventuele verschillen in microbiologie tussen distributieleiding en aansluitleidingen al dan niet in zonnige omstandigheden. Over dit laatste onderwerp wordt ten tijde van het opstellen van deze rapportage een Bedrijfsonderzoek uitgevoerd (biologische stabiliteit drinkwater in relatie tot 25°C). De analyse gaat er van uit dat de aansluitleidingen op een diepte van 1 meter liggen. Indien de aansluitleidingen dieper worden gelegd, dan zijn de temperaturen lager. Omgekeerd geldt voor ondieper gelegen aansluitleidingen dat de temperaturen hierin hoger uitvallen.

³ Dit laat opwarming in de binneninstallatie buiten beschouwing.



Figuur 5-2 Opwarmtijden voor de verschillende debieten voor temperatuurverschillen tussen zon en schaduw van 1, 2 of 3 graden Celsius.

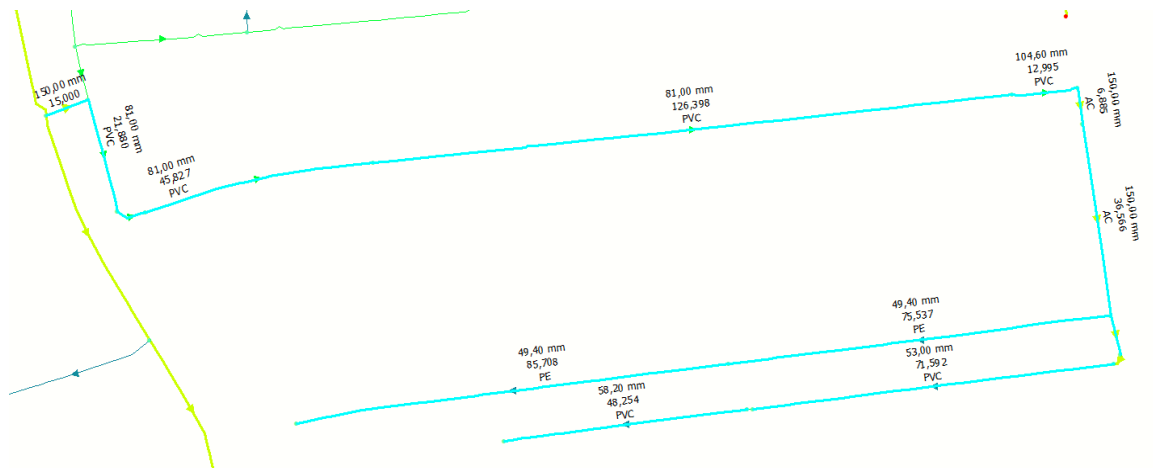
5.3 Effect WKO op drinkwatertemperatuur

5.3.1 Achtergrond

In een WKO-installatie wordt het drinkwater langs een warmtewisselaar geleid, waardoor energie aan het water wordt onttrokken. Daardoor wordt het water koeler. De opwarmtijd van het drinkwater in de leiding na de WKO-installatie is afhankelijk van de lokale netwerktopografie en het verbruik in de leidingen (Blokker et al., 2014).

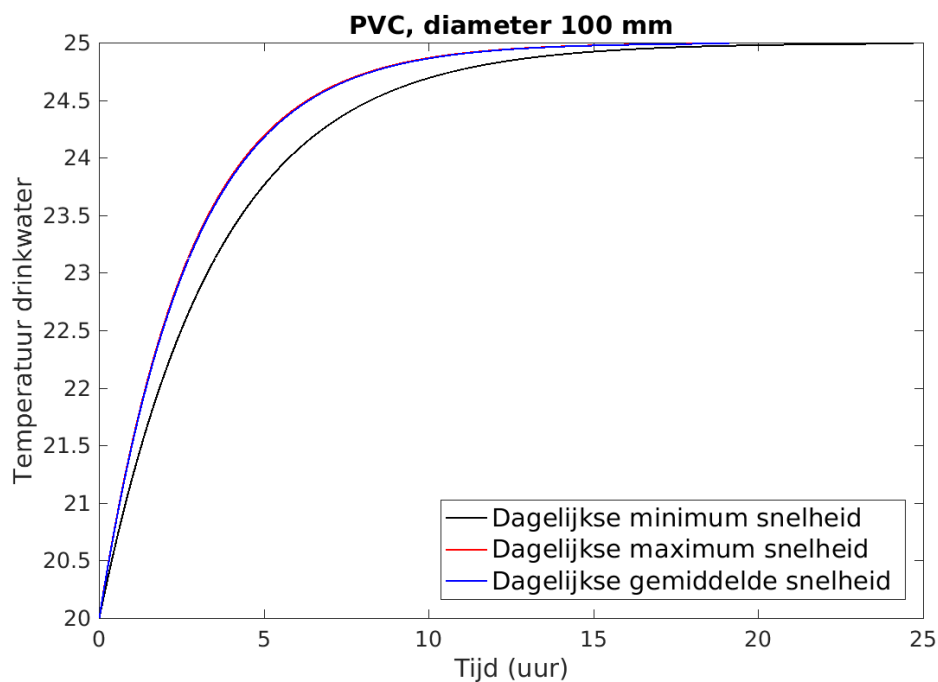
5.3.2 Casus

Figuur 5-3 geeft de leidingtopografie weer. Het leidingnet is vertakt aangelegd. De casusstraat zelf bestaat uit deels $\varnothing 90$ mm en deels $\varnothing 110$ mm PVC (in de simulaties is de volledige tak gesimuleerd als $\varnothing 100$ mm PVC, dit geeft geen grote verschillen in temperatuur). De tak loopt echter door de volgende straat in via een verbinding van $\varnothing 150$ mm AC. In de volgende straat zijn twee strengen, eentje van $\varnothing 50$ mm PVC en eentje van $\varnothing 50$ mm PE. Voor de volledigheid is naast de casusstraat zelf ook het effect van de WKO op de rest van de tak beschouwd. De WKO is gepositioneerd op de eerste knoop in de casusstraat.



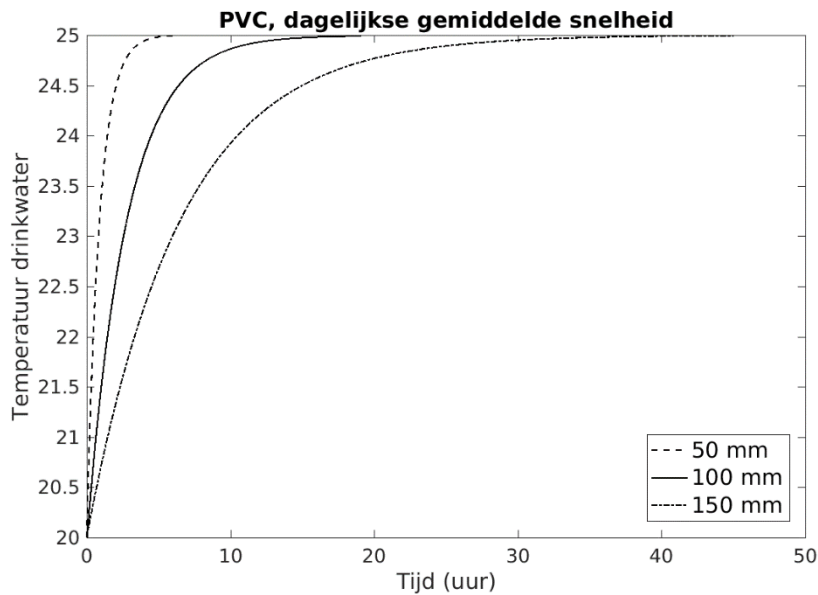
Figuur 5-3 Weergave van de casus met leidingdiameters en materialen.

De opwarmtijd verschilt over de dag, omdat de snelheid van het water varieert. Figuur 5-4 geeft de verschillen in opwarmtijd weer in de casusstraat ($\varnothing 100$ mm PVC) voor de dagelijkse minimum, maximum en gemiddelde snelheid weer (let op: de berekening van de opwarmtijd houdt geen rekening met variaties in snelheid en gaat uit van één constante snelheid). Te zien is dat voor de minimum snelheid met 5 uur opwarmtijd 4 van de 5 graden afkoeling verdwenen zijn. Na 10 uur is de koeling effectief verdwenen.

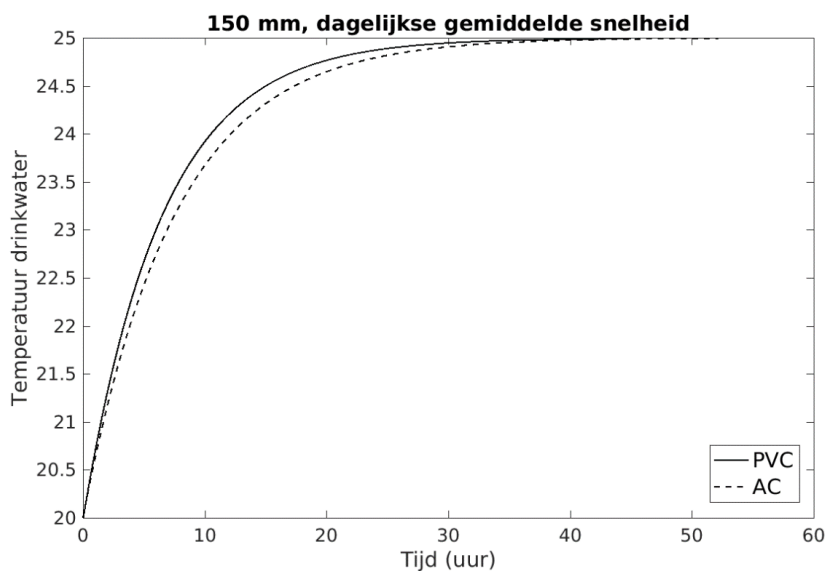


Figuur 5-4 opwarmtijd bij de dagelijkse minimum, maximum en gemiddelde snelheid in de casusstraat voor een temperatuurverschil van 5 graden Celsius.

Figuur 5-5 laat het verschil zien in opwarming tussen de secties met verschillende diameters (voor de sectie met $\varnothing 50$ mm zijn de snelheden op de streng met PVC gebruikt, er is geen $\varnothing 150$ mm PVC in de casus, daarom zijn hier de snelheden van de streng met $\varnothing 150$ mm AC gebruikt). Te zien is dat de kleine diameters het snelst weer opwarmen, de streng met $\varnothing 150$ mm warmt het langzaamst op. Dit komt vooral doordat er per meter leiding een groter volume water wordt opgewarmd, maar ook omdat de snelheden in deze streng veel lager zijn dan in de omringende strengen met kleinere diameters. Figuur 5-6 laat het verschil in opwarmtijd met het werkelijke materiaal van de $\varnothing 150$ mm steng zien in de casusstraat, namelijk AC, de verschillen tussen de 2 materialen zijn minimaal.

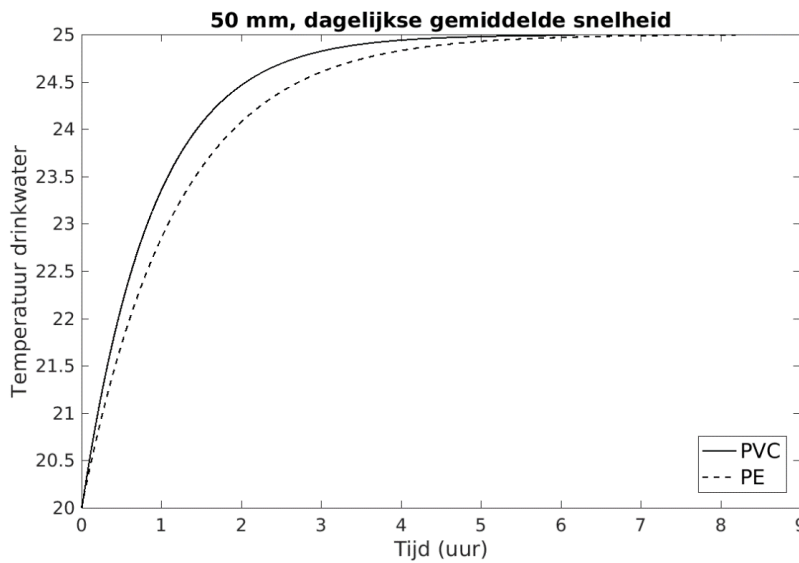


Figuur 5-5 Opwarmtijd bij verschillende diameters PVC met de bijbehorende dagelijkse gemiddelde snelheden in de casusstraat.



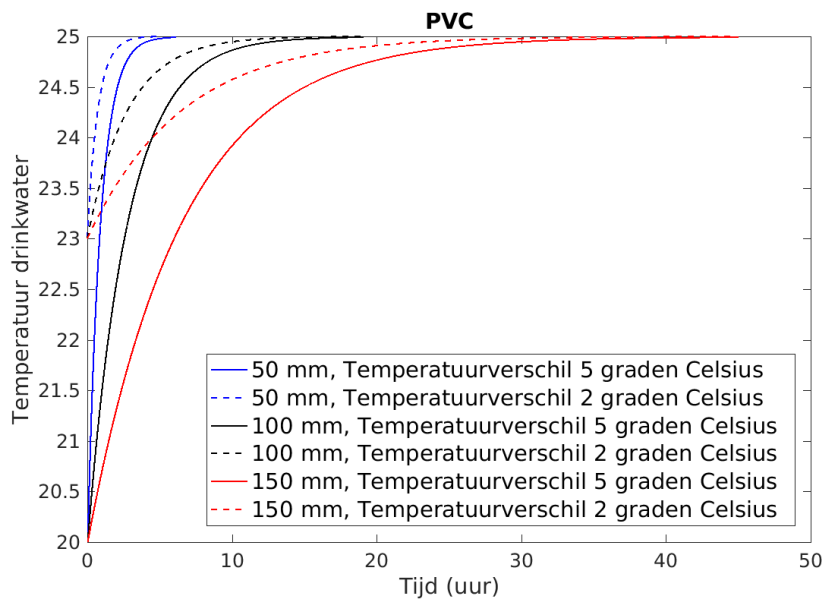
Figuur 5-6 Verschil in opwarmtijd tussen 150 mm AC en PVC met de dagelijkse gemiddelde snelheid in het AC, 150 mm leidingdeel in de casusstraat.

Figuur 5-7 laat het verschil zien tussen $\varnothing 50$ mm PVC en PE met de snelheid van het water in de $\varnothing 50$ mm PVC streng. Te zien is dat drinkwater in PE beduidend trager opwarmt dan PVC, dit is met name een effect van de grotere wanddikte van PE.



Figuur 5-7 Verskil in opwarmtijd tussen 50 mm PVC en PE met de snelheden van 50 mm PVC in de casusstraat.

Figuur 5-8 laat het verschil zien voor 3 diameters PVC voor een WKO-installatie van 5 en 2 graden koeling. Duidelijk is dat een grotere afkoeling enkele uren langer voelbaar is in het leidingnet.



Figuur 5-8 Verskil in opwarmtijd voor verschillende diameters PVC leidingen met bijbehorende dagelijkse gemiddelde snelheid in de casusstraat voor twee WKO installaties met temperatuurverschillen van 2 en 5 graden Celsius.

Als we deze opwarmingstijden vergelijken met de verblijftijden in de casusstraat, dan zien we het volgende (uitgaand van de gemiddelde snelheid in de streng):

Streng	Temperatuur aan einde streng	Verblijftijd [uur]	Resterende verschil T tot 25 graad Celsius
Ø100 mm PVC	20,90	0,71	4,1
Ø150 mm AC	21,58	1,37	3,42
Ø50 mm PVC	24,43	1,30	0,57
Ø50 mm PE	25	3,15	0

Duidelijk is dat een temperatuurverschil van 5 graden Celsius aan het begin van de casusstraat niet de gehele tak gekoeld kan houden (er is in deze schatting nog geen rekening gehouden met de verblijftijd in aansluitleidingen). Na het eerste deel van de casusstraat is nog een aanzienlijk deel van de afkoeling aanwezig, maar vooral de verblijftijd in de Ø50 mm leidingen doet de meeste koeling teniet. Stel, de hele straat is voorzien van Ø90-110 mm PVC met een gemiddelde snelheid zoals in het deel van de casus met die diameter, dan is de verblijftijd tot 23 °C (dit is de temperatuur waarbij de maatregelen voor de gehele straat tenminste 2 graden koeling geeft, afgezien van de aansluitleidingen) 3 uur en een kwartier.

Als we uitgaan van een PE aansluitleiding van 25 mm is na ongeveer 0,14 uur de temperatuur van het drinkwater opgewarmd van 20 naar 24,5 graad Celsius. Bij een gemiddelde verblijftijd in een aansluitleiding (uitgaande van een gezin met twee kinderen met een verbruik van 480 l/dag) is de gemiddelde dagelijkse opwarming van 20 naar 22,09 graden Celsius met een gemiddelde verblijftijd van ongeveer een kwartier. Echter, de verblijftijd in de aansluitleiding kan sterk variëren, als er overdag gedurende 8 uur geen water wordt gebruikt, dan is het water in de aansluitleiding volledig opgewarmd. Een kraan met een debiet van 600 l/uur geeft een verversijds van zo'n 30 seconden. Bij deze snelheid is de opwarmtijd in de aansluitleiding 0,15 uur en heb je dus effectief drinkwater met de temperatuur van de distributiewaterleiding.

6 Overzicht effect van klimaat- adaptieve maatregelen

6.1 Koelen leidingwater

6.1.1 WKO/TED

De resultaten van de berekeningen aan WKO/TED aan het begin van de straat laten zien dat een koeling van 5 °C aan het eind van de casusstraat niet meer meetbaar is. Aan het eind van een straat met vergelijkbare snelheden als in de casusstraat met Ø100 mm PVC is na 3 uur en een kwartier verblijftijd nog 2 graden van de oorspronkelijke 5 beschikbaar. In TKI Calorics (Blokker et al., 2014) is een analyse gemaakt van de kosten van WKO, deze kwamen voor een koeling van 5 °C neer op orde €350.000,- en jaarlijkse exploitatiekosten rond €12.000,-. Dit zijn dermate hoge kosten dat we de conclusie kunnen trekken dat WKO geen structurele oplossing is voor woonwijken. Wel kan een WKO lokaal een oplossing zijn om een bekende hotspot te passeren. Dit moet dan in een lokale kosten-batenanalyse worden afgewogen.

6.1.2 Diepteligging

Het leggen van drinkwaterleidingen op 1,5 meter diepte i.p.v. 1 meter diepte onder maaiveld geeft een afname in maximum temperatuur van 1 tot 2,5 °C, afhankelijk van het bodemmateriaal. In TKI Calorics is door PWN (Blokker et al., 2014) een inschatting gemaakt van de meerkosten voor het op 1,5 meter diepte leggen van leidingen. Het gaat dan om meerkosten van 70%, dus een factor 1,7 duurder dan reguliere leidingaanleg (het is niet bekend of hierin ook meerkosten zijn meegenomen van een hogere drukklasse of ander leidingmateriaal door de grotere bodembelasting). Uitgaande van aanlegkosten in een stedelijke omgeving van €250,- per meter (vervanging bestaande leidingen), komt dit neer op meerkosten voor 100 meter straat van €17,500,-. Daarnaast kunnen er praktische aspecten zijn, zoals bereikbaarheid of de grondwaterstand, waardoor een diepere ligging onwenselijk is. De externe belasting kan toenemen, maar dit hangt af van de aanwezigheid van verkeer, de invloed van verkeersbelasting neemt namelijk af met diepte. De kans op graafschade door derden neemt ook af met de diepte (Pieterse-Quirijns et al., 2011). De kans op graafschade bij eigen werkzaamheden aan derden wordt juist groter. De sleuf wordt breder en dieper en daarmee ook de kans dat andere kabels en leidingen verstoord worden. Verder moet bij vervanging van bestaande leidingen ook alle dienstkranen worden aangepast. Deze maatregel ligt binnen de directe invloedssfeer van drinkwaterbedrijven. Op basis van aannames over kans op ongelukken bij werkzaamheden, reparaties door storingen, schade bij lekkage en schade door graafwerkzaamheden zijn in TKI Calorics de operationele meerkosten van dieper liggen geschat op €3.000,- voor een netwerk van 45 kilometer leidinglengte, wat neerkomt op verwaarloosbare meerkosten per 100 meter leiding.

6.1.3 Bodemvocht

Aanwezigheid van bodemvocht kan tot 2 °C temperatuurverschil geven. Er zijn verschillende manieren om het bodemvocht te verhogen in de bodem:

- **Grondwaterstand:**

De grondwaterstand wordt in steden met relatief hoge natuurlijke grondwaterstanden vooral bepaald door de diepteligging en onderlinge afstand van drainagebuizen en oppervlaktewater. Daarnaast kan het beïnvloed worden door bijvoorbeeld (kelder)bemalingen. Regen heeft i.h.a. alleen een tijdelijk effect op de grondwaterstand. Verhoging van de grondwaterstand kan gerealiseerd worden door aanpassing van de drainage (bij grootschalige renovatie), maar ook door aanpassingen zoals klimaatadaptieve drainage (KAD), waarbij het drainageniveau van de drains gereguleerd kan worden door de afvoer uit te laten komen in een put met een verstelbare uitlaat. Dit type drainage wordt in de landbouw toegepast. Door de uitlaat hoger te zetten,

kan de grondwaterstand naar wens (tijdelijk) verhoogd worden of kan uitzakken worden voorkomen. Verhoging van de grondwaterstand kan echter nadelige effecten hebben op de bebouwde omgeving (schade aan palen, funderingen, wateroverlast) waardoor per locatie onderzocht zou moeten worden of deze maatregel geschikt is. Ook moet onderzocht worden welke grondwaterstand optimaal is, aangezien verzadiging mogelijk kan leiden tot vergrote warmtegeleiding (en dus mogelijk meer opwarming).

- **Bodemopbouw ondiepe ondergrond (bovenste 1,5 meter):**

Grof zand en grind houden weinig water vast boven de grondwaterspiegel. Andere bodemtypen met meer silt, klei of organisch materiaal, hebben een hogere waterretentie. Deze bodemtypen zijn echter ongeschikt als fundering voor straten en wegen, omdat er inklinking kan plaatsvinden, waardoor er bijvoorbeeld verzakking kan optreden. Het zou onderzocht kunnen worden of de bodem lokaal aangepast kan worden, bijvoorbeeld door de toevoeging van hydrofiele vezels (zoals glaswolvezels) of andere materialen, waardoor de waterretentie van het zand versterkt kan worden bij gelijkblijvende grondmechanische eigenschappen.

- **Infiltratie:**

Wanneer infiltratie kan plaatsvinden wordt het bodemvocht en het grondwater rondom deze locatie aangevuld. Infiltratie kan bereikt worden middels:

- Verwijderen van verharding;
- Aanleg van waterdoorlatende verharding, eventueel in combinatie met infiltratiekratten;
- Aanleg van kunstmatige infiltratiewerken, zoals wadi's over de lengte van een straat.

Deze maatregel heeft echter mogelijk verminderd effect na een droge periode, waarin veel verdamping heeft plaatsgevonden en het bodemvocht niet is aangevuld.

6.2 Vegetatie

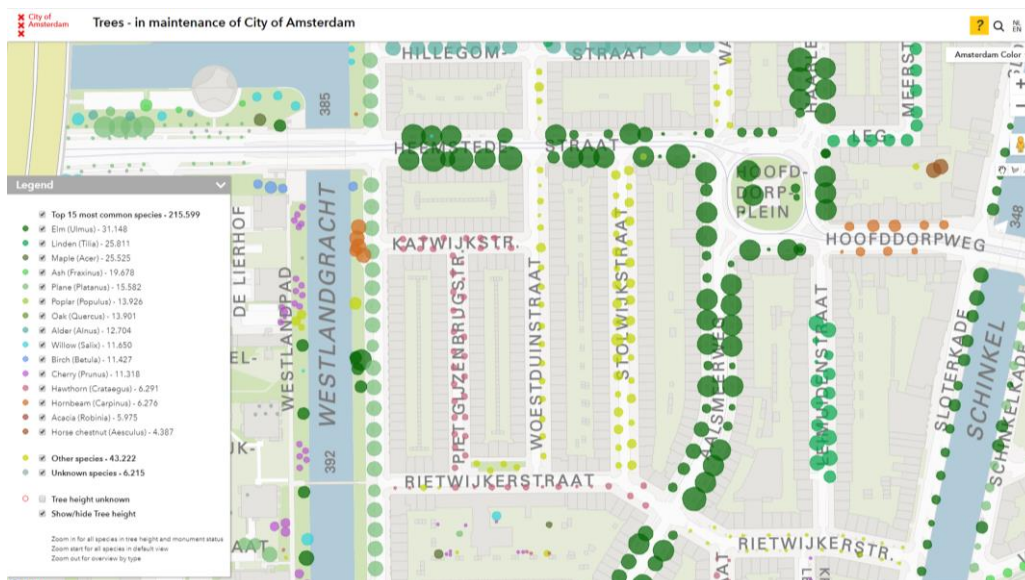
Aanleg van groenstroken heeft een gunstig effect op de temperatuur van het oppervlak en de ondergrond, namelijk zo'n 1,5 tot 2 °C (los van schaduw), en kan daarnaast bijkomende voordelen bieden op de kwaliteit van de leefomgeving. Nog onbekend is hoe het type vegetatie en de watervoorziening van de vegetatie, in combinatie met het type ondergrond, de uiteindelijke oppervlakte- en ondergrondtemperatuur exact beïnvloeden. In droge periodes zal de actuele verdamping meestal lager liggen dan de potentiële verdamping. Om te zorgen dat de maximale hoeveelheid koeling van deze vegetatie kan worden behaald, kan er water worden aangevuld. Dit kan bijvoorbeeld door verzamelen van regenwater van de rest van de straat en vasthouden van dit water door bodemverbetering. Een andere optie is sproeien of irrigatie met geborgen regenwater. Het temperatuureffect is nog meetbaar naast de groenstrook, maar het effect wordt wel snel minder, het is dan ook aan te bevelen om de drinkwaterleiding midden in de groenstrook te positioneren.

Beschaduwing door bomen kan 1 tot 3,5 °C verschil in temperatuur op 1 meter diepte opleveren, maar dit is sterk afhankelijk van de omvang van de kruin, de hoogte en de hoeveelheid bomen. Het is slecht bekend in hoeverre het temperatuureffect door verdamping van de boom ter hoogte van het aardoppervlak nog merkbaar is. Ook is het onbekend in hoeverre ventilatie onder de bodem een rol speelt. In het huidige model is schaduw over de hele lengte van de straat aangenomen. Het bepalen van het effect van een individuele boom of het bepalen hoeveel bomen per kilometer noodzakelijk zijn is met het huidige model niet mogelijk, hiervoor is een 3D-model nodig of de aanname van radiale symmetrie.

Welke bomen in de praktijk worden gebruikt, hangt af van de beschikbare ruimte en verschilt per gemeente. Figuur 6-1 laat een voorbeeld van het bomenbestand zien in een wijk van Amsterdam. In de smallere straten is grote diversiteit, zoals de eenstijlige meidoorn, boomhazelaar, meelbes, zomerlinde, Japanse sierkers, bolacacia. Andere gemeenten planten bijvoorbeeld ook fruit- of notenbomen. Het voordeel van kleinere boomsoorten is dat ze passen in een smalle straat, een te grote boomkroon in een smalle straat zorgt voor belemmering van het verkeer, te grote afname van lichtinval en afname van ventilatie. Het nadeel van kleine boomsoorten is echter dat ze ook minder schaduw geven. Dit zal altijd een balans moeten zijn. Soms wordt de boomkruin alleen in de lengterichting

van de straat geleid. Dit heeft als voordeel dat de boom eerder past in een smalle straat, maar heeft als nadeel dat de effectieve schaduw op de leiding zeer beperkt is (en alleen aanwezig als de boom pal boven de leiding groeit) en is daarmee vooral toepasbaar in een straat met specifieke oriëntatie.

Een nadeel van alle vegetatie die voldoende groot is om schaduw te geven is het wortelstelsel. In een stedelijke omgeving met beperkte ruimte voor wortelgroei, moet er van uitgegaan worden dat elke boomsoort grote wortelstelsels creëert, daar waar wortels kunnen groeien, de meeste soorten boven de grondwaterstand (CROW, 2012). Om te zorgen dat wortels kabels en leidingen niet kunnen beschadigen moeten er goede standplaatsen worden gecreëerd en beschermende voorzieningen rond leidingen, zoals wortelschermen. Dan nog kan het zijn dat de ruimte boven de leiding gevuld wordt door wortels, wat onderhoud aan leidingen bemoeilijkt. Het voordeel van beschaduwing moet worden afgezet tegen de kans dat er graafwerkzaamheden aan de leiding moeten plaatsvinden gedurende de levensduur van de bodem. Dat betekent ook het beoordelen van de hoeveelheid schaduw die een boomsoort op een specifieke locatie geeft samen met het kwantificeren van het effect op de bodemtemperatuur. Met het huidige model is dit nog niet mogelijk.



Figuur 6-1 Voorbeeld van bomenbestand in een wijk in Amsterdam, <https://maps.amsterdam.nl/bomen/?wb48617274=48EA7B03>.

Het heeft alleen zin om bomen te planten als er een groeiplaats aanwezig is waarin de boom gezond kan groeien. Een gezonde boom geeft schaduw en verdampt vocht. Een gezonde groeiplaats geeft een boom voldoende ruimte om te wortelen, biedt voldoende draagkracht aan de boom, zorgt ervoor dat de boom voldoende water en zuurstof krijgt en zorgt voor voldoende verankering aan de boom. Voordelen van dergelijke bomen zijn verbetering van de leefomgeving, afname van bovengrondse hittestress en afname van kans op wateroverlast (Kruitbosch and Milligen, 2014) en niet in het minst, weinig beperking van gebruik van het straatoppervlak. Als er een zinvolle groeiplaats kan worden gecreëerd, kost een boom kost afhankelijk van soort en omvang gemiddeld zo'n €260,- (Kruitbosch and Milligen, 2014). Als een optimale groeiplaats wordt gecreëerd met een betonnen constructie kunnen de kosten per boom oplopen tot zo'n €15.000,-. In praktijk zal dit betekenen dat de kosten van een boom erg variabel zijn, uitgaande van 10 bomen per 100 meter straat komt dit neer op een range van €2.500,- tot €150.000,-.

Alternatieven voor bomen zijn o.a.:

- **Een grasstrook:** deze zorgt niet voor beschaduwing, maar geeft wel verdamping en daarmee een verkoeling in de bodem van zo'n 1,5 tot 2 °C tijdens warme zomers. Grasstroken zijn goedkoper dan bomen (orde €5,- per vierkante meter⁴, rond €500,- voor een lengte van 100 meter straat plus de kosten voor bodemverbetering en

⁴ Gebaseerd op een prijsopgave van een commerciële aanbieder van graszoden.

onderhoud), gras wortelt niet zo diep als bomen en het wortelstelsel is aanzienlijk kleiner en kan geen schade aan infrastructuur aanbrengen. Een grasstrook van een meter geeft een temperatureffect van maximaal 1,5 °C en is na 2 meter echt uitgewerkt (volle zon). Dat betekent dat een grasstrook wel minimaal een meter breed moet zijn om echt effectief te zijn, anders wordt de temperatuurwinst minder dan 1 °C. Dat betekent dat er in smalle straatjes veel van de openbare ruimte af gaat. Een goede optie is om de parkeerstrook te vervangen door gras bijvoorbeeld middels groene bestrating en de drinkwaterleiding onder de parkeerstrook te leggen. Dit kan alleen als er niet ook een warmtenet in het straatje gepland is. Het is onbekend hoe goed gras kan groeien en verdampen onder geparkeerde auto's. Voordelen van deze bestrating zijn o.a. dat regenwater makkelijk wegstroomt van het oppervlak en in de bodem kan infiltreren. Naast een verkoelend effect betekent dit ook een verminderde kans op wateroverlast. Nadeel van grasvegetaties is de beperkte worteldiepte waardoor sneller watertekorten zullen optreden en het verkoelende effect sterk terugloopt.

- **Struiken:** deze geven verdamping en beschaduwing, maar nemen veel ruimte in en hebben onderhoud nodig.
- **Een pergola:** een pergola is een element dat ervoor zorgt dat planten groeien boven het straatniveau. Voorbeelden zijn puntelementen (mast), lijnelementen of zelfs overkappingen. Het voordeel is dat de groeiplaats zeer beperkt is en dat er toch schaduw ontstaat door gebruik van klimplanten. Door de grote variabiliteit aan opties kunnen de kosten van pergola's sterk uiteen lopen. Daarnaast vragen pergola's onderhoud voor het leiden en snoeien van de planten

Voor alle vegetatie geldt dat er voldoende vocht in de bodem moet zijn om optimaal te verdampen. Vegetatie moet daarom altijd worden gecombineerd met maatregelen die zorgen voor meer bodemvocht, zie 6.1.3. Nog onbekend is hoe het type vegetatie en de watervoorziening van de vegetatie, in combinatie met het type ondergrond, en het drainageniveau de uiteindelijke oppervlakte- en ondergrondtemperatuur beïnvloeden.

6.3 Overige vormen van beschaduwing

6.3.1 Enkelzijdig versus dubbelzijdig aanleggen

Als een distributieleiding enkelzijdig structureel in de schaduw kan liggen (en dubbelzijdig niet) en de aansluitleidingen worden niet langer dan acceptabel vanuit doorspoeltijd door consumenten, dan is het beter om enkelzijdig aan te leggen. Een distributieleiding in de zon zal altijd warmer water aan de tap geven, hoe lang een consument ook doorspoelt. De opwarming gaat echter nooit zo snel dat gedurende de verblijftijd volledige opwarming wordt bereikt. Deze analyse houdt geen rekening met microbiologie in de PE aansluitleiding en opwarming in de binneninstallatie! Ook zou een aanbeveling aan consumenten zijn om na een aantal uren zonder gebruik door te spoelen om koel water te krijgen i.p.v. een doorspoeladvies na afwezigheid van een week. In praktijk zal een leiding niet de hele dag in de schaduw liggen, tenzij deze schaduw specifiek is gecreëerd. De schaduw van huizen zal een aantal uren van een zomerdag zeer beperkt zijn. Het is onbekend wat het temperatureffect op de bodem is van een dergelijk schaduwverloop over de dag. De berekeningen in voorliggende studie zijn uitgevoerd met een vaste schaduw dan wel zon over de dag. Deze maatregel ligt in de directe invloedssfeer van drinkwaterbedrijven. Praktische overwegingen bij deze maatregel zijn gerelateerd aan het lokale netwerkontwerp (bijvoorbeeld zelfreinigendheid of het plaatsen van brandkranen) en kostenverschillen (deze hangen af van de lokale omstandigheden, zoals de afstanden tot woningen of aanwezigheid van boven- of ondergrondse obstakels)

6.3.2 Tijdelijke beschaduwing tijdens een hittegolf

De resultaten in §4.3.3 laten zien dat het effect van tijdelijk volledig beschaduwen tijdens een hittegolf (specifiek de hittegolf van de zomer van 2018) in deze periode een verschil in maximum bodemtemperatuur van 2 graden gaf. Dit is aanzienlijk. Methoden om tijdelijk schaduw te creëren zijn:

- Het tijdelijk autovrij maken en straten vol zetten met planten en parasols. Dit is een maatregel die alleen lokaal in overleg met bewoners kan worden genomen en is daarom niet structureel te realiseren. Het kan wel interessant zijn voor bekende hotspots en als noodmaatregel vanuit locaties met bovengrondse hittestress.

- Inzet van mobiele plantenbakken: ook dit is geen maatregel die structureel kan worden uitgevoerd voor hele woonwijken, maar alleen lokaal voor bekende probleemlocaties.

6.3.3 Overspannen van straten met luifels

Dit is nog geen reguliere maatregel, maar kan een optie zijn om schaduw te creëren. Zo had de Peperstraat in Leeuwarden in 1985 nog luifels over de stoepen voor de winkels. Let wel dat schaduw onder luifels tot gevolg kan hebben dat de ventilatie afneemt, er moet lokaal worden bekeken wat wenselijk is.



Figuur 6-2 Een voorbeeld van uitschuifbare luifels in de Klassieke Oudheid, het Colosseum in Rome. Figuur overgenomen van <https://bertvandevelde.wordpress.com/>.



Figuur 6-3 Een paraplustraat, Utrecht. Foto overgenomen van <https://indebuurt.nl/utrecht/nieuws/worden-we-vrolijk-van-ook-utrecht-heeft-een-umbrella-street~102163/>.

6.4 Nieuw gevonden mogelijke maatregelen

Typen verharding: Bij de keuze van het type verharding kan rekening gehouden worden met de thermale eigenschappen van de verharding. Er bestaan asfaltsoorten die ontwikkeld zijn om minder snel op te warmen (Higashiyama et al., 2016). Verminderde opwarming van het oppervlak is niet alleen gunstig voor de temperatuur van de ondergrond, maar ook voor het leefklimaat in steden waar het urban heat island (UHI) effect in de zomer een rol speelt.

Verschillende hierboven genoemde maatregelen zouden naast hun effect op de temperatuur van de ondergrond, ook bij kunnen dragen aan andere verbeteringen en transities in de stedelijke omgeving. Zo kunnen aanpassingen op het gebied van bodemvocht integraal worden bekeken met lokale en regionale vraagstukken rondom bodemdaling, verdroging, regenwaterberging en verzilting. Maatregelen in het kader van klimaatadaptatie ten behoeve van het leefklimaat in de stad, zoals bijvoorbeeld aanleg van schaduwrijke zones, groen en andere aanpassingen aan het oppervlak kunnen tevens positieve gevolgen hebben voor de temperatuur van de ondergrond. Koppeling met dergelijke (stedelijke) transities kan daarom gunstig zijn.

6.5 Samenvatting

In onderstaande tabel staan de verschillende maatregelen samengevat met orde grootte effecten en kosten die daarbij horen. Opvallend is dat veel maatregelen in dezelfde orde van effectiviteit zitten, maar dat kosten sterk kunnen verschillen. Deze kosten zijn in de meeste gevallen sterk afhankelijk van de praktische uitvoering. De kosten zoals genoemd in dit hoofdstuk zijn gebaseerd op een bureaustudie en zijn niet gebaseerd op een uitwerking van de casus met gemeenten. Aanbeveling is dit samen met gemeenten verder uit te werken.

Opvallend is dat een aantal maatregelen binnen de directe invloedssfeer van drinkwaterbedrijven liggen, maar een aantal niet. Deze maatregelen hebben betrekking op de ordening van de bovengrondse ruimte of vallen onder de zorginspanning van gemeenten voor grondwater. De afweging welke maatregelen waar optimaal zijn, zullen afhangen van een maatschappelijke afweging naar lokale doelen, kosten en praktische overwegingen.

Maatregel	Effectiviteit	Kosten (100 meter)*	Invloedssfeer	Kansrijke structurele maatregel?
WKO/TED	Locatie-afhankelijk, potentieel tot orde 2 °C	€ 75.000,- + exploitatie	Onbekend	Nee
Dieper leggen	1-2,5 °C	€17.500,-	Dwb	Ja
Bodemvocht	Orde 2 °C	Onbekend	Gemeente	Mogelijk
Beschaduwing	1-3,5 °C	€ 2.500,- tot €150.000,- (bomen) Uiteenlopend (pergola) Onbekend (luifels)	Gemeente	Mogelijk
Vegetatie (verdamping)	Orde 1,5 °C	Orde €500 ,- + kosten (bodem)aanpassingen + onderhoud (gras) Onbekend (Groene bestrating)	Gemeente	Mogelijk Mogelijk
Enkelzijdig aanleggen (schaduwzijde)	Orde 2 °C	Onbekend	Dwb	Ja

*De kosten zoals genoemd in dit hoofdstuk zijn gebaseerd op een bureaustudie en zijn niet gebaseerd op een uitwerking van de casus met gemeenten. Aanbeveling is dit samen met gemeenten verder uit te werken.

7 Conclusie en aanbevelingen

7.1 Conclusies en overblijvende aandachtspunten

De modellen zijn in staat om het effect van maatregelen te kwantificeren. Op basis van de huidige inzichten zijn er verschillende effectieve maatregelen die kansrijk zijn om toe te passen in een stedelijke omgeving, zoals het dieper leggen van leidingen, het leggen van leidingen in groenstroken en/of in de schaduw van bomen, en het verhogen van bodemvochtconcentraties, bijvoorbeeld door klimaatadaptieve drainage. Al deze maatregelen kunnen individueel de temperatuur van het leidingwater met 1 tot 3 graden koelen.

De modelresultaten zijn gevoelig voor de aannames in het model:

- **De opbouw van de bodem:** de samenstelling van de zandlaag in de bovenste 1,5 meter kan zorgen voor temperatuurverschillen tot ruim 2 °C op de warmste dag. De bodemsoort onder de bovenste 1,5 meter leidt ook tot temperatuurverschillen van ruim 2 °C. Gecombineerd betekent dit een onzekerheid van een gebied zonder problemen met bodemtemperatuur tot een structurele hotspot, waarbij de hoogste temperaturen te verwachten zijn voor een bovenlaag van lemig zand met een ondergrond van veen. Doordat de thermische diffusiviteit van veen veel lager is dan die van zand, kan het zand de warmte minder goed kwijt aan het veen en blijft de temperatuur van de zandlaag hoger. In eerdere modelstudies is dit effect nog niet onderzocht.
- **Randvoorwaarden:**
 - De onderzijde van het model:
 - De diepte waarop de temperatuur constant wordt en de waarde die die temperatuur heeft: deze parameters hebben een aanzienlijk effect. Een verandering van die diepte van 8 naar 15 meter in combinatie met de gebruikte temperaturen op de boven- en onderrand geeft een temperatuurverschil op de warmste zomerperiode van 1,2 tot 2 °C op 1 meter diepte (waarbij de diepe onderrand de hoogste temperaturen geeft op 1 meter diepte).
 - De grondwaterstand: deze is in praktijk zeer variabel en lang niet overal bekend. Grondwatermodellen kunnen meestal niet de fijne resolutie benodigd is voor variaties in de stedelijke omgeving. De grondwaterstand heeft een aanzienlijke invloed op de temperatuur en het bodemvocht. In West-Nederland wordt op veel locaties de grondwaterstand gereguleerd en kan men gemiddeld uitgaan van de standaard ontwateringsdieptes die worden aangehouden door de waterschappen.
 - De bovenzijde van het model: De oppervlaktetemperatuur is beperkt bekend. Temperatuur verschillende oppervlakken, effect van verdamping en beschaduwing in een stedelijke omgeving voor verschillende soorten straten (verschil met daken, KNMI weerstations en parken).
 - De zijrand van het model: Warmte-uitwisseling onder de straat met onder de bebouwing langs de straat: Wat is het effect van bebouwing op de temperatuur van de bodem eronder en wat betekent dit voor de warmte-uitwisseling met de bodem onder de straat? In voorliggende studie is uitgegaan van het ontbreken van warmte-uitwisseling tussen de bodem onder de gebouwen en de straat. Mihalakakou et al. (1995) hebben een numeriek gepresenteerd van de temperatuur onder gebouwen, een validatietest op 30 cm onder een gebouw bij de Universiteit van Ioannina in Griekenland in een juni maand en een augustus maand lieten temperaturen zien variërend van 23 tot 27°C. Luchttemperaturen in dezelfde periode varieerden tussen 9,8 en 39,3°C. Deze omstandigheden zijn echter moeilijk te vertalen naar de temperatuur onder gebouwen in typische straten in steden in West-Nederland.

De afgelopen jaren zijn verschillende modellen gebruikt voor het simuleren van bodemtemperatuur, zoals het 1D-BTM (verschillende BTO en DPWE studies), Plaxis (TKI warmteoverdracht) en in voorliggende studie Hydrus. Al deze modellen schrijven andere randvoorwaarden voor die zijn afgestemd op de onderzoeksvragen van dat moment.

Bijvoorbeeld, in TKI warmteoverdracht zijn de randvoorwaarden aan de zijkant van het model zo opgesteld dat de resultaten van de interactie tussen warmteleiding en drinkwaterleiding niet worden beïnvloed door de exacte randvoorwaarden aan de zijrand. Het 2D-model in voorliggende studie is opgesteld om een realistische straat te simuleren, die dusdanig smal is dat per definitie alle leidingen in de buurt van de rand liggen. Dit is een wezenlijk andere toepassing, waardoor de randvoorwaarden verschillen. Helaas zijn de resultaten er wel gevoelig voor, wat betekent dat validatie noodzakelijk is.

Resolutie in tijd en 3D:

- Effect bomenrij in straat: wat is het werkelijke dagelijkse effect van variërende beschaduwing en op hoeveel afstand moeten bomen staan om een netto effect op drinkwatertemperatuur te hebben (stroming door wisseling van zon en schaduw);
- Zelfde geldt voor beschaduwing van gebouwen: wat is het netto effect van zon en beschaduwing door de dag heen?

Praktische aspecten:

- Wat is de effectiviteit van verschillende methoden om bodemvocht te verhogen? Bv. andere bodemsoort, lokale bodemverbeters rond leiding, grondwaterstand, opvangen water in de straat en infiltreren;
- Kosten voor een daadwerkelijk pilotlocatie uitgezocht van dieper leggen t.o.v. andere maatregelen;
- Onderzoek toepasbaarheid tijdelijke beschaduwing;
- Wat is acceptabel bij doorspoelen? Wat doen mensen nu als water warmer is?

7.2 Randvoorwaarden pilot

Een pilot moet inzicht geven in de in de vorige paragraaf genoemde aandachtspunten, waarbij het belangrijk is om voorafgaand aan verder waardering van maatregelen en het uitwerken van praktische aspecten eerst aandacht moet worden besteed aan modelvalidatie. De modellen kunnen worden gevalideerd door het uitvoeren en analyseren van metingen en het vergelijken van modellen, in dit geval Hydrus en het 1D-BTM.

7.2.1 Metingen

Het doen van temperatuurmetingen in de stad is niet triviaal. Bijlage IV geeft een overzicht van de KNMI-richtlijnen voor het plaatsen van temperatuur-, neerslag- en windmetingen. Voor inzicht in lokale situaties zijn lokale metingen nodig, maar dat betekent dat er gemeten moet worden op beschutte plekken, wat ervoor zorgt dat de representativiteit van die metingen sterk afneemt. Een meting voor een gebouw zegt alleen iets over die locatie en niet bijvoorbeeld over de situatie op de hoek van het gebouw, waar meer wind is. Er moet daarom gemeten worden in een verscheidenheid aan situaties die representatief is voor de stedelijke omgeving.

Een ander probleem in de stedelijke omgeving is dat er sprake is van een drukke omgeving waarin metingen makkelijk kunnen worden verstoord en waarin (bovengrondse) meters ook storend kunnen zijn voor de omgeving, denk aan voorbijgangers en verkeer. Daar bovenop komt de vraag hoe meters beveiligd kunnen worden tegen diefstal. Idealiter wordt daarom gemeten in een gecontroleerde omgeving waarbinnen toch veel verschillende situaties te vinden zijn, in elk geval:

- Verharding;
- Groen(stroken);
- Vegetatie/bomen;
- Gebouwen;
- Leidingen;
- (Ondergrondse warmtebronnen).

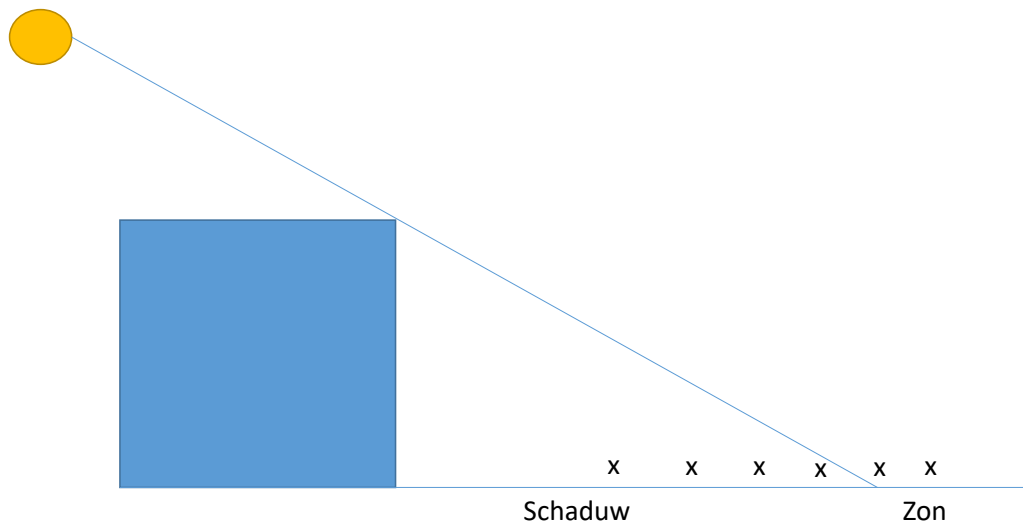
Voorbeelden van dergelijke gecontroleerde omgevingen zijn productielocaties, zoals Weesperkarspel of Kralingen. Gewenste metingen zijn:

- 1 Bovenrand: temperatuurmetingen van het oppervlak gedurende een hydrologisch zomerhalfjaar (april tot en met september) van:
 - a Zon
 - b Schaduw
 - c Schaduw variërend over de dag (met een log van wanneer er schaduw was)

Voor de oppervlakken:

- a Verharding
- b Gras
- c Bomen

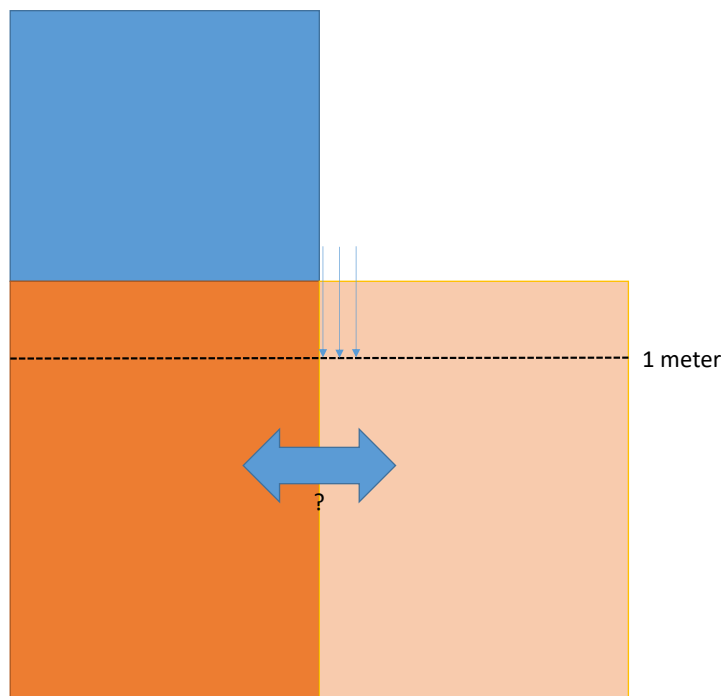
Bij de schaduwmetingen is niet alleen de meting in de volledige schaduw van belang, maar vooral ook de overgang van zon naar schaduw, hiervoor is een profiel van metingen nodig, zie Figuur 7-1.



Figuur 7-1 doorsnede metingen van schaduw naar zon (let op dat de stand van de zon in werkelijkheid varieert over de dag, daarom moet worden bijgehouden wanneer er daadwerkelijk sprake was van zon en schaduw per meetpunt).

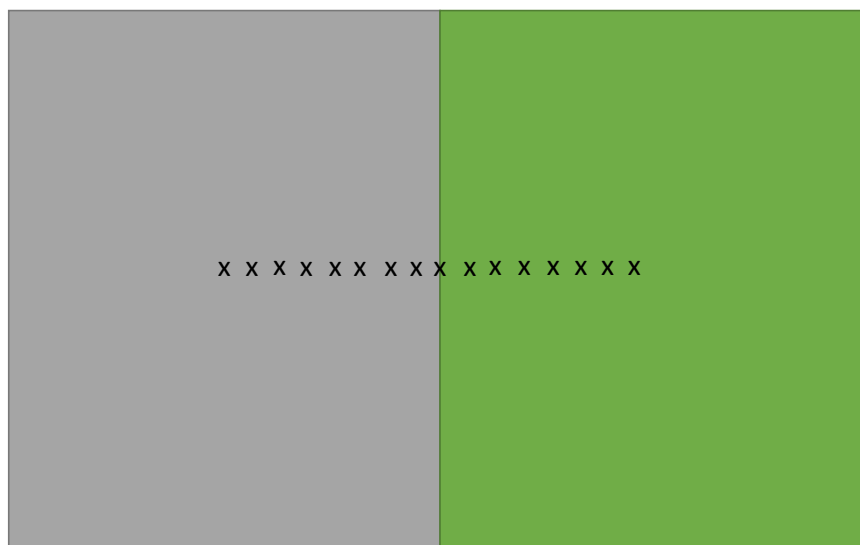
Naast deze metingen wordt op de meetlocatie een weerstation geplaatst die instraling, temperatuur en neerslag meet. Van de grondsoorten met vegetatie wordt ook de actuele verdamping gemeten.

- 2 Zijrand: voor de zijrand is de warmestroom van de bodem onder gebouwen naar de bodem in de straat en vice-versa het belangrijkste. Idealiter wordt er rechtstreeks onder het gebouw gemeten op een diepte van in elk geval 1 meter. Omdat het meten onder een gebouw niet triviaal is, kan daarnaast worden ingezet op het meten van de temperatuurgradiënt richting het gebouw. Dat betekent een aantal metingen op 1 meter diepte op toenemende afstanden van het gebouw, zie ook Figuur 7-2. Beter is nog om op verschillende dieptes te meten. Te verwachten is dat de warmtesignatuur van een gebouw een radiaal patroon kent vanaf het centrum van het gebouw naar buiten. Dat betekent dat op een zekere diepte en afstand de invloed van het gebouw niet meer zichtbaar is in de temperatuur van de bodem. Om te bepalen welke dieptes en afstanden relevant zijn, is voorafgaand aan de metingen een literatuurstudie nodig.



Figuur 7-2 Beoogde metingen voor het bepalen van warmte-uitwisseling tussen de bodem onder gebouwen en de straat.

- 3 Onderrand model: om het verloop van de temperatuur met diepte te onderzoeken zijn op 1 tot 3 locaties metingen nodig tot op een diepte van 15 meter.
- 4 Modelopbouw: op locaties waar temperaturen worden gemeten, wordt ook een grondboring verricht om de opbouw van de bodem te meten.
- 5 Validatie modeluitkomsten:
 - a Vochtmetingen: op de locaties waar bodemtemperaturen worden gemeten, wordt ook het bodemvocht gemeten, dit kan met combisensoren.
 - b Op dezelfde type locaties waar ook de oppervlaktetemperatuur (infrarood sensoren) wordt gemeten, wordt ook de bodemtemperatuur op verschillende dieptes gemeten. Belangrijk hierbij is dat een profiel wordt bemeaten over de grens van oppervlakken heen tot midden onder een soort oppervlak, zie ook Figuur 7-3.



Figuur 7-3 Bovenanzicht metingen bodemtemperatuur.

- c Een aanvullend experiment is het aanbrengen van tijdelijke schaduw op een meetlocatie in de zon om te controleren hoe snel de bodem reageert.

7.2.2 Modelvergelijkingen

Naast het doen van metingen is het van belang om met de metingen gestructureerde analyses te doen met de beschikbare bodemtemperatuurmodellen (in elk geval 1D-BTM en Hydrus) en de resultaten van de modellen ook te vergelijken.

Referenties

Agudelo-Vera, C. M., 2018, Aanpak om de hotspots in het leidingnet terug te dringen KWR, Nieuwegein, BTO 2018.024, pp. 38.

Agudelo-Vera, C. M., Blokker, E. J. M., van der Wielen, P. W. J. J., and Raterman, B., 2015, Drinking water temperature in future urban areas, KWR, Nieuwegein, BTO 2015.012, pp. 83.

Armson, D., Stringer, P., and Ennos, A., 2012, The effect of tree shade and grass on surface and globe temperatures in an urban area, *Urban Forestry & Urban Greening* **11**(3):245-255.

Blokker, E. J. M., Horst, P., Moerman, A., Mol, S., and Wennekes, R., 2014, Haalbaarheid van maatregelen tegen ongewenste opwarming van drinkwater in het leidingnet - TKI Project Calorics, KWR, Nieuwegein, KWR 2014.057, pp. 63.

Blokker, E. J. M., and Pieterse-Quirijns, E. J., 2012, Scenariostudies voor beperken invloed klimaatveranderingen op temperatuur en kwaliteit drinkwater in het net, KWR, Nieuwegein, KWR 2012.017, pp. 99.

Blokker, E. J. M., and Pieterse-Quirijns, E. J., 2013, Modeling temperature in the drinking water distribution system, in: *JAWWA*, pp. 35-36.

Blokker, E. J. M., and Pieterse-Quirijns, E. J., 2018, Erratum - Blokker, E.J.M., Pieterse-Quirijns, E.J. Modeling temperature in the drinking water distribution system - *JAWWA* 105(2013)1, E19-E29, *JAWWA* **110**(10):98.

Burghardt, R., 2014, Development of an ArcGIS extension to model urban climate factors, in: *Fachbereich Architektur, Stadtplanung, Landschaftsplanung*, Universitat Kassel, Kassel.

Christen, A., Bernhofer, C., Parlow, E., Rotach, M. W., and Vogt, R., 2003, Partitioning of turbulent fluxes over different urban surfaces, in: *Proceedings of the Fifth International Conference on Urban Climate*, Lodz, Poland.

Chung, S.-O., and Horton, R., 1987, Soil heat and water flow with a partial surface mulch, *Water Resources Research* **23**(12):2175-2186.

Cirkel, D., Voortman, B., van Veen, T., and Bartholomeus, R., 2018, Evaporation from (Blue-) Green Roofs: Assessing the Benefits of a Storage and Capillary Irrigation System Based on Measurements and Modeling, *Water* **10**(9):1253.

Côté, J., and Konrad, J.-M., 2005, A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials, *Canadian Geotechnical Journal* **42**:443-458.

CROW, 2012, Combineren van onder- en bovengrondse infrastructuur met bomen, CROW, Ede.

Farrell, C., Ang, X. Q., and Rayner, J. P., 2013, Water-retention additives increase plant available water in green roof substrates, *Ecological Engineering* **52**:112-118.

Gemeente Den Haag, 2019, Grondwaterstand Gemeente Den Haag, Wareco Munisense.

Gemeente Rotterdam, 2019, Grondwaterkaart Rotterdam.

Georgiadis, T., 2017, Urban climate and risk, Oxford Handbooks Online.

Hall, M. R., Dehdezi, P. K., Dawson, A. R., Grenfell, J., and Isola, R., 2012, Influence of the Thermophysical Properties of Pavement Materials on the Evolution of Temperature Depth Profiles in Different Climatic Regions, *Journal of Materials in Civil Engineering* **24**(1):32-47.

Herb, W. R., Janke, B., Mohseni, O., and Stefan, H. G., 2008, Ground surface temperature simulation for different land covers, *Journal of Hydrology* **356**(3-4):327-343.

Higashiyama, H., Sano, M., Nakanishi, F., Takahashi, O., and Tsukuma, S., 2016, Field measurements of road surface temperature of several asphalt pavements with temperature rise reducing function, *Case Studies in Construction Materials* **4**:73-80.

KNMI, 2000, Handboek waarnemingen; 1. Meetstation algemeen.

KNMI, 2019, Hittegolven sinds 1901, KNMI, De Bilt.

Kruitbosch, R., and Milligen, R. v., 2014, Klimaatadaptieve stadsbomen: een groene blik op klimaatverandering, Hogeschool van Hall Larenstein, Velp.

Leuzinger, S., Vogt, R., and Korner, C., 2010, Tree surface temperature in an urban environment, *Agriculture and Forest Meteorology* **150**(1):56-62.

Mihalakakou, G., Sanatmouris, M., Asimakopoulos, S., and Argiriou, A., 1995, On the ground temperature below buildings, *Solar energy* **55**(no. 5):355-362.

Moerman, A., 2013, Drinking water temperature modeling in domestic systems, KWR/ TU-Delft, Nieuwegein, pp. 84.

Molen, M. v. d., Kooi, H., Smulders, E. F. P. A., and Heijman, S. G. J., 2008, Warmteindringing in de bodem, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.

Montesano, F. F., Parente, A., Santamaria, P., Sannino, A., and Serio, F., 2015, Biodegradable Superabsorbent Hydrogel Increases Water Retention Properties of Growing Media and Plant Growth, *Agriculture and Agricultural Science Procedia* **4**:451-458.

Parmar, D., and Steinmanis, J., 2003, Underground Cables Need a Proper Burial, *T&D World Magazine*

Pieterse-Quirijns, I., de Groot, R., de Rijck, Y., and Ruijg, K., 2011, Diepteligging van leidingen, KWR, Nieuwegein, KWR 2011.022, pp. 69.

Runhaar, J. C., Maas, C., Meuleman, A. F. M., and Zonneveld, L. M. L., 1998, Handboek natuurherstel. NOV-rapport 9.2.

Šimůnek, J., and van Genuchten, M. T., 2008, Modeling Nonequilibrium Flow and Transport Processes Using HYDRUS, *Vadose Zone Journal* **7**:782.

Simunek, J., Van Genuchten, M. T., and Sejna, M., 2018, Hydrus Technical Manual, Version 3, PC-Progress, Prague, Czech Republic.

TNO, 2019, Geologie van Nederland - Aardwarmte, TNO.

Waternet, 2019, Grondwaterkaart Amsterdam.

Whitford, V., Ennos, A. R., and Handley, J. F., 2001, "City form and natural processes"- indicators for the ecological performance of urban areas and their application to Merseyside, UK, *Landscape and Urban Planning* **57**:91-103.

Wosten, J. H. M., Veerman, G. J., De Groot, W. J. M., and Stolte, J., 2001, Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks, Alterra, Wageningen.

Zeng, C., Wang, Q., and Zhang, F., 2012, Evaluation of hydraulic parameters obtained by different measurement methods for heterogeneous gravel soil, *TAO: Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences* **23**(5):585.

I Parameters bodemfysica en gewas Hydrus

Voor de hydrologie in de onverzadigde zone is uitgegaan van het Van Genuchten-Mualem model. In de simulaties is uitgegaan van een zandige bodem (behalve wanneer anders is aangegeven), aangezien straten en wegen doorgaans met zandig materiaal worden gefundeerd. De gebruikte parameters zijn de standaard parameters voor zand zoals deze in Hydrus opgenomen zijn of gebaseerd op literatuurwaarden (Tabel I-2).

Voor de stoeptegels, straatklinkers en asfalt zijn, afgezien van een zeer lage porositeit en doorlatendheid, dezelfde parameters gebruikt als voor zand. Aangezien er geen neerslag/verdamping wordt meegenomen op deze oppervlakken hebben deze parameters vrijwel geen effect op de resultaten. Stoeptegels en straatklinkers zijn vaak van een betonmix gemaakt. In de modellering is hierbij uitgegaan van de eigenschappen van 'pavement quality concrete' (Hall et al., 2012). Voor asfalt is gekozen voor 'dense bitumen macadam' wat een minder poreuze variant van asfalt is (in tegenstelling tot het meer poreuze asfalt dat op snelwegen te vinden is). De gebruikte parameters zijn weergegeven in Tabel I-3.

De warmtegeleiding en de warmtecapaciteit van de bulk ondergrond worden in Hydrus dynamisch berekend op basis van de porositeit (waarvan een deel mineraal en een deel organisch materiaal) en het actuele vochtgehalte. Deze worden vervolgens gebruikt in warmtetransport middels zowel geleiding (door het gehele medium van bodemmateriaal, water en lucht) en stroming (van water langs het bodemmateriaal). Warmtetransport door verdamping en transport van damp wordt niet meegenomen. De achterliggende vergelijkingen zijn weergegeven in Vergelijking I-1 en Vergelijking I-2.

Vergelijking I-1 Berekening van de warmtecapaciteit van het bulk materiaal in Hydrus (Simunek et al., 2018), waarbij C staat voor de warmtecapaciteit van minerale delen (subscript n), organisch materiaal (o), water (w) en gas (g) en θ voor het volumetrisch vochtgehalte, het volumetrisch gehalte van minerale delen (n), organisch materiaal (g) en $a_{v, \pm}$ voor het volumetrisch deel dat bestaat uit lucht.

$$C_p(\theta) = C_n\theta_n + C_o\theta_o + C_w\theta + C_g a_v \approx (1.92\theta_n + 2.51\theta_o + 4.18\theta)10^6 \quad (\text{J m}^{-3}\text{°C}^{-1})$$

Vergelijking I-2 Berekening van de thermal conductivity van het bulk medium in Hydrus (Simunek et al., 2018) op basis van (Chung and Horton, 1987). λ_0 is de thermal conductivity, θ is het volumetrisch vochtgehalte en b_1 , b_2 en b_3 zijn empirische parameters die zijn beschreven in Tabel I-1.

$$\lambda_0(\theta) = b_1 + b_2\theta_w + b_3\theta_w^{0.5}$$

Tabel I-1 Parameters voor Vergelijking I-2 voor klei en zand.

Parameter	Klei (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Zand (W m ⁻¹ K ⁻¹)
b ₁	-0,197	0,228
b ₂	-0,962	-2,406
b ₃	2,521	4,909

Voor de ondergrond van de groenstrook is uitgegaan van een standaard bodem (sandy loam in Hydrus) die water beter vasthoudt dan zand, van 40 cm dik. Voor het warmtetransport is daarbij uitgegaan van de eigenschappen van een lemige bodem met organische stof. In het extra scenario waarin op 1 meter diepte de bodem is aangepast, zijn

parameters gebruikt die geschat zijn met behulp van de Rosetta-module in Hydrus voor een bodem met 95% zand en 5% klei.

Tabel I-2 Parameters voor het Van Genuchten-Mualem model voor de verschillende materialen. θ_r is het residuële volumetrische watergehalte, Θ_s het verzadigde volumetrische watergehalte, K_s is de verzadigde doorlatendheid en α , n en l zijn parameters voor de Van Genuchten-Mualem functie voor de bodemvocht karakteristiek en onverzadigde doorlatendheid.

Materiaal	θ_r (-)	Θ_s (-)	α (1/m)	n (m)	K_s (m d ⁻¹)	l (-)
Zand	0.045	0.43	14.5	2.68	7.128	0.5
Leemarm zand (B1) ^a	0.0	0.37	2.08	1.646	0.334	0.571
Lemig zand (B3) ^a	0.01	0.36	4.52	1.933	0.529	- 0.359
Grof zand (B5) ^a	0.0	0.45	1.52	1.412	0.178	- 0.213
Grind ^b	0.03	0.35	24.4	2.5	4.32	0.5
Stoeptegels en straatklinkers	0.001	0.02	14.5	2.68	0.01	0.5
Asfalt	0.01	0.02	14.5	2.68	0.01	0.5
Groenstrook	0.065	0.41	7.5	1.89	1.061	0.5
Aangepast bodemmateriaal	0.0586	0.3701	2.86	3.1774	6.4789	0.5

^a (Wosten et al., 2001)

^b (Zeng et al., 2012)

Tabel I-3 Warmtetransportparameters. λ is de warmtegeleiding en s is de volumetrische warmtecapaciteit.

Materiaal	λ (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	C_s (J kg ⁻¹ m ⁻³)
Stoeptegels en straatklinkers	1.11	1989702
Asfalt	0.6	2171408

Tabel I-4 Gebruikte eigenschappen van verschillende materialen. De 'B' coderingen komen overeen met bovengronden en 'O' met ondergronden uit de Staringreeks (Wosten et al., 2001). De warmtegeleiding is berekend met behulp van Vergelijking I-2 en de warmtecapaciteit met Vergelijking I-1.

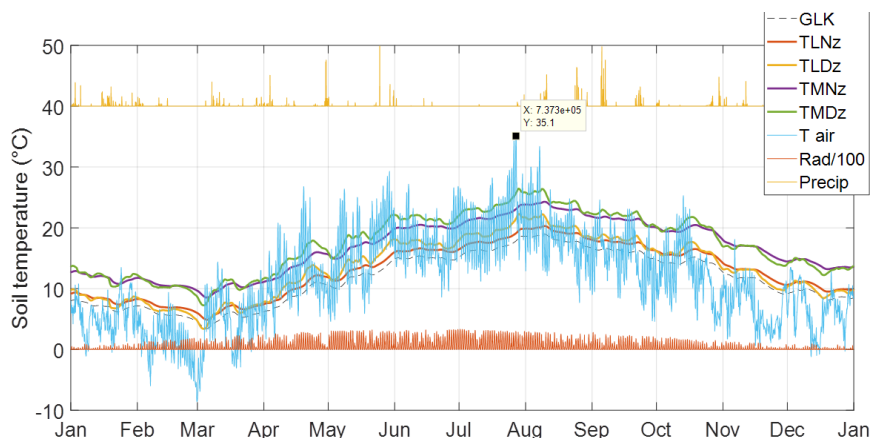
Code	Omschrijving	Thermal conductivity (Hydrus)	Organische stof (%)
Basis	Standaard zand (Hydrus)	Zand	0
B1		Zand	3
B3		Zand	3
B5		Zand	1
O11	Lichte klei	Klei	2
O16	Oligotroof veen	*	*
O2	Matig fijn zand	Zand	2

Voor zandige en kleiige bodems zijn standaard eigenschappen uit Hydrus gebruikt (Tabel I-4). Voor het oligotrofe veen is een bulk thermal conductivity gebruikt van $0.56 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ op basis van het gewogen geometrisch gemiddelde van de conductivities van organisch materiaal, water en minerale bodem (gewogen op basis van het volumepercentage) (Côté and Konrad, 2005), waarbij is uitgegaan van een vochtgehalte van 87% en 2% minerale delen.

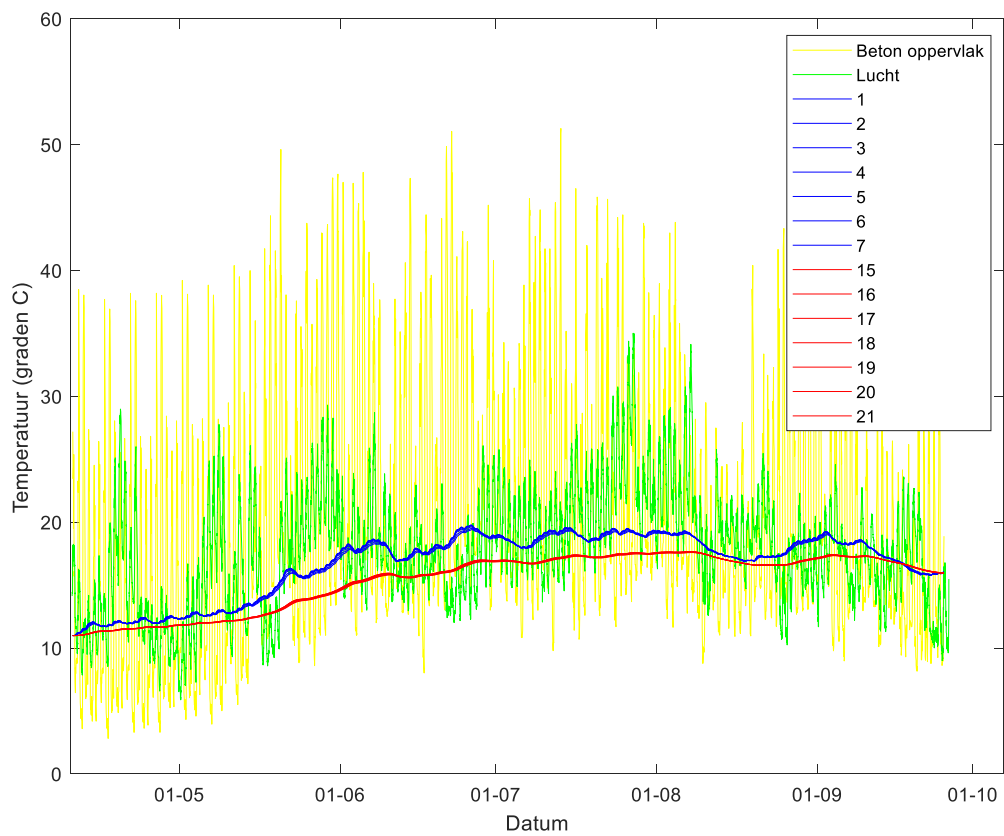
II Vergelijking tussen Hydrus en 1D-BodemTemperatuurModel

In Figuur II-1 en Figuur II-2 staan resultaten van het BTM en Hydrus voor de zomer van 2018. In beide figuren staat de bodemtemperatuur op 1 meter diepte uitgezet. In het BTM zijn verschillende scenario's doorgerekend voor Laag en Midden stedelijk gebied voor vochtig en droog zand. Hydrus is doorgerekend met de instellingen in het basisscenario. Qua absolute temperatuur in de zomer komen de Hydrus resultaten het meest overeen met Laag stedelijk gebied met vochtig zand. Aangezien Hydrus in het basisscenario als oppervlak betontegels en klinkers gebruikt en er daarom weinig verdamping plaatsvindt, is het logisch dat Hydrus een hoger vochtgehalte hanteert dan het scenario met Droog zand in BTM. Omdat Hydrus het vochtgehalte modelleert, zal er in praktijk bij Hydrus altijd iets van vocht aanwezig zijn. Uit de resultaten van de gevoeligheidsexperimenten in Hoofdstuk 4 blijkt bovendien dat afhankelijk van de bodemopbouw en aannames over de diepte waarop de temperatuur constant wordt, makkelijk een paar graden verschil in de resultaten kan optreden. De absolute temperaturen berekend door BTM en Hydrus liggen daarmee binnen de betrouwbaarheidsmarges.

Interessanter zijn de relatieve verschillen. Zo is te zien dat bij Hydrus de maximum bodemtemperatuur optreedt aan het eind van de maand juni, een periode met lange dagen en veel instraling. De temperaturen in Hydrus blijven de rest van de zomer redelijk stabiel en reageren bijvoorbeeld nauwelijks op de piek in luchttemperatuur eind juli. De berekende temperaturen in het BTM kennen juist een opbouw door de zomer heen naar een maximum in augustus en volgen daarmee veel meer dan Hydrus het verloop van de luchttemperatuur. Voor dit verschil in gedrag zijn verschillende oorzaken denkbaar. Bijvoorbeeld, het verschil in meteorologische omstandigheden tussen KNMI weerstation Schiphol en een dak in Amsterdam. Vooral 's nachts kan het zijn dat het weerstation op Schiphol een grotere mate van afkoeling kent, er is mogelijk meer wind (in elk geval een ander windpatroon, omdat er geen bebouwing in de omgeving is). Ook kan het zo zijn dat de nachtelijke afkoeling van een dak met daaronder een gebouw groter is dan de bodem in een straat, waardoor op het dak een geleidelijke temperatuuropbouw door de zomer heen beperkter blijft. Dergelijke verschillen zijn op dit moment niet te valideren door het ontbreken van representatieve data.



Figuur II-1 BTM resultaten voor het jaar 2018, doorgerekend met data van weerstation Schiphol.

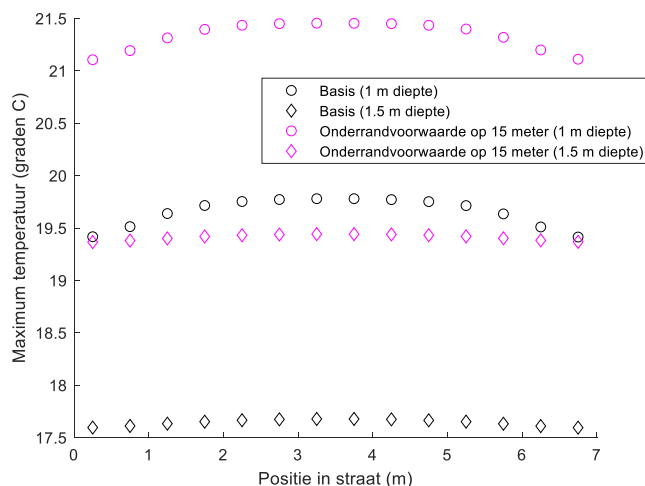


Figuur II-2 Resultaten van Hydrus met data van een dak in Amsterdam voor het zomerhalfjaar van 2018.

III Resultaten gevoeligheidsanalyse Hydrus

Diepte van de constante temperatuur

Het effect van de diepte van het model, en dus de diepte waarop een constante temperatuur wordt verondersteld, is weergegeven in Figuur III-1. Wanneer de onder-randvoorwaarde wordt verplaatst naar 15 meter diepte wordt de temperatuur in de bovenlaag iets hoger in de zomer, omdat de grotere dikte zorgt voor meer isolatie. Hoewel deze randvoorwaarde doorgaans ingeschat wordt op maximaal 10 meter diepte, kan de werkelijke diepte per locatie sterk verschillen, onder andere door het bodemtype, de grondwaterstand en eventuele activiteiten in de ondergrond. Voor de interpretatie van de resultaten in onderstaande paragrafen betekent dit dat er rekening gehouden moet worden dat de absolute temperaturen in werkelijkheid kunnen afhangen van lokale omstandigheden. Wel kunnen de temperatuurverschillen tussen simulaties onderling vergeleken worden (relatieve temperaturen).



Figuur III-1 Verdeling van de maximum temperatuur op de observatiepunten over de breedte van de straat in het basisscenario en een model waarin de onder-randvoorwaarde (de diepte waarop een constante temperatuur wordt verondersteld) zich op 15 meter diepte bevindt.

IV Richtlijnen KNMI weerstation

In Het Handboek waarnemingen staan de richtlijnen beschreven waaraan een weerstation moet voldoen (KNMI, 2000), hieronder geciteerd:

“De volgende condities met betrekking tot de inrichting van het meetterrein van een weerstation worden gesteld:

a) Indien sprake is van een “bemand station”, waar dus zowel visuele als instrumentele waarnemingen plaatsvinden, dan dienen al deze waarnemingen in principe op dezelfde geografische locatie en waarneemhoogte te geschieden. De onderlinge afstand van eventueel afzonderlijke waarneemlocaties op één station is in principe niet meer dan maximaal 500 meter (uitzonderingen op gronden van infrastructurele aard o.m. lucht havens). Deze conditie is vereist teneinde de realisatie van een synoptisch weerbeeld (waarin alle variabelen in principe onderling samenhangen) te waarborgen.

b) De meetinstrumenten bij een “bemand station”, c.q. in een “Automatisch waarneemstation” worden vanwege bovengenoemd criterium, “ waarnemingen in principe op dezelfde geografische locatie en waarneemhoogte”, op een beperkt oppervlak geïnstalleerd. Gelet op de vereiste infrastructurele voorzieningen, alsmede de kosten van het kavel heeft een meetterrein een oppervlakte van 225 à 300 m². De onderlinge afstand van de afzonderlijke meetinstrumenten en de spreiding ervan over het meetterrein is zodanig dat de metingen van alle weervariabelen in samenhang, adequaat en conform de specifieke eisen kunnen worden uitgevoerd. Deze voorwaarde betreft ook de 10 meter windmast, die op of direct naast het meetterrein is gesitueerd. Bij een aantal meetstations van het KNMI is de windmast op enige afstand van het meetterrein geplaatst vanwege de (te) grote windspecifieke ruwheid in de directe omgeving van het meetterrein. Deze afstand tot het meetterrein is echter in principe niet groter dan 500 meter.

c) Het binnengedeelte van het meetterrein is volkomen vlak, behoudens het talud rondom de put voor de neerslagmetingen. Het terrein is bedekt met kort gras (hoogte ≥ 4 cm en ≤ 10 cm). In het bijzonder is deze eis van toepassing op de directe omgeving van de sensor voor waarneming van de 10 cm temperatuur. In de periode april - september zal tenminste 1x per week gemaaid moeten worden, wat neerkomt op ongeveer 28 maaibeurten per grasseizoen.

d) Een meetterrein is omheind met een hekwerk om onbevoegden te weren. De omheining is, afhankelijk van de locatie, een transparant hekwerk. De mazen zijn (minimaal) 20 cm² en de hoogte van het hek is maximaal 2 m. Deze maten zijn vereist om de metingen zo min mogelijk door het hekwerk te laten beïnvloeden.

e) De situering van de meetinstrumenten binnen het terrein is zodanig te zijn dat de instrumenten elkaar niet verstoren. Voorbeelden:

- *De stralingsmeter behoeft een vrije zonnebaan, bij de opstelling van de andere instrumenten zal daar dus rekening mee moeten worden gehouden.*
- *De neerslagmeting is gevoelig voor obstakels in de directe omgeving (zie betreffende hoofdstuk). Het verdient daarom de voorkeur de meetapparatuur voor de neerslagmetingen zo ver mogelijk vanaf het hekwerk en andere meetinstrumenten te situeren met name vanaf de windmast.*

De nabije omgeving van het meetterrein moet vrij zijn objecten die de metingen kunnen beïnvloeden. Dit geldt ook voor mobiele obstakels, bij voorbeeld geparkeerde of passerende auto's, hijskranen, taxiënde, landende of 1 - 7 Handboek Waarnemingen; 1. Meetstation algemeen; versie juli 2000 opstijgende vliegtuigen, e.d..

Het KNMI hanteert de volgende richtlijnen:

- *op het gebied met een straal van 25 meter rondom het meetterrein mogen geen gewassen en/of beplantingen worden geteeld c.q. geplaatst die een hoogte van 0,5 m te boven gaan;*
- *op het gebied met een straal van 50 meter rondom het meetterrein mogen geen gewassen en/of beplantingen worden geteeld c.q. geplaatst die een hoogte van 1,5 m te boven gaan;*

- op het gebied met een straal van 100 meter rondom het meetterrein mogen geen obstakels zoals bomen en struiken worden geplaatst;
- op het gebied met een straal van 400 meter rondom het waarneemterrein mogen geen obstakels zoals schuren of andere gebouwen of bossen worden aangelegd.

De condities met betrekking tot de typen waarneemstations windmast, specifieke neerslagstations en bliksemdetectiemast worden beschreven in de desbetreffende hoofdstukken van het Handboek.”

De WMO hanteert de volgende classificatie voor weerstations (<https://wow.knmi.nl/meedoen/classificatie>):

- Zeer open: geen obstakels binnen 10h⁵ van de temperatuur- of neerslaginstrumenten;
- Open: de meeste obstakels of verwarmde gebouwen bevinden zich binnen 5h, maar buiten 2h van de temperatuur- of neerslaginstrumenten;
- Standaard: er zijn geen significante obstakels binnen 2h van de temperatuur- of neerslaginstrumenten;
- Beperkt: de meeste obstakels of verwarmde gebouwen bevinden zich binnen 2h, maar buiten 1h van de temperatuur- of neerslaginstrumenten;
- Beschut: er zijn significante obstakels binnen 1h van de temperatuur- of neerslaginstrumenten;
- Zeer beschut: de waarnemingen worden ernstig beperkt door obstakels;
- R (rooftop): Stations voor het meten van temperatuur of neerslag op daken dienen vermeden te worden vanwege de uitstraling van warmte door het dak en de sterke wind, waardoor de neerslag wordt verstoord;
- T (traffic): stations bij een openbare snelweg;
- U (unknown): niets bekend over de situering.

De classificering betreft alleen temperatuur- en neerslaginstrumenten. Zonneschijn en wind kan het beste zo vrij mogelijk worden gemeten, bijvoorbeeld op een dak of aan masten.

Voor windmeters wordt de volgende classificering gehanteerd:

- A: metingen worden aan een paal op 10 meter hoogte verricht; geen obstakels binnen 100 meter.
- B: de windmeters zijn aan een paal bevestigd en er zijn geen obstakels binnen 50 meter;
- C: de windmeters zijn aan een gebouw of muur bevestigd;
- U (Unknown): niet bekend;
- 0: geen windmetingen.

⁵ h is de hoogte van de sensor t.o.v. het obstakel, als de sensor op maaiveld is gesitueerd en het obstakel op 10 meter, dan is bij 10h de afstand 100 meter.