



Droogte en hitte in de stad

1. INLEIDING
2. GERELATEERDE ONDERWERPEN EN DELTAFACTS
3. SCHEMATISCHE WEERGAVE
4. TECHNISCHE KENMERKEN
5. GOVERNANCE
6. KOSTEN EN BATEN
7. PRAKTIJKERVERINGEN EN LOPEND ONDERZOEK
8. KENNISLEEMTES
9. BRONNEN & LINKS
10. DISCLAIMER

1. Inleiding

Volgens de KNMI 2014 klimaatscenario's zal klimaatverandering onder andere leiden tot hogere luchttemperaturen en meer hittegolven waardoor een grotere kans op hittestress ontstaat. In het stedelijk gebied speelt daarbij het hitte-eiland effect een versterkende rol. De klimaatscenario's geven ook aan dat de frequentie en intensiteit van droogte zullen toenemen. Neerslag kan langer uitblijven en de potentiële verdamping kan toenemen. Temperaturen tijdens hitte zullen extremer worden ([KNMI, 2014](#)). Bij een toenemende vraag naar zoetwater, mede onder invloed van klimaatverandering, zullen vraag en aanbod van zoetwater vaker uit de pas lopen, zeker wanneer hitte en droogte gelijktijdig optreden (STOWA, [Deltafact Zoetwatervoorziening](#)). In 2023 komen er nieuwe KNMI scenario's, de belangrijkste wijzigingen staan in het [Klimaatsignaal 2021](#).

De bereidheid om hittestress aan te pakken is bij steeds meer gemeenten aanwezig. Sommige effecten van droogte in de stad zijn goed zichtbaar, zoals het vergelen van gras, maar veel andere effecten zijn minder zichtbaar. Effecten van droogte kunnen ook bijdragen aan hittestress en leiden tot andere vormen van schade.

Klimaatadaptatie zou daarom niet alleen wateroverlast en hittestress, maar ook droogte in de stad moeten adresseren. In het kader van het Deltaprogramma en klimaatprogramma's is veel informatie verzameld, gegenereerd en gebundeld over droogte en hitte in stedelijk gebied. Dit Deltafact geeft hiervan een overzicht.

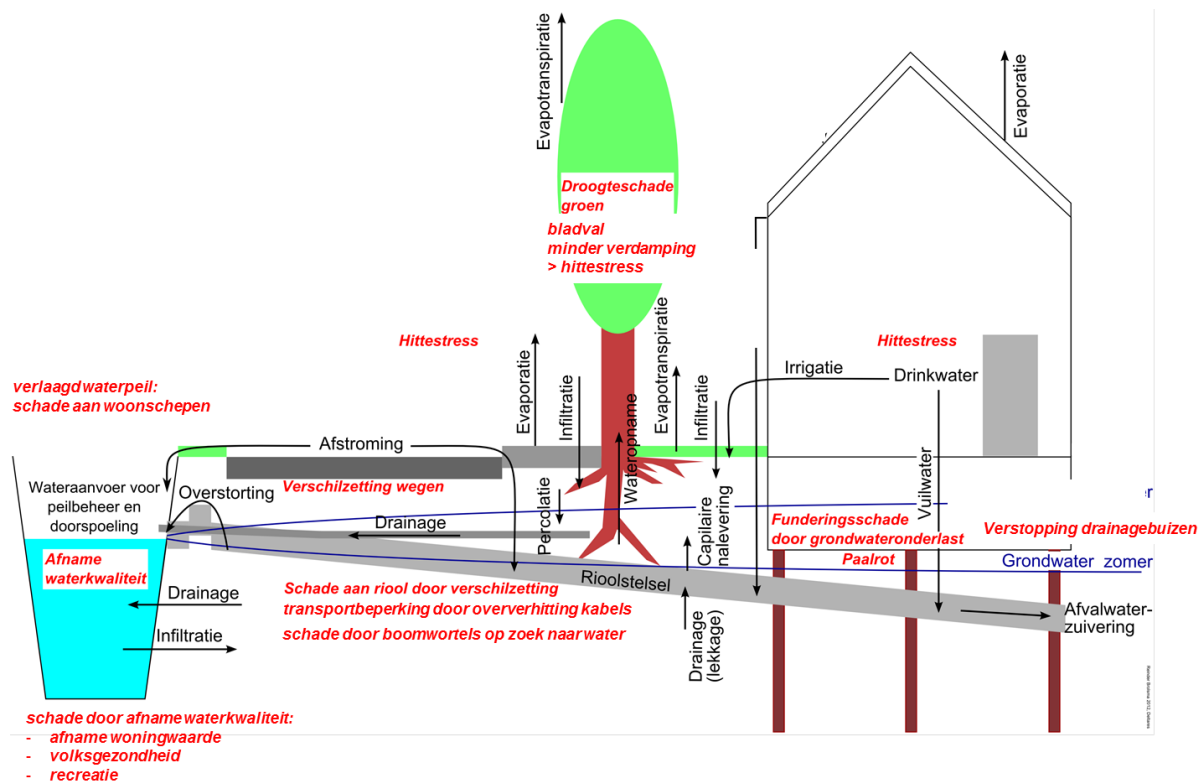
2. Gerelateerde onderwerpen en Deltafacts

Trefwoorden: Droogte, hitte, stedelijk gebied, grondwater, grondwaterbeheer, stedelijk watersysteem, stedelijk waterbeheer, grondwateronderlast, klimaatverandering, hitte-eiland.

Deltafacts: [Dynamisch peilbeheer](#), [Klimaatverandering en grondwaterbeheer in stedelijk gebied](#), [zoetwatervoorziening](#), [verdamping](#).

3. Schematische weergave

In Figuur 1 is een doorsnede van een stedelijk gebied weergegeven, met daarin de effecten en schadevormen die gerelateerd zijn aan droogte en hitte.



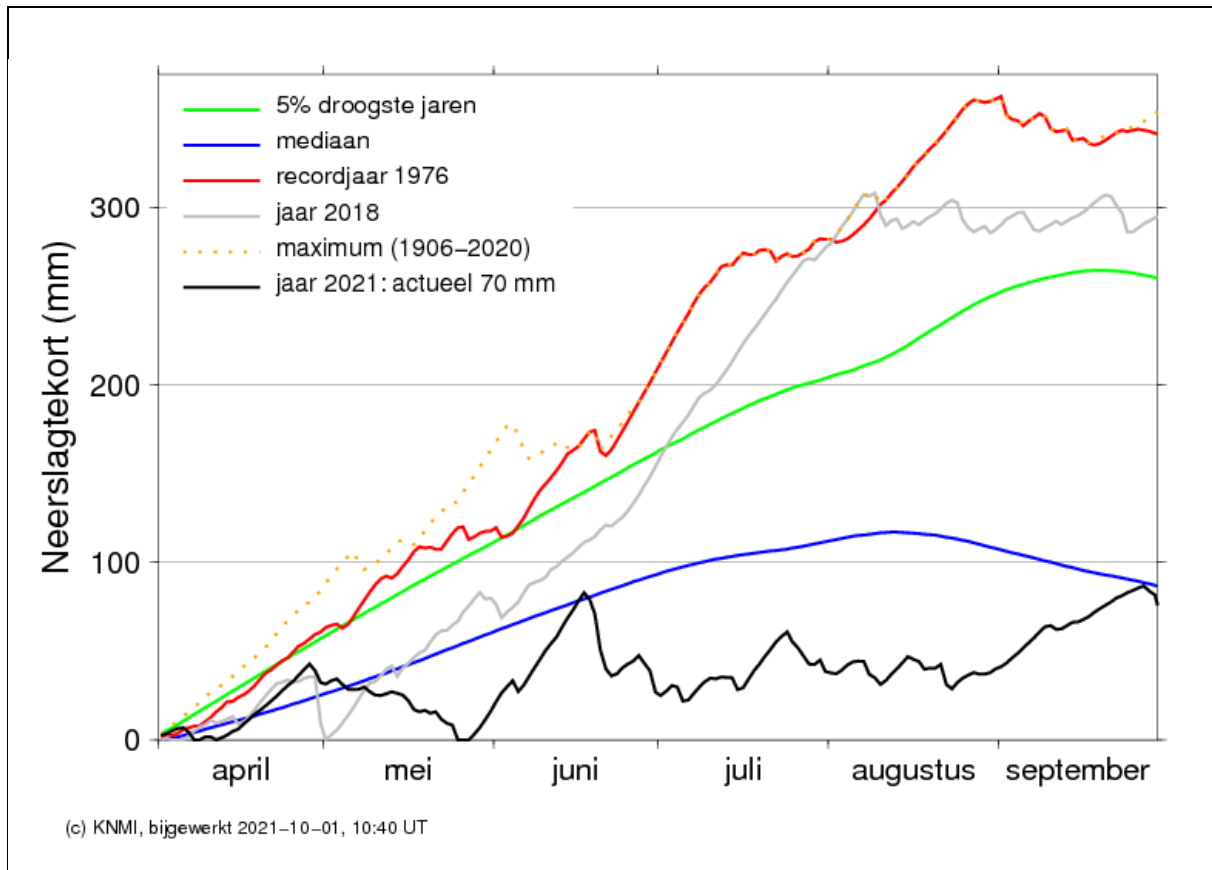
Figuur 1. Schematische weergave van het stedelijk watersysteem op straatniveau. Bron: (Brolsma et al., 2012).

4. Technische kenmerken

Droogte indicatoren

Voor droogte wordt in Nederland het 'potentieel neerslagtekort' als indicator gebruikt. Dit wordt berekend als het verschil tussen gemeten hoeveelheid neerslag en de hoeveelheid water die potentieel verdampt, op basis van gemeten temperatuur en zonneshijn. Door dit tekort cumulatief (doorlopend) voor de periode 1 april – 1 oktober te berekenen en weer te geven, (figuur 2) ontstaat een globaal beeld van de mate van droogte in een bepaald jaar. De berekening van het neerslagtekort is in juni 2020 geactualiseerd (KNMI, 2020). Het maximale neerslagtekort gedurende het zomerhalfjaar wordt gebruikt om droogte te karakteriseren (Beersma & Buishand, 2002). In 2018 trad dit maximum begin augustus op, het neerslagtekort bedroeg toen ruim 300 mm. Als gevolg van regenval in augustus en september steeg het neerslagtekort in 2018 niet verder, en bleef 1976 recordhouder met circa 360 mm. De beschrijving van droogte aan de hand van het neerslagtekort zoals door het KNMI gedefinieerd moet vooral gezien worden als een klimatologische maat. De indicator is in eerste instantie ontworpen voor

agrarische doeleinden. Vooral in droge periodes zal de referentieverdamping de werkelijke verdamping overschatten. Verdamping van sterk verstedelijkt gebied is waarschijnlijk niet aan de hand van potentiële verdamping te beschrijven [Jacobs et al., 2015](#).



Figuur 2. Doorlopend potentieel neerslagtekort in Nederland in 2021. Landelijk gemiddelde over 13 stations Bron: [KNMI](#).

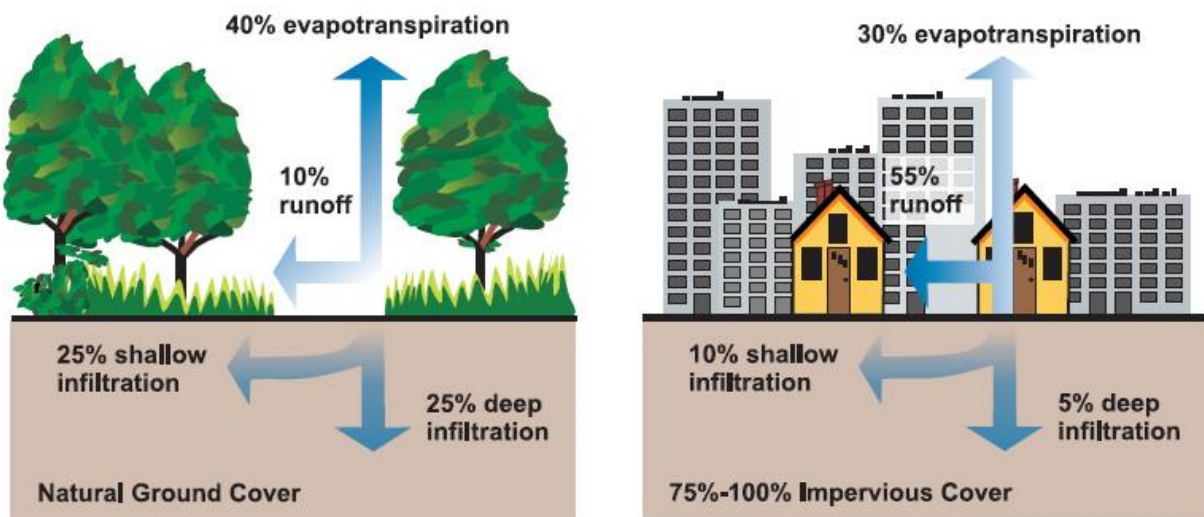
Voor de zoetwaterverdeling in Nederland zijn ook lage rivierafvoeren van belang als maat voor droogte ([Beersma & Buishand, 2002](#)). Het zogenaamde 'afvoerdeficit' wordt voor het zomerhalfjaar bepaald door Rijnafvoeren die lager zijn dan een bepaalde drempelwaarde, en de dan optredende verschillen tussen de drempelwaarde en de lage afvoer te sommeren.

Een hittegolf wordt door het KNMI gedefinieerd als een opeenvolging van minimaal 5 zomerse dagen (maximumtemperatuur 25,0 °C of hoger) in De Bilt, waarvan er minimaal 3 tropisch (maximumtemperatuur 30,0 °C of hoger) zijn. Het KNMI publiceert een [lijst van hittegolven](#) en hun duur. Problemen met hitte in stad

ontstaan niet alleen door dit hete weer, maar ook doordat stedelijk gebied deze hitte versterkt. Steden zijn gemiddeld warmer dan het omliggende platteland. Dit is het stedelijk hitte-eiland effect (UHI). Het effect doet zich ook in Nederland voor, zowel bij grotere steden als bij kleinere kernen ([Steeneveld et al., 2011](#); [Rovers et al., 2014](#)). Het hitte-eiland betekent dat met name in de avond en 's nachts de *luchttemperatuur* in de stad enkele graden hoger is dan in de omgeving (Oke et al., 2017). Daarnaast kan overdag de stad op bepaalde plekken erg heet worden, bijvoorbeeld door een gebrek aan schaduw of de uitstraling van warmte uit verharde oppervlaktes. Op deze locaties is de *gevoelstemperatuur*, ook wel aangeduid met de PET-waarde (Physiological Equivalent Temperature), heel hoog. De gevoelstemperatuur kan meer dan 20 graden verschillen tussen verschillende locaties in de stad ([Kluck et al., 2020](#)).

Relatie tussen verdamping, droogte en hitte in de stad

Eén van de oorzaken van het UHI effect is de gereduceerde verdamping in steden (figuur 3). De lagere verdamping in het stedelijk gebied is voor een groot deel te wijten aan de versterking en de daarmee gepaard gaande reductie van het aandeel van verdampende groene en blauwe elementen (vegetatie en waterpartijen) in en



Figuur 3. Schematische weergave van de waterbalans van stedelijk gebied (rechts) vergeleken met natuurlijk gebied (links). Bron: [EPA](#).

om de stad ([EEA, 2012](#); Timmerman et al., 2015). Daarbij wordt regenwater minder geïnfilteerd en versneld afgevoerd en is minder regenwater beschikbaar voor verdamping (figuur 3). Ten slotte kan de bodem onder urbaan gebied verstoord zijn, waardoor het watervasthoudend vermogen en daardoor de potentie van planten om te transpireren is verlaagd.

De verdamping van de stad is de schakel tussen de stedelijke waterbalans en de stedelijke energiebalans, die de luchttemperatuur in de stad mede bepaalt (Oke et al., 2017). Verdampend water onttrekt energie aan het oppervlak waaruit het verdampt, en verlaagt daarmee de temperatuur. Hierdoor is ook de drijvende kracht achter voelbare warmte naar de atmosfeer kleiner, waardoor de lucht minder opwarmt. Soms ontstaat zelfs een warmtestroom naar het oppervlak toe, zodat de atmosfeer afkoelt. Al met al zorgt verdamping ervoor dat een kleiner deel van de netto binnenkomende zonne-energie (binnenkomende zonnestraling minus het gereflecteerde deel daarvan) en warmtestraling (instraling vanuit de atmosfeer minus uitstraling vanaf het oppervlak) in voelbare warmte wordt omgezet (Monteith & Unsworth, 2013). Ook zal er minder warmte tijdelijk opgeslagen zijn in stedelijke structuren (inclusief water, bodem en vegetatie). Dit reduceert de warmte-afgifte van deze structuren in de nacht en daarmee ook de intensiteit van het hitte-eiland in de lucht, dat normaal gesproken 's nachts maximaal is (Oke, 1982).

In droge perioden zal de hoeveelheid voor planten beschikbaar vocht afnemen, ook in steden. Daardoor zal de aanwezige vegetatie nog minder verdampen en is een verdere toename van de luchttemperatuur in de stad te verwachten. Dit leidt niet per se tot een vergroting van het UHI, dat immers een temperatuurverschil aangeeft. Als het omliggende platteland eveneens uitdroogt kan ook daar de temperatuur sterker oplopen, waarbij het temperatuurverschil met de stad kan afnemen. Vooral bij steden in hete en droge gebieden met voldoende irrigatie van stedelijke vegetatie komen daarom ook Urban Cool Islands voor (Lazzarini et al., 2015; Oke et al., 2017).

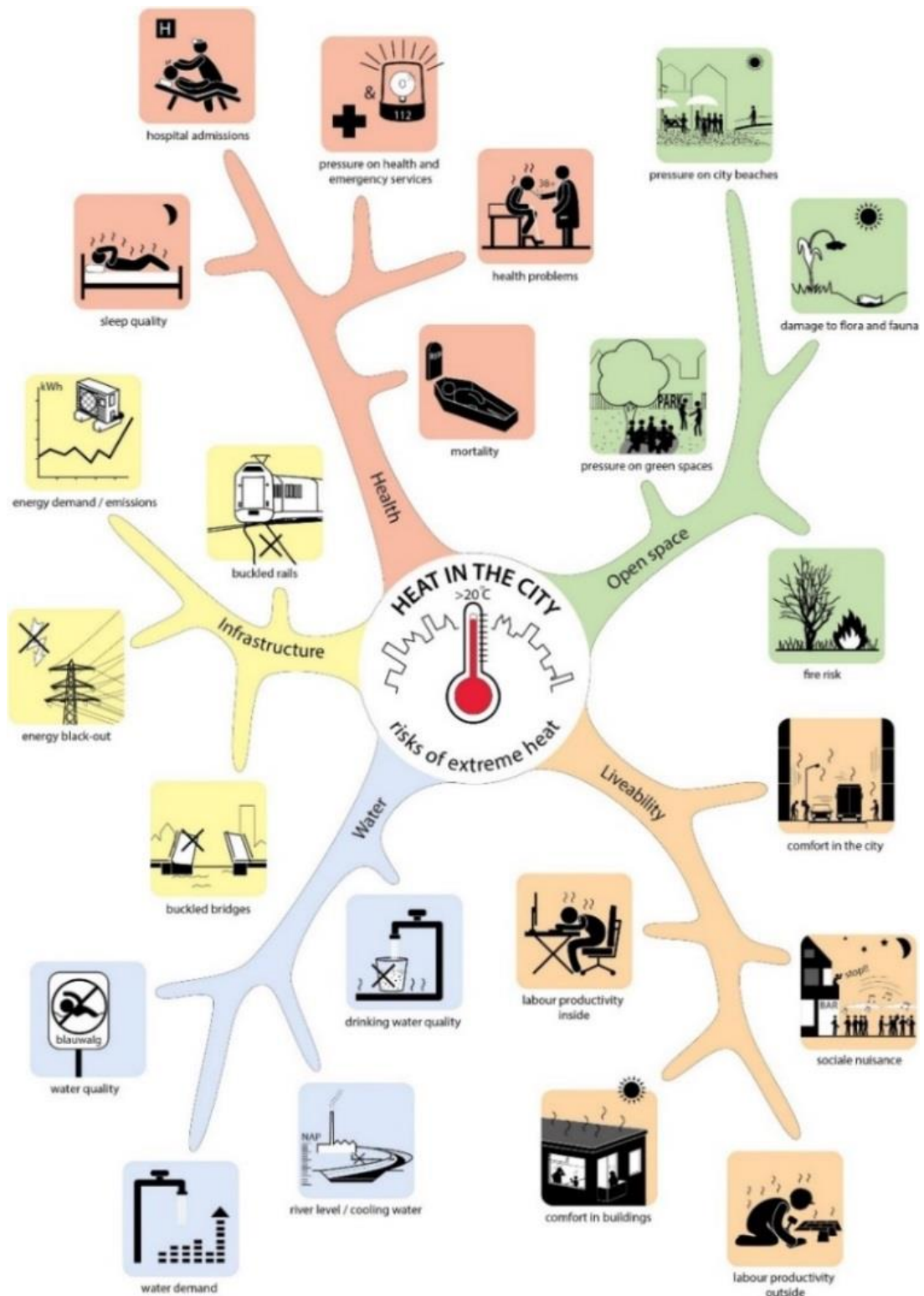
Hitte, droogte en klimaatverandering

Volgens de meest recente klimaatscenario's van het KNMI (KNMI, 2014) is de verwachting dat de gemiddelde dagtemperatuur in de zomer rond 2050 met 0,9 tot 2,4 graden zal zijn toegenomen ten opzichte van het referentieklimaat (1981-2010). In twee van de vier scenario's neemt de frequentie van droge zomers toe. Dit is toe te schrijven aan een combinatie van mogelijk (sterk) afnemende zomerneerslag en mogelijk (sterk) toenemende potentiële verdamping door hogere temperaturen en meer zonnestraling. Een dergelijke mogelijke toename in droge zomers zal regionaal verschillen. Nu al is een trend zichtbaar van toenemende droogte in het binnenland door klimaatverandering. Dit komt zowel door een toename van zomerneerslag in het kustgebied, terwijl de neerslag in het binnenland constant blijft, als door een toename van zonnestraling en daarmee potentiële verdamping in het binnenland

[\(Philip et al., 2020\)](#). De meest recente inzichten laten ook een kans op drogere lentes zien ([KNMI, 2021](#)). Met het smelten van gletsjers in de Alpen verschuift bovendien het karakter van de Rijn van een smeltwaterrivier naar een regenrivier. Daardoor is er meer kans op lage rivierafvoeren die de zoetwaterbeschikbaarheid in Nederland beïnvloeden (De Wit et al., 2008). Het gecombineerde effect van deze ontwikkelingen is als volgt samen te vatten: meer kans op hitte, meer kans op droogte en meer kans op beperking van de (zoet)wateraanvoer.

Gevolgen van hitte in de stad

Zowel hitte als droogte hebben aantoonbaar negatieve maatschappelijke gevolgen. [Klok en Kluck \(2018\)](#) hebben de gevolgen van extreme hitte in de stad gevisualiseerd via een mind map (Figuur 4). Deze mind map is gebaseerd op een internationale inventarisatie van redenen om maatregelen tegen extreme hitte in de



Figuur 4. Mindmap met gevolgen van extreme hitte en redenen om daar iets aan te doen. Bron: [Klok en Kluck \(2018\)](#). Sinds januari 2019 is een vernieuwde, interactieve versie beschikbaar.

stad te nemen. De auteurs onderscheiden vijf sectoren of domeinen waarvoor hitte nadelige gevolgen kan hebben en met grote maatschappelijke en economische kosten gepaard kan gaan, soms juist in combinatie met droogte (zie figuur 4). Ook hebben zij de (hoofd)oorzaken van deze hitte gevolgen geduid, door aan te geven hoe ieder gevolg samenhangt met luchttemperatuur (binnen en buiten) en gevoelstemperatuur ([Kluck et al., 2020](#))

1) Gezondheid

Hittestress leidt tot meer warmteziekten en een verhoogd aantal ziekenhuisopnames en kan zelfs de dood tot gevolg hebben ([Kovats en Hajat, 2008](#)). Hitte kan ook de slaapkwaliteit negatief beïnvloeden, met negatieve gevolgen voor de gezondheid ([Obradovich et al., 2017](#)). Schadelijke micro-organismen kunnen actiever worden onder invloed van hogere temperaturen waardoor de kans op infectieziekten stijgt. Omdat hitte vaak gepaard gaat met verslechterde luchtkwaliteit kan dit de gezondheid extra nadelig beïnvloeden ([Willers et al., 2016](#)).

Toenemende sterfte is wellicht het meest genoemde maatschappelijke gevolg van hitte. Dit is niet verwonderlijk, want van de aan weersextremen gerelateerde doodsoorzaken in Europa is meer dan 90% het gevolg van hitte ([EEA, 2017](#)).

Daarnaast speelt een rol dat sterfte relatief goed wordt geregistreerd ([Kovats en Hajat, 2008](#)). Op grond van de door [Huynen et al. \(2001\)](#) gepubliceerde relatie tussen gemiddelde dagtemperatuur en oversterfte in Nederland volgt dat een hittegolf in Nederland gemiddeld ongeveer 40 levens per dag eist. Een latere analyse laat zien dat het aantal overledenen mogelijk groter is: 8 per dag voor elke graad die de daggemiddelde temperatuur boven 20°C uit stijgt ([Rovers et al., 2014](#)).

Nederland kende in de zomer van 2018 twee hittegolven, waarvan een van de langste hittegolven ooit ([KNMI, 2020](#)). Toch leidde deze zomer tot nauwelijks extra sterfte in Nederland, mogelijk door de effectiviteit van hitteplannen in combinatie met het feit dat een griepgolf eerder dat jaar veel levens had geëist. Uitzondering was een iets toegenomen sterfte onder mensen van 80 jaar en ouder ([CBS, 2018](#)). Ouderen met een leeftijd boven 75 jaar zijn het gevoeligst, met name als ze aandoeningen hebben aan hart, ademhaling of nieren ([Kovats en Hajat, 2008](#)).

2) Buitenruimte

Omdat mensen overdag buiten verkoeling zoeken kunnen stadsstranden en –parken onder druk komen te staan. Verder vallen toegenomen risico's op brand en schade aan flora en fauna in deze categorie. Bij deze laatstgenoemde effecten speelt de

correlatie tussen droogte en hitte een belangrijke rol. Het risico op bosbrand in stedelijk gebied is lange tijd onderschat ([EEA, 2012](#)) en wordt dat mogelijk nog steeds.

3) Leefbaarheid

Thermisch comfort zowel in de buitenruimte als in gebouwen is een belangrijk aspect van de leefbaarheid van een stad en maatregelen tegen hitte richten zich vaak op deze aspecten ([Rovers et al., 2014](#)). Omdat thermisch comfort zowel fysieke ([Kjellstrom et al., 2016](#)) als mentale prestaties ([Cedeño Laurent et al., 2018](#)) beïnvloedt, wordt verminderde arbeidsproductiviteit van zowel binnen- als buitenwerkers onder deze categorie geschaard. Ook sociale overlast door mensen die vanwege de warmte 's nachts buiten verblijven, valt in deze categorie.

4) Water

Zeker als hitte en droogte met elkaar gepaard gaan, zal de watervraag toenemen en zal tegelijkertijd de aanvoer van water via rivieren afnemen (zie [STOWA, Deltafact Zoetwatervoorziening](#)). Drinkwaterkwaliteit vraagt speciale aandacht wegens een toenemende temperatuur van het drinkwater op warme plekken in steden, hetgeen het risico vergroot op de groei van pathogenen zoals de legionellabacterie in het drinkwaternetwerk ([Agudelo-Vera et al., 2015](#)). Ook de kwaliteit van oppervlaktewater is een aandachtspunt. Open water in de stad kan sterker opwarmen, afhankelijk van de waterdiepte en omgevingsfactoren ([Wilschut et al., 2018](#)) en daarmee neemt het risico op ontwikkeling van onder andere blauwalg toe ([Kosten et al., 2012](#)), zeker in samenhang met vermessing van water die in stedelijk gebied kan optreden ([Lurling et al., 2010](#)). Blauwalg brengt gezondheidsrisico's met zich mee, hetgeen van belang is omdat open water in de stad voor recreatieve doeleinden zoals zwemmen wordt gebruikt, juist als het warm is ([Van der Meulen et al., 2022](#)).

5) Infrastructuur

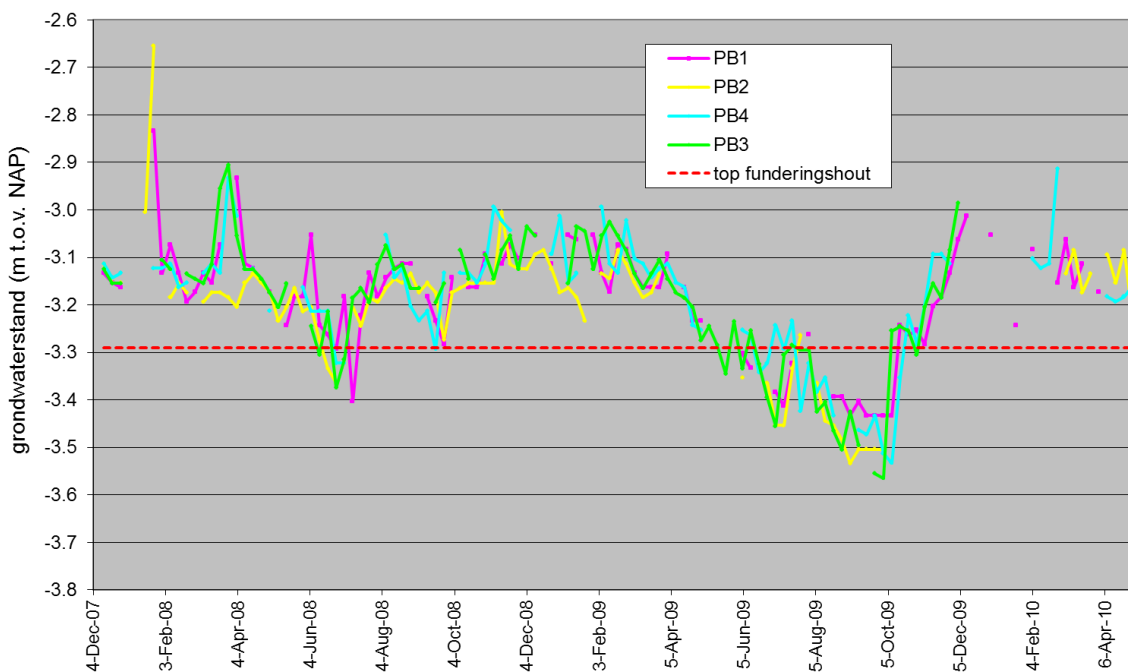
Door hitte neemt de energievraag voor airconditioning toe ([Sailor & Fan, 2002](#)). Tegelijkertijd is er een grotere kans op een energie-blackout, vooral als droogte en hitte samengaan ([Van Vliet et al., 2012](#)). Daarnaast kunnen problemen in de vervoersinfrastructuur ontstaan, zoals vastlopende bruggen, uitzettende rails en beschadiging van het wegdek.

Gevolgen van droogte in de stad

Droogte in de stad kan leiden tot overlast en schade via het uitzakken van grondwaterstanden, het uitzakken van het oppervlaktewaterpeil en afname in de kwaliteit van oppervlaktewater.

1) Lagere grondwaterstanden

Bij het langdurig uitblijven van neerslag daalt de grondwaterstand. Dit gebeurt door verdamping via vegetatie en direct vanuit de bodem, door afstroming van grondwater naar drainerende waterlopen, en door wegzijging naar diepere watervoerende pakketten (Figuur 5). De daling van de grondwaterstand kan door aanvoer van kwelwater of vanuit het oppervlaktewater worden beperkt. In veel bestaand stedelijk gebied is echter weinig oppervlaktewater aanwezig, of heeft de bodem een laag doorlaatvermogen.



Figuur 5. Gemeten grondwaterstandsverloop in een straat in Rotterdam. Als gevolg van verdamping en wegzijging naar een dieper watervoerend pakket zakt de grondwaterstand in de droge zomer van 2009 circa 20 cm dieper uit dan in de vrij natte zomer van 2008. Bron: Deltares.

Mogelijke effecten van (tijdelijke) lagere grondwaterstanden zijn:

- Houten paalfunderingen kunnen droog komen te staan, waardoor zuurstoftoevoer en vervolgens schimmelaantasting kan plaatsvinden. Na gemiddeld 10 tot 20 jaar cumulatieve droogstand is de aantasting zover

- gevorderd dat de draagkracht van de fundering in gevaar kan komen (o.a. [Van Etten et al., 2000](#)). Omdat droogstand in veel oude stadswijken al vele jaren optreedt, kan enkele maanden per jaar extra droogstand als gevolg van droogte de restlevensduur van de houten paalfunderingen drastisch verlagen.
- Maaiveld daling als gevolg van zetting, veenoxidatie of krimp door uitdroging van kleilagen. Zetting is het gevolg van in de ruimte variërende toenamen van korrelspanningen in de grond. De toename van de korrelspanning kan worden veroorzaakt door grondwaterdaling, en/of door een toename van de bovenbelasting. Maaiveld daling kan vervolgens leiden tot:
 - o Toename van de inundatiehoogte bij regenwateroverlast, en daarmee van de kans op schade.
 - o Toename van grondwateroverlast, bij gelijkblijvende (normale) grondwaterstand
 - o Schade aan niet op palen gefundeerde gebouwen, als het maaiveld ongelijkmatig daalt;
 - o Schade aan gebouwen met paalfunderingen 'op kleef';
 - o Schade aan infrastructuur als het maaiveld ongelijkmatig daalt (Figuur 6);
 - o Schade bij aansluitingen tussen wel- en niet onderheide infrastructuur en gebouwen;



Figuur 6. Nieuwsbericht Gemeente Amstelveen, september 2018.

- Bij ondergronds elektriciteitstransport komt warmte vrij. Wanneer ondergrondse hoogspanningskabels boven de grondwaterspiegel komen te liggen, kan onvoldoende warmte worden afgegeven en wordt soms, om

oververhitting te voorkomen, het transport beperkt ([Hoogvliet et al, 2012](#)). Dit kan leiden tot stroomtekort in gebieden tijdens lage grondwaterstanden. Over dit proces is geen verdere informatie gevonden.

- Toename van verstopping van drainagebuizen als gevolg van oxidatie van ijzer. IJzeroxidatie treedt op wanneer de grondwaterstand uitzakt tot nabij of onder het drainageniveau. Dit is relevant in gebieden met ijzerhoudend grondwater, waar op veel plaatsen in Nederland sprake van is. Verstopping bekort de functionele levensduur van de buisdrainage en/of noodzaakt tot een hogere onderhoudsfrequentie (zie bv. Van de Ven, 2011);
- Droogteschade aan groen kan optreden bij bomen en struiken die normaal gesproken gevoed worden vanuit het grondwater. Als het grondwater diep wegzakt kan dit leiden tot vroegtijdige bladval. Sommige boomsoorten kunnen hier niet goed tegen en van deze boomsoorten zal een deel direct afsterven. Belangrijk is ook een verwachte toename van secundaire aantastingen (ziekten en plagen) bij bomen die een vorm van droogtestress hebben. Een deel hiervan zal hierdoor kunnen afsterven. Hoe belangrijk deze risicofactor is, hangt vooral af van de duur van droge perioden.
- Een ander mogelijk effect van droogte in relatie tot groen is dat boomwortels op zoek gaan naar water op grotere diepte en daarbij ondergrondse infrastructuur binnendringen en beschadigen. Over dit proces is geen verdere informatie gevonden.

2) Verlaagd oppervlaktewaterpeil

In Nederland is voor wat betreft het oppervlaktewaterpeilbeheer een onderscheid te maken in peilbeheerst en niet-peilbeheerst gebied. In een groot deel van Nederland wordt het peil beheerst door middel van wateraanvoer vanuit de grote rivieren en meren. De watervraag van stedelijk gebied staat niet letterlijk in de verdringingsreeks (Figuur 7). Deze komt deels terug in stabiliteit van waterkeringen en het voorkomen van klink en zetting. Gezien de hoge prioriteit van die watervragers zal naar verwachting niet snel besloten worden tot peilverlagingen in grote delen van Laag-Nederland.



Figuur 7. Landelijke verdringingsreeks ([Kenniscentrum InfoMil](#)).

In delen van Hoog-Nederland (op de zandgronden) is gebiedsdekkende wateraanvoer niet mogelijk door de hoge ligging. Tijdens langdurige droogte zal hier eerder sprake zijn van het uitzakken van oppervlaktewaterpeilen en droogval van watergangen.

Mogelijke effecten van het dalen van het oppervlaktewaterpeil zijn:

- Schade aan drijvende woningen en woonboten, met name toegangsconstructies en huisaansluiting van nutsvoorzieningen;
- Instabiliteit van kaden;
- Langdurige droogte in het groeiseizoen kan leiden tot sterke groei van helofyten (zoals riet) op voedselrijke natuurvriendelijke oevers. Dit heeft negatieve effecten op de biodiversiteit en natuurbeleving ([Sollie et al., 2011](#)). Er zal een intensievere beheersinspanning gepleegd moeten worden om de oever 'functioneel' te houden.
- Vermindering van de waterkwaliteit; zie de volgende paragraaf.

3) Afname oppervlaktewaterkwaliteit

Droogte in de stad kan op drie manieren bijdragen aan een verslechtering van de stedelijke oppervlaktewaterkwaliteit:

- Verlaagde oppervlaktewaterpeilen kunnen leiden tot een extra stijging van de watertemperatuur doordat de straling en voelbare warmtestroom geabsorbeerd worden door een kleiner watervolume. Hierdoor neemt de maximumtemperatuur van het water toe. Ondiep water koelt echter ook sneller af, waardoor de minimum watertemperatuur en de gemiddelde

temperatuur mogelijk lager blijven [Wilschut et al., 2018](#). In stilstaand water ontstaat soms een gelaagdheid, die 's nachts en bij opstekende wind echter veelal doorbroken wordt, vooral bij geringere dieptes ([Jacobs et al., 2009](#)).

- Daar waar water van elders wordt aangevoerd om het stedelijk watersysteem op peil te houden en door te spoelen, komt vaak water met een mindere kwaliteit (vooral hogere nutriëntconcentratie) mee uit het landelijk gebied.
- Tijdens droogte vindt ophoping op het verhard oppervlak plaats van zware metalen, rubber, stof, olieresten, benzineresten en organisch materiaal, onder meer door vroegtijdige bladval. Bij zware regenval kan deze vervuiling vervolgens via (overstortingen uit) de riolering terechtkomen in het oppervlaktewater, en daar leiden tot verhoogde concentraties aan voedingsstoffen, algenbloei, meer bacteriën en lagere zuurstof concentraties.

Mogelijke effecten van deze veranderingen in de waterkwaliteit zijn:

- Op de tijdschaal van een enkele zomer kunnen stankoverlast, vissterfte en een verminderde waterbeleving leiden tot economische schade voor de recreatiesector.
- Bij structurele vermindering van de waterkwaliteit kunnen er negatieve gevolgen zijn voor de Woz-waarde van woningen in de directe nabijheid van het water.
- Sommige soorten blauwalg kunnen giftige stoffen (cyanotoxines) produceren en verspreiden waardoor zwemmers en dieren ziek kunnen worden ([Burger en Van der Vat., 2007](#)). Met het toenemende gebruik van water in de stad voor recreatie zou dit van steeds groter belang kunnen worden ([Van der Meulen et al., 2020](#)).

Maatregelen tegen hitte in de stad

Bij hittemaatregelen is het belangrijk om een onderscheid te maken tussen maatregelen die er op gericht zijn stads-breed de *luchttemperatuur* te verlagen, en maatregelen die lokaal een lagere *gevoelstemperatuur* realiseren. Maatregelen die tot doel hebben de luchttemperatuur te verlagen, zijn gebaseerd op verdamping, beschaduwing, ventilatie en reflectie. Om de gevoelstemperatuur te verlagen, zijn beschaduwing en ventilatie met name van belang ([Kluck et al., 2020](#)).

Verbetering van de groenblauwe infrastructuur, inclusief verbeteringen aan de bodem onder de stad, wordt gezien als een van de belangrijkste maatregelen om

hitte in steden tegen te gaan en hun leefbaarheid te behouden ([Rovers et al., 2014](#); [Gehrels et al., 2016](#); [Pisello et al., 2018](#)). Maatregelen in de groenblauwe sfeer helpen niet alleen de verdamping van een stad weer op peil te brengen en zo hitte te mitigeren, maar hebben veel bijkomende voordelen zoals het verbeteren van de waterberging, het reduceren van geluidsoverlast, verbeteren van de luchtkwaliteit en stressreductie ([Gehrels et al., 2016](#)). Verdampingskoeling is uiteindelijk vooral merkbaar op de stadsschaal. Volgens een in Nederland geldende vuistregel daalt het UHI met ongeveer 0.6°C per 10% groen ([Rovers et al., 2014](#)). Om een dergelijk effect te bereiken moet dus veel groen worden toegevoegd en het effect zal in de nacht maximaal zijn. Het type groen is volgens deze vuistregel van minder belang.

Hitte-mitigatie met groen-blauwe interventies verhoogt de watervraag in stedelijk gebied. Omdat hitte en droogte vaak samengaan, zijn aanpassingen nodig aan het stedelijk gebied om in de watervraag voor stadskoeling door verdamping te kunnen blijven voorzien ([Coutts et al., 2012](#); [Van Hattum et al., 2016](#)). Een voor verdamping optimale grondwaterstand helpt ook. Daarmee rijst de vraag hoeveel water nodig is om in een droge periode minimaal een actuele verdamping op peil te houden die tot de gewenste verkoeling leidt en dus ook hoeveel een stad normaal gesproken verdampt. [De Graaf et al. \(2013\)](#) geven een overzicht van verdampingsmetingen in stedelijk gebied tot en met 2013, veelal met een lokaal karakter, dan wel op basis van hydrologische balansen. In totaal konden zij zeven studies van verschillende aard in hun analyses betrekken. De metingen suggereren een lineair verband met de versteningsgraad van steden, wat overeenkomt met een lineaire toename bij toenemende groenfractie ([Brolsma et al., 2012](#)) mits groenfractie en versteningsgraad ongeveer complementair mogen worden verondersteld. [De Graaf et al. \(2013\)](#) constateren dat verdamping van steden mogelijk wordt onderschat en signaleren een grote onzekerheid in de verdampingsschatting, met mogelijk grote gevolgen voor schattingen van waterbehoefte ten tijde van droogte. Informatie over verdamping op wijk- of stadsschaal is nodig om de totale waterbehoefte van de stad te bepalen in samenhang met de watervraag in andere sectoren, zoals drinkwatervoorziening, en met het wateraanbod. Op kleinere schaal is informatie over waterbehoefte van planten zinvol. Informatie over verdamping van steden is echter relatief schaars (zie KENNISLEEMTES).

Een veelheid aan maatregelen tegen hitte en hittestress zonder een (grote) *directe* invloed op de watervraag van een stad is denkbaar, al dan niet in combinatie met (water vragende) groenblauwe maatregelen. Hieronder vallen bijvoorbeeld

hitteplannen, het gebruik van andere materialen en stedenbouwkundige maatregelen zoals het voorzien in ventilatiecorridors en letten op wijk- en woningoriëntatie. Op lokale schaal zijn schaduw en ventilatie vaak veel effectiever voor mitigatie van hitte en hittestress in de buitenruimte dan verdamping ([Gehrels et al., 2016](#); [Pisello et al. 2018](#)), gezien het effect ervan op de gevoelstemperatuur ([Kluck et al., 2020](#)). Naast schaduw door constructies of doeken, kunnen voor schaduwwerking bomen worden ingezet, die dan tevens bijdragen aan de verdamping van de stad. Hoewel het grootste verkoelend effect van bomen op lokale schaal dan niet aan verdampingskoeling is toe te schrijven vragen bomen natuurlijk evengoed water om te kunnen overleven.

Maatregelen tegen droogte in de stad

Maatregelen tegen het uitzakken van grondwaterstanden

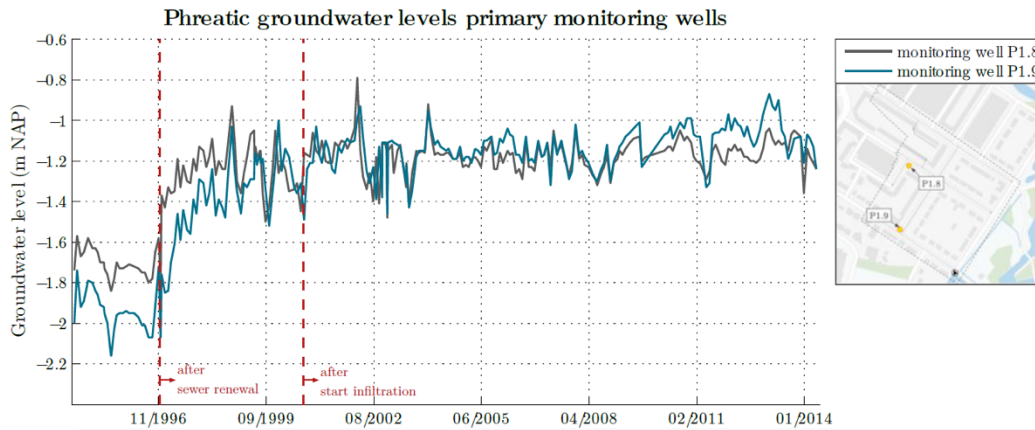
Grondwaterstands dalingen kunnen worden tegengegaan met de onderstaande maatregelen ([Bewonersorganisatie Oud Hilleegersberg, 2014](#)):

1. Het verhogen van het oppervlaktewaterpeil;
2. Het verminderen van drainage door lekke riolen;
3. Het verminderen van wegzijging (afstroming van grondwater naar diepere watervoerende pakketten);
4. Het vergroten van de grondwateraanvulling door infiltratie van regenwater.
5. Het vergroten van de grondwateraanvulling door infiltratie van oppervlaktewater.
6. Het vergroten van de grondwateraanvulling door infiltratie van gezuiverd grijs water.

ad 1. Het verhogen van het oppervlaktewaterpeil lijkt in de praktijk moeilijk realiseerbaar, doordat veel verschillende belangen er door worden beïnvloed en de toelaatbare marges beperkt zijn. Bovendien is deze maatregel niet effectief in grote delen van stedelijk Nederland waar weinig oppervlaktewater aanwezig is.

ad 2. In bestaand stedelijk gebied kan vervanging van oude, drainerende riolen door nieuwe, waterdichte riolen leiden tot grondwaterstijgingen van enkele decimeters. Deze maatregel beïnvloedt de grondwaterstand structureel; niet alleen tijdens droogte (zie Figuur 8). Om te voorkomen dat dit doorslaat naar grondwateroverlast in natte perioden, wordt steeds vaker drainage als begeleidende maatregel aangelegd.

ad 3. Wegzijging kan worden verminderd door de effecten van onttrekkingen in diepe watervoerende pakketten te beperken of door het tegengaan van lekkages in



Figuur 8. Effecten van rioolvernieuwing (1996) en infiltratie (2000) op de grondwaterstand, Land van Valk, Dordrecht. Bron: [Votel \(2015\)](#).

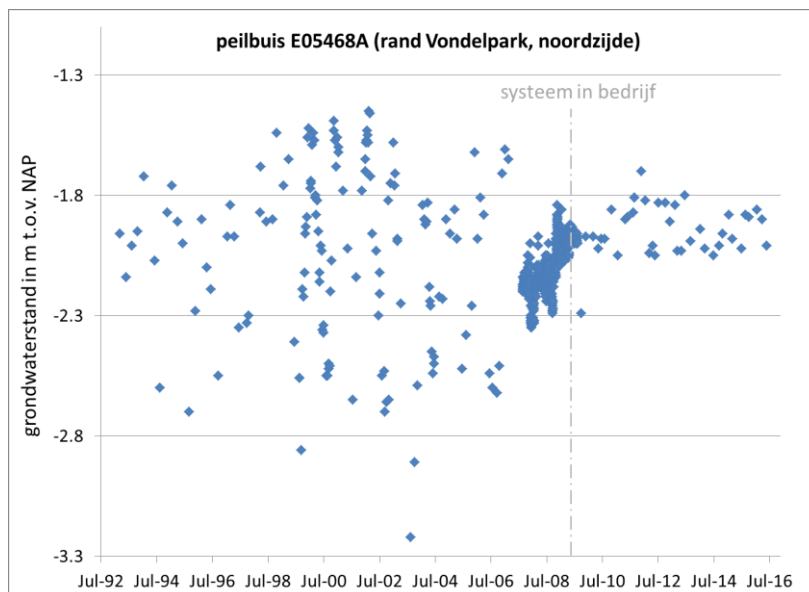
afsluitende lagen door bijvoorbeeld het trekken van oude paalfunderingen of doorboringen voor WKO's. Dit kan bijvoorbeeld door middel van strengere eisen aan vergunningen voor onttrekkingen in risicogebieden.

ad 4. Een inmiddels gangbare manier om de grondwateraanvulling te vergroten is het afkoppelen en infiltreren van regenwater. Tijdens een langdurige droogte helpt dit echter niet om de grondwaterstand op peil te houden, er is immers geen water beschikbaar om te infiltreren. De meerwaarde van dergelijke maatregelen ligt dan ook vooral in het verlagen van risico's op wateroverlast en afname van de waterkwaliteit door hevige regenval.

ad 5. Een alternatief is om water aan te voeren via een drainage-infiltratieleiding vanuit het oppervlaktewater: 'actief grondwaterpeilbeheer' ([Deltares/Wareco/Fugro, 2017](#)). Diverse praktijkvoorbeelden tonen de effectiviteit van deze maatregel in openbaar gebied aan (Figuur 9). Particulieren kunnen hierop aansluiten om de grondwaterstand op het eigen perceel te regelen. Aandachtspunt is dat bij grootschalige toepassing een invloed op de landelijke watervraag ontstaat die niet verwaarloosd mag worden. Recentelijk is een [standaard voor actief grondwaterpeilbeheer-systemen](#) ontwikkeld om gemeenten te voorzien in kennis voor het grootschaliger toepassen van actief grondwaterpeilbeheer.

Figuur 8 illustreert dat de geschetste maatregelen complementair zijn. De rioolvernieuwing in 1996 veroorzaakte een structurele stijging van de grondwaterstand, die evenwel nog steeds daalde in de zomerperioden. Na ingebruikname van het infiltratiesysteem in 2000 werden ook deze uitzakkingen minder.

Figuur 9. Effecten van infiltratie vanuit de Singel op de grondwaterstand aan de noordzijde van het Vondelpark in Amsterdam. Bron: [Deltares/Wareco/Fugro, 2017](#)



Maatregelen tegen het uitzakken van het oppervlaktewaterpeil

Zoals beschreven zal naar verwachting niet snel besloten worden tot peilverlagingen in grote delen van Laag-Nederland. Peilverlaging of droogval in stedelijke gebieden in Hoog-Nederland kan worden bestreden met lokale, maar vooral ook bovenlokale maatregelen. Hiervoor wordt verwezen naar het [Deltaplan Zoetwater 2022-2027](#) in het Deltaprogramma Hoge Zandgronden.

Maatregelen tegen afname oppervlaktewaterkwaliteit (als gevolg van droogte)

- Maatregelen tegen uitzakkende oppervlaktewaterpeilen (als oorzaak van een afname van de oppervlaktewaterkwaliteit) zijn hierboven kort beschreven.
- De inlaat van vervuild gebiedsvreemd water kan worden beperkt als de intrinsieke kwaliteit van het stedelijk oppervlaktewater verbetert (toelichting volgt hieronder). Daarnaast is verbetering van de kwaliteit van het inlaatwater een denkbare oplossingsrichting. Deze is te veelomvattend om in het kader van één Deltafact te behandelen.
- Verbetering van de intrinsieke stedelijke waterkwaliteit kan worden bereikt met een veelheid aan maatregelen in het oppervlaktewater- en hemelwaterafvoersysteem. Naast de al genoemde afkoppel- en infiltratiemaatregelen zijn dit het omschakelen van gemengde naar gescheiden rioleringen, recirculatie, aanleg van helofytenfilters, bergbezinkbassins, wadi's en andere tijdelijke bergingsvoorzieningen, het

opheffen van kopwatergangen, etc.. Ook deze groep maatregelen is zo veelomvattend, zowel qua type maatregelen als reeds opgedane praktijkervaringen, dat deze niet in het kader van één Deltafact behandeld kan worden.

5. Governance

Maatregelen tegen hitte en droogte in de stad zijn een zaak van samenwerking tussen verschillende belanghebbende partijen op verschillende schaalniveaus. Bij vrijwel alle hierboven beschreven problemen en oplossingen zijn andere partijen belanghebbend. Partijen zullen afspraken moeten maken welke bijdrage door welke maatregel geleverd kan worden. Dit hangt af van wat de lokale situatie en het specifieke probleem vraagt, en is dus maatwerk.

Uit in [NKWK](#) (Nationaal Kennis- en innovatieprogramma Water en Klimaat) kader gehouden interviews met gemeente-ambtenaren en andere professionals kwam naar voren dat op gemeentelijk niveau de communicatie tussen verschillende afdelingen suboptimaal is. Beoordeling van plannen in het kader van ruimtelijke ordening verloopt vaak nog lineair, van het ene bureau naar het andere. Dit hindert implementatie van maatregelen om een stad klimaatbestendiger te maken, omdat synergie met andere beleidsdomeinen gemakkelijk over het hoofd wordt gezien. Dit geldt juist ook voor de onderwerpen hitte en droogte, omdat het gevoel van urgentie en de kennis vaak nog ontbreken.

Een belangrijk element is de koppeling van burgerinitiatieven aan de klimaatbelangen van publieke partijen. Hiervoor is een flexibel publiek planproces noodzakelijk dat gepaard gaat met een actieve communicatie met private partijen, inclusief bewoners ([Rovers et al., 2014](#); [Groot et al., 2015](#)). Ook bij maatregelen tegen hitte is dit van groot belang omdat bewoners en bedrijven een belangrijke rol kunnen spelen, van maatregelen in het sociale domein ("letten op elkaar") tot maatregelen in het fysieke domein ("groen in de eigen tuin"). Groene maatregelen in de publieke ruimte en in de private sfeer zijn even effectief. Gegeven het grote aandeel private ruimte is het daarom interessant om te kijken hoe openbaar en particulier groen gezamenlijk hun bijdrage kunnen leveren. Gemeenten hebben echter vaak moeite om de particulieren bij het hittevraagstuk te betrekken, mede omdat het hitte doorgaans niet als een serieus probleem wordt onderkend. [Operatie Steenbreek](#) richt zich op het onttegenen van de particuliere tuin. Steeds meer

gemeenten zijn aangesloten, maar moeten hieraan nog invulling geven. Hierbij hoort ook het verantwoord omgaan met zoetwater in tijden van droogte, door gemeente en particulieren.

Samenwerking tussen gemeenten en waterschappen in de (afval)waterketen, ter verbetering van de stedelijke waterkwaliteit, is al langer een feit. Met betrekking tot grondwater is in het kader van de Waterwet de verdeling van verantwoordelijkheden tussen gemeente, waterschap en particulieren formeel geregeld. Een beschrijving van deze verdeling en hoe deze uitwerkt in de praktijk, is te vinden in de [Deltafact Klimaatverandering / grondwaterbeheer stedelijk gebied](#).

Voor wat betreft samenwerking in het op peil houden van stedelijk grondwater is er nog weinig praktijkervaring. Een voorbeeld van een dergelijke samenwerking zijn de bestuurlijke afspraken met betrekking tot grondwater en funderingen in Rotterdam-Hillegersberg. De basis voor samenwerking tussen gemeente, hoogheemraadschap en bewonersorganisaties, is in dit geval een gezamenlijke bezorgdheid en belang t.a.v. lage grondwaterstanden, waarbij iedere partij vanuit de eigen verantwoordelijkheid een bijdrage levert ([Actualisatie bestuurlijke afspraken grondwater en funderingen, 2016](#)).

Uit een consultatie onder ambtenaren en bestuurders van overheidspartijen, om meer inzicht te krijgen in de meningen over actief grondwaterpeilbeheer, kwam naar voren dat droogte in de stad niet als een probleem wordt beschouwd, omdat de hieraan gerelateerde schades zich langzaam voltrekken en weinig zichtbaar zijn ([Deltares/Wareco/Fugro, 2017](#)). Dit vraagt om een inspanning om dit probleem breder maatschappelijk te agenderen bij bestuurders. Daarbij kan de verbinding worden gelegd met andere maatschappelijke thema's als duurzaamheid, een leefbare stad en energietransitie.

6. Kosten en baten

Een uitgebreid overzicht van de kosten en baten van hitte en droogte in de stad (uitgedrukt als vermeden schade) wordt gegeven door ([Hoogvliet et al, 2012](#)). Een beschrijving hiervan is te vinden in de [Deltafact Klimaatverandering / grondwaterbeheer stedelijk gebied](#). Recentelijk is in het kader van [NKWK](#) is de "[Klimaatshadeschatter](#)" ontwikkeld, die een schatting van de schadekosten door klimaatverandering geeft per gemeente voor de periode tot 2050. De klimaatshadeschatter neemt naast de thema's hitte en droogte ook wateroverlast mee. De schades aan openbaar groen ten gevolge van droogte zijn recentelijk

[onderzocht](#). Hieruit kwam naar voren dat er nu al moet worden ingezet op droogtebestendig groen, om ook in de toekomst van de baten van stedelijk groen te kunnen profiteren. Het onderzoek concludeert dat samenwerking tussen groenbeheerders, stedenbouwkundigen en waterbeheerders essentieel is om tot droogtebestendiger stedelijk groen te komen.

Voor de kosten en de baten van hitte- en droogtmaatregelen, kan een inschatting worden gemaakt middels de [Toolbox Klimaatbestendige Stad](#). Voor de maatregel 'actief grondwaterpeilbeheer' zijn de kosten en baten in beeld gebracht ([Deltares/Wareco/Fugro, 2017](#)). In gebieden gevoelig voor maaiveldafval door seizoensgebonden lage grondwaterstanden levert actief grondwaterpeilbeheer in combinatie met rioolvervangingswerken in openbaar gebied meer op dan het kost. Dit geldt in het bijzonder in toekomstige nieuwbouwwijken, door aanleg tegelijkertijd met de andere infrastructuur. Wanneer ook de baten gerelateerd aan funderingsschade worden meegerekend, levert actief grondwaterpeilbeheer altijd veel meer op dan het kost. Actief grondwaterpeilbeheer moet daarom bij iedere rioolvervangingswerken in bodemdaling-gevoelig gebied worden overwogen. Wordt dit niet gedaan, dan doet de volgende kans zich pas op zijn vroegst over enkele decennia voor. In de tussenliggende periode is veel schade te vermijden met actief grondwaterpeilbeheer, mede in het licht van klimaatverandering.

7. Praktijkervaring en lopend onderzoek

In Nederland is onderzoek naar hitte relatief laat op gang gekomen en onderzoek hiernaar was in eerste instantie gericht op inventarisatie van de problematiek en bewustwording. Al snel werd duidelijk dat ook Nederland rekening moet houden met de hitteproblematiek in steden ([Van Hove et al., 2010](#); [Steenefeld et al., 2011](#); [Rovers et al., 2014](#); [Van Hove et al., 2015](#); zie ook de [Klimaat-effectatlas](#)). Dit geldt ook voor wat [kleinere steden in een relatief waterrijke omgeving](#). Het eerste [nationale hittecongres](#) dat in juni 2018 werd georganiseerd, getuigt van de omslag in het denken over hitte en droogte in Nederland.

Momenteel wordt onderzoek steeds meer gericht op kwantificering van effecten en implementatie van maatregelen. Daarin blijft monitoring van stedelijke hitte een belangrijke rol spelen, niet alleen met behulp van weerstations in [grote steden](#), maar ook met weerballonnen die inzicht kunnen geven in [de hoogte van het stedelijke hitte-eiland](#). Initiatieven rond hitte waarbij burgers worden betrokken, komen steeds meer van de grond, bijvoorbeeld in [Amersfoort](#). Het onderzoek omvat ook modelstudies, zoals naar combinaties van effecten onder klimaatverandering en van

urbanisatie op hitte ([Koopmans et al., 2018](#)). Verder is onlangs [een gestandaardiseerde methode ontworpen](#) voor het maken van gedetailleerde gevoelstemperatuurkaarten voor de gemeentelijke klimaatstresstest die inzicht geven in de hitteopgave in een gebied. Voor het in kaart brengen van de hitteopgave is een combinatie van hittekaarten en kaarten van kwetsbaarheden nodig ([Van der Hoeven en Wandl, 2015](#)).

Om beleidsopties te evalueren is kwantificering van koelende effecten van maatregelen cruciaal. Hoewel kwalitatieve gegevens over effecten van maatregelen beschikbaar zijn, is slecht bekend hoe maatregelen in specifieke situaties kwantitatief uitpakken, mede doordat elke stad en situatie weer anders is. Op onderdelen is naar koelende effecten van specifiek ingrepen onderzoek verricht, bijvoorbeeld naar het verkoelend effect van stadswater in samenhang met andere omgevingsfactoren ([Jacobs et al., 2020](#)). In het project [i-Tree 2.0-NL](#) wordt momenteel het koelend effect van stadsbomen onderzocht. Daarbij wordt gekeken naar de verkoeling door verschillende soorten bomen en de mate van verkoeling verandert gedurende de levensduur van de boom. Ook in [NKWK](#) kader wordt onderzoek naar effectiviteit van maatregelen verricht. Zo is in 2020 is in de [Toolbox Klimaatbestendige Stad](#) geoptimaliseerd voor wat betreft de inschatting van het effect van hittestress reducerende maatregelen en is in 2021 wetenschappelijk onderzoek over de effectiviteit van maatregelen samengebracht in [Kennisbank GroenBlauw](#). Ook de [EfFact checker](#) geeft inzicht in de verkoelende effecten van veel gebruikte hittemaatregelen. Om de verkoelende maatregelen te vertalen naar een hittebestendige inrichting van de buitenruimte, zijn recentelijk ontwerprichtlijnen ontwikkeld op basis van praktijk onderzoek in twaalf gemeenten. Deze richtlijnen hebben betrekking op afstand tot koelte, percentage schaduw op belangrijke looproutes en percentage groen per buurt ([Kluck et al., 2020](#)).

Onderwerp van onderzoek is ook de link tussen hitteproblematiek en droogte via de watervraag die bij verdampingskoeling hoort. Gedurende een langere periode zijn metingen aan verdamping uitgevoerd in Arnhem en Rotterdam ([Jacobs et al., 2015](#)). In Utrecht zijn metingen gedurende een relatief korte periode in de herfst van 2008 uitgevoerd ([Brolsma et al., 2012](#)). De resultaten laten zien dat de verdamping van steden op jaarbasis mogelijk nog groter is dan [De Graaf et al. \(2013\)](#) dachten (figuur 10). Deze resultaten benadrukken het belang van verdampingsmetingen om een goede schatting van de watervraag te kunnen maken. Tevens geven ze een indruk van de problematiek rond zulke metingen in urbaan gebied en indirect ook

verdampingsmodellering of verwachting van watervraag (zie kennisleemtes). Momenteel wordt in het [TKI project Eco-Systeem-Stad](#), gezamenlijk met onder andere gemeenten, provincies en waterschappen, onderzoek gedaan naar de balans tussen de watervraag van stedelijk groen en de waterbeschikbaarheid in stedelijk gebied. Hierbij wordt onder andere rekening gehouden met de geografie van de ondergrond en met specifieke soorteigenschappen gerelateerd aan droogteresistentie.

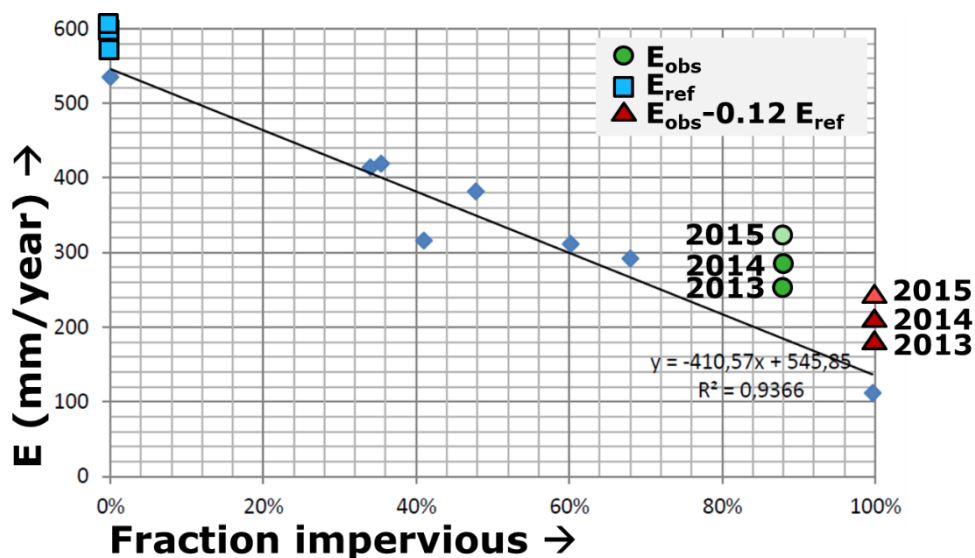


Figure 10. Hoge schatting van jaarlijkse stedelijke verdamping (E) als functie van de fractie versteend oppervlak (fraction impervious) door [De Graaf et al. \(2013\)](#). De regressielijn is gebaseerd op hydrologische metingen, deels op lokale schaal, aangegeven met diamantjes. De schatting op basis van deze regressielijn wordt vergeleken met gemeten jaarlijkse verdamping van het centrum van Arnhem (data Wageningen Environmental Research, deels gepubliceerd in [Jacobs et al., 2015](#)) Groene cirkels: uit directe metingen (E_{obs}); blauwe vierkanten: referentieverdamping op basis van metingen aan het weer bij het meetstation voor verdamping (E_{ref}); rode driehoeken: extrapolatie naar volledige bedekkingsgraad op basis van bijdrage van vegetatie ter grootte van de referentieverdamping).

Zoals gemeld vormen maatregelen ter verbetering van de stedelijke waterkwaliteit een dusdanig veelomvattende oplossingsrichting, dat het te ver voert om praktijkervaringen en in dat kader lopend onderzoek in één Deltafact te beschrijven. STOWA onderzoekt, vaak samen met Stichting RIONED, de uiteenlopende aspecten die van invloed zijn op de stedelijke waterkwaliteit, met als doel deze op peil te houden. In het kader van NKWK zijn onlangs, in samenwerking met gemeenten en waterschappen, de effecten van klimaatverandering en adaptatiemaatregelen op stedelijk waterkwaliteit onderzocht ([Limaheluw et al., 2021](#)). Meer informatie is ook

te vinden in het [kennisdossier Stedelijke Waterkwaliteit](#) op het Kennisportaal Klimaatadaptatie. [Recentelijk](#) zijn ook STOWA en het Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden begonnen met het in beeld brengen van deze effecten.

Ook maatregelen tegen droogval en uitzakken van oppervlaktewaterpeilen zijn veelomvattend, omdat ze op verschillende schaalniveaus, door verschillende actoren en ten behoeve van vele belangen worden uitgevoerd. Een actueel overzicht van de projecten en onderzoeken met betrekking tot beschikbaarheid van zoetwater staan in het [Deltaplan Zoetwater](#). Daarbij is in het kader van droogte in het bijzonder het [Deltaprogramma Hoge Zandgronden](#) van belang.

8. Kennisleemtes

Om onderbouwde beslissingen over de verdeling van zoetwater in tijden van droogte te kunnen nemen zijn gegevens nodig over de watervraag of actuele verdamping van een stad. Hierover zijn echter relatief weinig kwantitatieve gegevens en (internationaal) onderzoek naar de beste manier om watervraag te schatten op verschillende schalen is nodig.

Actuele verdamping van een stad kan gemeten worden of gemodelleerd. In beide gevallen is dit een extreem lastige opgave, vooral door de heterogeniteit binnen een stad. Daardoor kunnen op kleine afstand verschillende microklimaten ontstaan die een sterke invloed hebben op de lokale verdamping ([Spronken-Smith et al., 2000](#)). Om het stadsklimaat op verschillende schaalniveaus te kunnen monitoren, zijn langjarige metingen in het stedelijk gebied nodig. Deze metingen zijn ook nodig om modellen van het stedelijk klimaat te valideren. Voor het modelleren van het stadsklimaat zijn er bovendien gedetailleerde gegevens nodig van de inrichting van de stad, aangezien inzicht in deze heterogeniteit noodzakelijk is om verstoringen van de energiebalans en waterbalans door menselijke activiteiten te kunnen modelleren ([KNMI, 2021](#)).

Overzichten van methodes voor metingen van verdamping, inclusief metingen in stedelijke gebied, zijn te vinden in [Allen et al. \(2011\)](#) , [Nouri et al. \(2012\)](#) en in de [Deltafact verdamping](#). Vanwege de hiervóór geschetste complexiteit van de stad voor wijken en steden leveren volgens Oke et al. (2017) alleen metingen op wat grotere hoogte representatieve gegevens over actuele verdamping op de stads- en

wijkschaal. Er is behoefte aan methoden op grotere schaal: het gehele stedelijke gebied.

Op kleinere schaal, bijvoorbeeld voor het volgen van het waterverbruik van een boom, zijn sommige andere methodes mogelijk beter toepasbaar, ondanks de ook daar optredende problemen die samenhangen met de heterogeniteit in de stad. Tot deze categorie behoren lysimeterbepalingen en sapstroommetingen. Met de nodige aanpassingen kunnen mogelijk ook schattingen op basis van referentieverdamping enig inzicht geven in de lokale watervraag van vegetatie in de stad, maar hoe dit in de praktijk moet gebeuren is nog niet duidelijk ([DiGiovanni-White et al. 2018](#); [Jacobs et al., 2015](#); [Nouri et al., 2013](#)).

Verdampingsgegevens in Nederlandse steden zijn al met al extreem schaars. Dat geldt helemaal voor periodes van extreme droogte. Hoewel duidelijk is dat de verdamping in een wijktype als het centrum van Arnhem of Rotterdam snel afneemt na een natte dag ([Jacobs et al., 2015](#)) is niet duidelijk hoe dit proces verder verloopt bij langdurige droogte en hoe lang de verdampingskoeling in stand blijft bij een droogte als in 2018. De onzekerheid rond de grootte van de stedelijke verdamping in Nederland blijft vooralsnog bestaan en met verdampingsverwachtingen voor stedelijke gebied is nauwelijks ervaring opgedaan.

Ook rond de kwantificering van de verkoelende effecten van groen-blauwe infrastructuur voor specifieke situaties blijven vragen bestaan. Zo laten studies uiteenlopende resultaten zien voor wat betreft het effect van vergroening op verkoeling op de schaal van de stad ([Kluck et al., 2020](#)). Ook wat betreft de kosten voor schades ten gevolge van hitte en droogte zijn er nog data- en kennislücken. Hoewel de [Klimatschadeschatter](#) nu een inschatting van dergelijke kosten geeft, is meer onderzoek nodig om de berekening van met name toekomstige schades, waaronder kosten door natuurbranden, beter te onderbouwen. Ook om de schade aan stedelijk groen ten gevolge van droogte beter te kunnen ramen is meer onderzoek nodig. Langjarige, specifieke data is vereist om oorzakelijke verbanden te duiden en daarmee inzicht te krijgen in schades die specifiek door droogte zijn ontstaan ([Hoogvliet et al., 2021](#)).

Op basis van de al genoemde consultatie actief grondwaterpeilbeheer is geconcludeerd dat er onvoldoende kennis bestaat over waar en hoeveel

maaivelddaling in openbaar stedelijk gebied wordt veroorzaakt door 'seizoensgebonden grondwaterstandsdingen' (in veel gevallen door droogte). Ook is er bij gemeenten en waterschappen nog maar weinig zicht op het stedelijk grondwatersysteem. Een grondwatermeetnet opzetten kan de eerste stap zijn om het [systeem in kaart te brengen](#). Deze kennis is noodzakelijk om vast te stellen waar mogelijkheden liggen om baten te behalen met maatregelen om lage grondwaterstanden te voorkomen.

9. Bronnen & links

Monteith, J., & Unsworth, M. (2013). Principles of environmental physics: plants, animals, and the atmosphere. Academic Press, Boston.

Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). Urban Climates. Cambridge University Press, Cambridge.

Timmerman, J., Bacciu V., Coninx, I., Fons, J., Gregor, M., Jacobs, C., Loehnertz, M., Peltonen, L., Sainz, M. & Swart, R. (2015). Map book urban vulnerability to climate change – Factsheets. European Environment Agency, Copenhagen, 90p.

Van de Ven, F.H.M. (2011) Watermanagement in Urban Areas. Collegedictaat CT5510, TU Delft.

(voor overige literatuurlinks zie hoofdtekst)

10. Disclaimer

De in deze publicatie gepresenteerde kennis en diagnosemethoden zijn gebaseerd op de meest recente inzichten in het vakgebied. Desalniettemin moeten bij toepassing ervan de resultaten te allen tijde kritisch worden beschouwd. De auteur(s) en STOWA kunnen niet aansprakelijk worden gesteld voor eventuele schade die ontstaat door toepassing van het gedachtegoed uit deze publicatie.