

KLEINSCHALIGE KLIMAATADAPTATIEVE MAATREGELEN EN DE WATERVRAAG IN STEDELIJK GEBIED

VERKENNEND (EVALUATIE)ONDERZOEK



RAPPORT

2023
24

KLEINSCHALIGE KLIMAATADAPTATIEVE MAATREGELEN EN
DE WATERVRAAG IN STEDELIJK GEBIED
VERKENNEND (EVALUATIE)ONDERZOEK

RAPPORT

2023

24

ISBN 978.94.6479.021.4



stowa@stowa.nl www.stowa.nl

TEL 033 460 32 00

Stationsplein 89 3818 LE Amersfoort

POSTBUS 2180 3800 CD AMERSFOORT

Publicaties van de STOWA kunt u bestellen op www.stowa.nl

COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

AUTEURS Vera Kusters
Michel Moens
Erwin Slingerland

BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Beke romp, Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden
Daan Kling, Waterschap Drents Overijsselse Delta
Daan van Gieken, Gemeente Valkenswaard
Aad Oomens, Waterschap de Dommel
Ewald Oude Luttikhuis, Gemeente Leidschendam-Voorburg
Guy Henckens, Aveco de Bondt
Jelle de Lange, Hoogheemraadschap van Rijnland
Jochem Fritz, Hoogheemraadschap van Delfland
Mark Kramer, Hoogheemraadschap van Rijnland
Michiel Bootsma, Wetterskip Fryslân
Michel Moens, Arcadis
Rineke Hulsmans, RHDHV
Sjoerd de Vreng, Gemeente Nijmegen
Ton Beenen, Stichting RIONED
Vincent van Rhenen, Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden
Wouter Wuite, Gemeente Leiden
Vera Kusters, Arcadis
Wouter Stapel, RHDHV
Bert Palsma, STOWA

VORMGEVING Buro Vormvast
STOWA STOWA 2023-24
ISBN 978.94.6479.021.4

Copyright Teksten en figuren uit dit rapport mogen alleen worden overgenomen met bronvermelding.
Disclaimer Deze uitgave is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. Niettemin aanvaarden de auteurs en de uitgever geen enkele aansprakelijkheid voor mogelijke onjuistheden of eventuele gevolgen door toepassing van de inhoud van dit rapport.

SAMENVATTING

STOWA heeft begin 2021 de onderzoeksagenda Woning – Wijk – Watersysteem opgesteld met als doel inzicht te geven in de effecten van klimaatadaptieve maatregelen op het stedelijk watersysteem en de omgang daarmee door waterschappen. De agenda bestaat uit drie onderzoeken:

- Handreiking modellering stedelijk watersysteem;
- Evaluatieonderzoek effecten van kleinschalige klimaatadaptieve maatregelen op de watervraag van het stedelijk gebied;
- Handleiding monitoring en ondersteuning pilots en living labs.

Voorliggend onderzoek richt zich op het evaluatieonderzoek. Een inventarisatie van in praktijk gemeten, berekende of waargenomen effecten onder verschillende lokale en hydrologische omstandigheden. De volgende onderzoeksvragen liggen ten grondslag aan deze verkenning:

- Welke kleinschalige klimaatadaptieve maatregelen worden beschouwd?
- In hoeverre hebben deze maatregelen een effect op de stedelijke watervraag en dienen waterschappen hier rekening mee te houden?
- Wat zijn daarbij sleutelfactoren die de mate van het effect op de stedelijke watervraag beïnvloeden?
- Wat zijn relevante aanbevelingen met betrekking tot beheer en modellering om theorie en praktijk dichter bij elkaar te brengen?

In de loop van het onderzoek zijn daar onderstaande vragen aan toegevoegd:

- In hoeverre hebben de kleinschalige klimaatadaptieve maatregelen een effect op (grond) wateroverlast?
- Welke informatie is er beschikbaar met betrekking tot verdampingsparameters van groen en verhard oppervlak?

Met het beantwoorden van deze vragen is duidelijk geworden dat er meerdere invalshoeken zijn van waaruit de stedelijke watervraag kan worden gesteld. De verkenning toont ook aan dat er nog relatief weinig bruikbare/beschikbare praktijkinformatie is over de effecten van kleinschalige klimaatadaptieve maatregelen op de stedelijke watervraag. De beschikbare informatie is, zoals verwacht, ook dermate locatie-specifiek dat het lastig is om de effecten te extrapoleren naar andere situaties. Het ontbreekt bijvoorbeeld nog aan gestandaardiseerde protocollen en classificatiesystemen om op internationaal niveau onderzoeksresultaten goed met elkaar te kunnen vergelijken en daardoor sneller van elkaar te kunnen leren.

Dit onderzoek heeft daarom een duidelijk verkennend en verzamelend karakter. Het kan door beleidsmakers, modellers en stedelijk waterbeheerders worden benut om een eerste grove of wellicht betere inschatting te maken van het relatieve verschil in effectiviteit van klimaatadaptieve maatregelen, het eventuele nut van modellering van verdamping en interceptie en welke beheermaatregelen mogelijk interessant zijn. Hoewel jaargemiddelde cijfers gevoel kunnen geven bij getalsverhoudingen in de waterbalans is voor de watervraag vooral de pieksituatie in een droge zomer van belang. Cijfers in deze verkenning dienen met de nodige omzichtigheid te worden beschouwd. Verdiepend onderzoek is nodig om meer grip te krijgen op (de variatie in) getalswaarden.

WATERVRAAG

In het onderzoek Klimaat en Watervraag Stedelijk Gebied is de watervraag gedefinieerd als de hoeveelheid water die nodig is voor een constant oppervlaktewaterpeil. Hanteren van deze definitie zal, met name voor de hoge zandgronden, leiden tot een overschatting van de watervraag. In veel situaties is immers sprake van een natuurlijk uitzakkingsproces.

Indien de watervraag wordt gedefinieerd als de hoeveelheid water die nodig is om de (langdurig droge) periode dat het grondwater en/of het oppervlaktewater onder het kritieke niveau zakt te overbruggen, zal dat leiden tot een onderschatting van de watervraag. Er moet immers ook water preventief worden aangevoerd of opgeslagen om te voorkomen dat het waterpeil onder het kritieke niveau zakt. Het kritieke niveau is het grondwaterpeil waarbij de capillaire werking wordt onderbroken of het oppervlaktewaterpeil waarbij de waterkwaliteit in het geding komt.

In dit verkennende onderzoek is bij duiding van het effect op de watervraag aangegeven of het gaat om het op peil houden van de waterstand en/of het overbruggen van de periode dat de waterstand onder het kritieke niveau zakt.

Vergroenen en het optimaliseren van het grondwaterpeil zijn de twee hoofdcategorieën van kleinschalige klimaatadaptieve maatregelen. Daarnaast zijn in deze verkenning ook diepinfiltratie en doorspoelen in beschouwing genomen.

VERGROENEN

Vergroenen gaat vaak hand in hand met ontharden. De te verwachten stedelijke watervraag is de extra verdamping als gevolg van vergroenen minus de extra lokale beschikbare hoeveelheid hemelwater als gevolg van percoleren/infiltreren. De verhardingsgraad, de soort(keuze), gelaagdheid en beschaduwing spelen een rol bij het reduceren van de verdamping. Om het hemelwater te kunnen benutten in droge tijden dient het te worden opgeslagen. Bij opslag in de ondergrond spelen bodemgeschiktheid, grondwaterstand, de dikte van het (zand)pakket en de bereikbaarheid (afstand) een belangrijke rol.

ONTHARDEN VAN STEDELIJK GEBIED



De watervraag is afhankelijk van het soort maatregel(en) en landschapstype. Kwel en wegzijging, maar ook de hoeveelheid rioolvreemd water spelen een belangrijke rol in de waterbalans. Het realiseren van extra groen zal de watervraag voor alle landschapstypen vergroten. Het effect van afkoppelen en infiltreren van hemelwater op zandgronden kan de watervraag doen afnemen. Afkoppelen en afvoeren naar oppervlaktewater op klei- en

veengrond heeft (nagenoeg) geen reducerend effect op de watervraag. Ervan uitgaande dat het oppervlaktewaterpeil constant wordt gehouden is er geen sprake van buffering binnen het gebied, het water wordt afgevoerd uit het gebied. Het afgekoppelde hemelwater is daarom niet beschikbaar voor het grondwater en het groen en heeft om deze reden geen reducerende invloed op de watervraag

Bron: Klimaat en watervraag stedelijk gebied, 2021, RHDHV.

Grofweg is sprake van drie situaties:

- Voor niet regenwaterafhankelijke gebieden zoals laaggelegen veen- en kleigebieden is er niet direct een stedelijke watervraag. Grondwater is altijd op geringe diepte beschikbaar, ook in droge tijden. Overtollig water wordt vaak direct afgevoerd om het water op peil te houden. Wel kan een watervraag ontstaan om bodemdaling en verzilting tegen te gaan of verversing van de waterkwaliteit.
- Voor deels regenwaterafhankelijke gebieden (grondwater is meestal bereikbaar) wordt de stedelijke watervraag bepaald door de benodigde peilopzet en/of de benodigde wateropslag om droge perioden te kunnen overbruggen;
- Voor volledig regenwaterafhankelijke gebieden, zoals de hoge zandgronden (grondwater is nooit bereikbaar), wordt de stedelijke watervraag bepaald door de benodigde wateropslag om droge perioden te kunnen overbruggen.

In een lopend NKWK-onderzoek (2022) worden effecten van kleinschalige klimaatadaptatiemaatregelen zoals waterpasserende verharding en hemelwaterinfiltratie berekend met een geschematiseerd model op wijk- en straatniveau voor verschillende type wijken. Hoewel het rekenmodel nog een bepaalde mate van detail mist, kunnen de uitkomsten van deze scenarioberekeningen bruikbaar zijn om meer inzicht te krijgen in effecten van kleinschalige klimaatadaptatiemaatregelen.

Om het effect van verdamping in beeld te kunnen brengen kan de toepassing van een interceptiemodel met praktijkgerichte verdampingsparameters wenselijk zijn. Onderzoek toont aan dat de verdamping in stedelijk gebied kan afwijken van de verdamping in landelijk gebied. Zo kunnen de nalevering van warmte door materialen, de opslag van water op platte daken en de diversiteit in aerodynamische ruwheidslengte van de verschillende groensoorten (windeffect) een rol spelen. Naast verschillend gedrag is in een praktijkonderzoek ook opgevallen dat de gemeten actuele verdamping geen duidelijk seizoenspatroon vertoont, terwijl de berekende referentieverdamping normaal gesproken een duidelijk maximum laat zien in de zomer. Bij gebruik van de referentieverdamping als maatstaf voor de stadsverdamping kan de watervraag overschat worden. Zeker als in de bebouwde omgeving de kans op extreme waterbeperking groot is.

OPTIMALISEREN GRONDWATERPEIL

Optimalisatie van het grondwaterpeil is mogelijk via dynamisch peilbeheer. De te verwachten stedelijke watervraag is een afweging tussen de gewenste peilopzet, het bijbehorende invloedsg gebied en het risico op grondwateroverlast. Waterschappen dienen met betrekking tot dynamisch peilbeheer rekening te houden met een stedelijke watervraag in een orde van grootte van 1-1,5 mm/dag in een droge zomerperiode. Deze hoeveelheid water is nodig om het grondwaterpeil tijdelijk op te zetten en op peil te houden. In gebieden met een goed doorlatende, dikke ophooglaag kan de watervraag hoger zijn. Aanbevolen wordt om de stedelijke watervraag die actief grondwaterpeilbeheer in perioden van droogte genereert, mee te nemen als standaardcomponent van regionale en landelijke waterbeheerstudies.

Praktijkervaring wijst uit dat door peilopzet de grondwaterstand wel degelijk verhoogd kan worden maar dat dit een proces is van 1-3 maanden en niet van dagen/weken. Dynamisch peilbeheer zonder onderwaterdrains is een onvoldoende effectief instrument om de grondwaterstanden te beïnvloeden of de bodemdaling te remmen.

DIEPINFILTRATIE

Op basis van de bevindingen in dit verkennende onderzoek hoeven de waterschappen, vanwege de kleinschalige lokale toepassing, geen rekening te houden met het benutten van diep grondwater zoals diepinfiltratie en ondergrondse waterbergingstechnieken. Vanwege beschermende vergunningvoorwaarden ten behoeve van de grondwaterkwaliteit zal dit naar verwachting beperkt blijven tot kleinschalige toepassingen.

DOORSPOELEN/AANVOEREN VAN WATER

Doorspoelen van water en/of aanvoeren van water kan wenselijk zijn vanuit het oogpunt van een verslechterde waterkwaliteit of droogte. Verversing is echter niet altijd een optie vanwege de verdringingsreeks. De verdringingsreeks geeft de rangorde van maatschappelijke behoeften aan, die bij de verdeling van het beschikbare water in acht wordt genomen. De behoefte aan verversing kan leiden tot een watervraag of inrichtingsmaatregelen zoals een grotere waterdiepte of flexibel peilbeheer om zuurstofrijk regenwater langer vast te houden. De te verwachten stedelijke watervraag is bij doorspoelen een afweging tussen de benodigde watertoevoer en het doorspoeleffect. Beperkende factoren voor het doorspoelen/aanvoeren van oppervlaktewater zijn de invloedssfeer (hoe ver reikt het schon(re) water), de kritische belasting (welke kwaliteit is minimaal gewenst) en de verblijftijd (ivm zuurstofhuishouding).

AANVOER ZOET WATER (VERVANGEN DOOR RECHTENVRIJE FOTO)



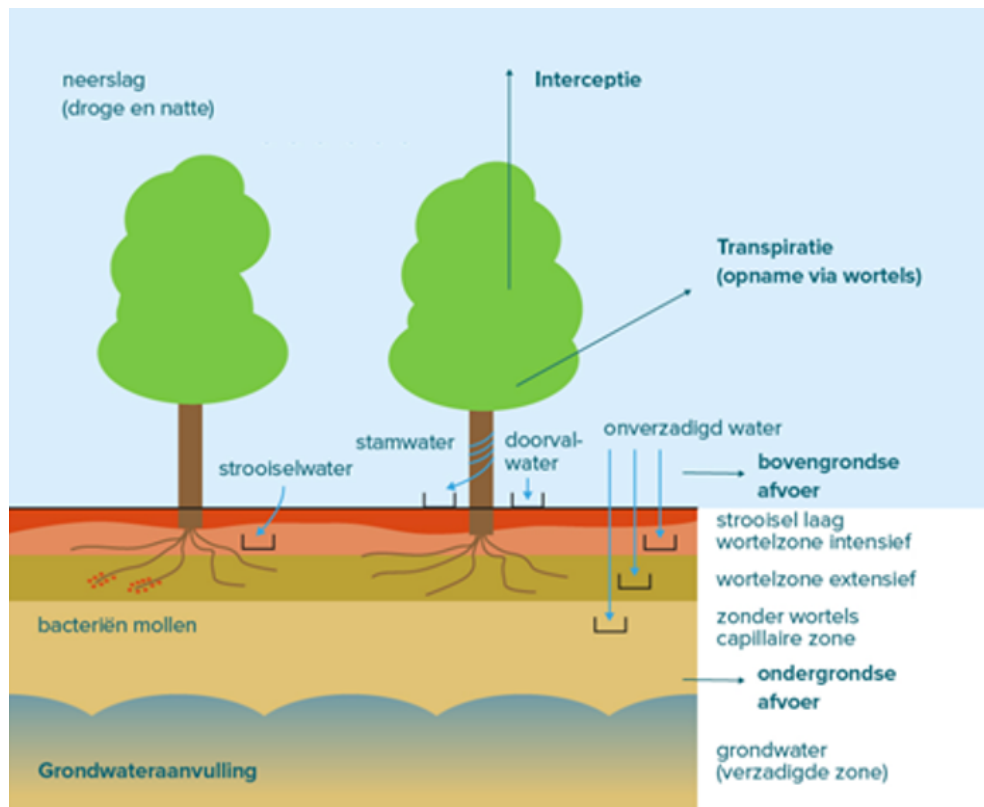
Het inzetten van gezuiverd restwater van industrieën en rwzi's voor droogtebestrijding is in Nederland een nog weinig toegepaste, maar opkomende vorm van (klimaat)adaptatie om te anticiperen op toenemende watertekorten in de landbouw. De kwaliteit van in te zetten restwater is een uitermate belangrijk aandachtspunt voor het ecosysteem, het ontvangende grondwatercompartiment en het doel waarvoor het wordt ingezet (bruikbaarheid).

ONTWERPEN EN MODELLEREN

Verschillende doelen van hemelwatervoorzieningen (bergen, verdampen, infiltreren, afvoeren) kunnen tot conflicterende ontwerpkeuzes leiden en vereisen ook een nauwgezette uitvoering, waarbij alle verbindingen en overstorten op het juiste niveau worden aangelegd. Door in het ontwerp een goede balans te bewaren tussen complexiteit en robuustheid neemt de beheersbaarheid toe. Het effect van doorspoelen op de waterkwaliteit is groter naarmate het systeem minder vertakt is.

Met het meten van de grondwaterstand in combinatie met bodemonderzoek kan in de meeste gevallen op wijkniveau een globale waterbalans worden opgesteld. Om de watervraag in stedelijk gebied meer gedetailleerd te kunnen bepalen is o.a. inzicht nodig in verdampingswaarden. Voor de modellering is het, bij het interpreteren van verdampingswaarden, van belang om verschil te maken tussen evapotranspiratie en interceptie. Evapotranspiratie is de transpiratie van de bomen en de kruidlaag (opname via wortels) en de evaporatie van de bodem (verdamping). Interceptie is de neerslag die verdampt vanaf de natte delen en dus de bodem niet bereikt.

INTERCEPTIE, VERDAMPING EN OPPERVLAKKIGE AFVOER (BRON: STICHTING RIONED)



Enkele bevindingen uit deze verkenning tonen aan dat het zinvol kan zijn om het proces van verdamping beter in beeld te brengen voor het bepalen van de stedelijke watervraag. Door ontharden kan de verdamping voor de betreffende oppervlakte in de zomerperiode aanzienlijk hoger, tot wel het drievoudige.

Zo kunnen gevestigde bomen tot wel 3-4 mm/dag water per kruinprojectie gebruiken. Ook zijn er significante verschillen in gemeten evapotranspiratie voor kale grond, gras, kruidachtigen, struiken en bomen. De evapotranspiratie voor vegetatie met ondergrondse wateropslag blijkt uit praktijkonderzoek 1,5 mm/dag hoger te zijn dan vegetatie zonder wateropslag.

Omdat er meer water beschikbaar is om te kunnen verdampen zal het verkoelend effect ook hoger zijn. De opslagcapaciteit voor hemelwater ligt volgens onderzoek tussen 1-28 mm, wat overeenkomt met 2-20 dagen.

Om de initiële toestand van de opslagcapaciteit voorafgaand aan een bui mee te nemen dienen langetermijn simulaties te worden gebruikt. Ook de aerodynamische ruwheidslengte speelt een rol bij de mate van verdamping (windeffect).

BEHEREN EN MONITOREN

De soortkeuze, het aanbrengen van gelaagdheid (schaduwwerking/interceptie) en het verhogen van het organisch stofgehalte in de leeflaag dragen bij aan een betere vochtbalans (minder verdampen, meer vocht vasthouden) en hiermee reductie van de watervraag.

Het verloop in verdamping is consistent met metingen van bodemvocht en de grondwaterstandsdiepte. Het meten van bodemvocht is hiermee een interessante parameter om te monitoren naast gebruikelijke parameters als neerslag en grondwaterstand. De relatie tussen bladoppervlak (satellietwaarnemingen), neerslag (radarbeelden), temperatuur, grondwaterstand en het bodemvochtgehalte is van toegevoegde waarde om de watervraag beter in beeld te kunnen brengen.

Voor stedelijk waterbeheerstudies is het van belang om actuele hoogten van peilregelaars in te meten. Door scheefstand of breuk kunnen deze peilen afwijken, waardoor er onbedoeld meer grondwater wordt afgevoerd dan bedoeld.

CONCLUSIE

Er is een spanningsveld tussen het maximaliseren van verdamping ter bestrijding van hitte en het minimaliseren van verdamping ter reductie van de watervraag. Met het vergroenen van wijken, aanpassing naar droogtebestendige groensoorten en ontharden kan de watervraag door meer verdamping toenemen. Met aanbrengen van o.a. gelaagdheid in groen, schaduwwerking en toepassing van bodemverbetering kan de verdamping worden beperkt.

De stedelijke watervraag voor de regionale waterbeheerder wordt geschat op ca. 1-1,5 mm/dag om via peilopzet (van onderaf) te voorzien in een goede vochtvoorziening. Dit is het berekende verschil in watervraag bij wel of geen toepassing van dynamisch peilbeheer. Door peilopzet en/of ondergrondse waterberging is er voor het groen dan relatief meer en langer water beschikbaar om te kunnen verdampen. Peilopzet is, afhankelijk van o.a. drukverschil en infiltratiesnelheid, pas na langere tijd effectief (maanden in plaats van dagen/weken). Met het aanbrengen van ondergrondse drainagesystemen kan dit effect worden versneld.

De stedelijke watervraag voor de stedelijk waterbeheerder om groen maximaal te kunnen laten verdampen wordt op basis van deze verkenning geschat op ca. 1,5 mm/dag. Dit is het gemeten verschil in verdamping tussen vegetatie met én zonder ondergrondse wateropslag.

De stedelijke watervraag voor de stedelijk waterbeheerder voor sproeien en kunstmatige watergift wordt op basis van deze verkenning geschat op ca. 3 mm/dag om (van bovenaf) te voorzien in water om een langdurig droge periode te overbruggen.

Regionale en stedelijk waterbeheerders kunnen met de watervraag beter rekening houden als bij modelberekeningen ook een interceptiemodel wordt toegepast met praktijkgerichte

parameterwaarden. In dit onderzoek worden enkele kengetallen voor verdamping van groen aangereikt op basis van praktijkonderzoek.

Op basis van de bevindingen in dit verkennende onderzoek hoeven de regionale waterbeheerders, vanwege de naar verwachting kleinschalige lokale toepassing en regulering, geen rekening te houden met het benutten van diep grondwater zoals diepinfiltratie en ondergrondse waterbergingstechnieken.

AANBEVELINGEN

Het resultaat van dit onderzoek moet worden beschouwd als een eerste stapje in een relatief nieuw onderzoeksveld. Er valt nog veel te leren en te ontdekken en er is ongetwijfeld meer informatie beschikbaar dan nu te overzien en benut is. Het bundelen van alle beschikbare en nog te verwerven inzichten zal de vakwereld verder brengen. Het pleit in ieder geval voor (continuering van) samenwerking tussen bureaus, overheden en onderzoeksinstituten en een centrale coördinatie.

Gelet op de positieve effecten van het reguleren van ondiep grondwater (dynamisch peilbeheer), mag worden verwacht dat dit in omvang zal toenemen. Regionale waterbeheerders kunnen hier al concreet rekening mee houden in de modellering. Het effect van ontharding en vergroening op de vraag naar oppervlaktewater of via tankwagens aan te voeren water moet niet worden overschat. De verdamping zal weliswaar kunnen toenemen, maar met voldoende aandacht voor de aan- en herplant van droogtebestendig groen, verbetering van de leeflaag/vochthuishouding en als gevolg van natuurlijke mechanismen (sluiten huidmondjes) en percolatie/infiltratie is er een compenserend effect. Relatief schoon water wat bedoeld (via systemen) of onbedoeld (rioolvreemd water) uit een gebied wordt afgevoerd kan mogelijk worden benut om de watervraag te reduceren. De inzet van gezuiverd restwater van industrieën en rwzi's onder bepaalde voorwaarden biedt wellicht perspectief.

VERGROENEN VAN SCHOOLPLEINEN



Het monitoren van gidsparameters zoals bodemvocht, waterniveaus en temperatuur is niet alleen vanuit wetenschappelijk oogpunt van belang. Het verschaft ook inzicht om het beheer en onderhoud te optimaliseren. Proeftuintjes zijn mogelijk een geschikt middel om theorie en praktijk verder bij elkaar te brengen. Wellicht leent het vergroenen van schoolpleinen zich hiervoor of kan worden aangehaakt bij lopende onderzoeken in Delft en/of Wageningen. Hierbij dient wel te worden overwogen dat grote waterbalansposten zoals kwel, wegzijging en rioolvreemd water niet nauwkeurig zijn te meten. Waterbalansposten die je wil toetsen (bijvoorbeeld evapotranspiratie) zijn dan niet goed te bepalen.

DE STOWA IN HET KORT

STOWA is het kenniscentrum van de regionale waterbeheerders (veelal de waterschappen) in Nederland. STOWA ontwikkelt, vergaart, verspreidt en implementeert toegepaste kennis die de waterbeheerders nodig hebben om de opgaven waar zij in hun werk voor staan, goed uit te voeren. Deze kennis kan liggen op toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk-juridisch of sociaalwetenschappelijk gebied.

STOWA werkt in hoge mate vraaggestuurd. We inventariseren nauwgezet welke kennisvragen waterschappen hebben en zetten die vragen uit bij de juiste kennisleveranciers. Het initiatief daarvoor ligt veelal bij de kennisvragende waterbeheerders, maar soms ook bij kennisinstellingen en het bedrijfsleven. Dit tweerichtingsverkeer stimuleert vernieuwing en innovatie.

Vraaggestuurd werken betekent ook dat we zelf voortdurend op zoek zijn naar de ‘kennisvragen van morgen’ – de vragen die we graag op de agenda zetten nog voordat iemand ze gesteld heeft – om optimaal voorbereid te zijn op de toekomst.

STOWA ontzorgt de waterbeheerders. Wij nemen de aanbesteding en begeleiding van de gezamenlijke kennisprojecten op ons. Wij zorgen ervoor dat waterbeheerders verbonden blijven met deze projecten en er ook 'eigenaar' van zijn. Dit om te waarborgen dat de juiste kennisvragen worden beantwoord. De projecten worden begeleid door commissies waar regionale waterbeheerders zelf deel van uitmaken. De grote onderzoekslijnen worden per werkveld uitgezet en verantwoord door speciale programmacommissies. Ook hierin hebben de regionale waterbeheerders zitting.

STOWA verbindt niet alleen kennisvragers en kennisleveranciers, maar ook de regionale waterbeheerders onderling. Door de samenwerking van de waterbeheerders binnen STOWA zijn zij samen verantwoordelijk voor de programmering, zetten zij gezamenlijk de koers uit, worden meerdere waterschappen bij één en het zelfde onderzoek betrokken en komen de resultaten sneller ten goede aan alle waterschappen.

De grondbeginselen van STOWA zijn verwoord in onze missie:

Het samen met regionale waterbeheerders definiëren van hun kennisbehoeften op het gebied van het waterbeheer en het voor én met deze beheerders (laten) ontwikkelen, bijeenbrengen, beschikbaar maken, delen, verankeren en implementeren van de benodigde kennis.

KLEINSCHALIGE KLIMAATADAPTATIEVE MAATREGELEN EN DE WATERVRAAG IN STEDELIJK GEBIED VERKENNEND (EVALUATIE)ONDERZOEK

INHOUD

	SAMENVATTING	
	DE STOWA IN HET KORT	
1	INLEIDING	1
1.1	Aanleiding	1
1.2	Onderzoeksvragen	1
1.3	Onderzoeksopzet	2
1.4	Leeswijzer	3
2	KLEINSCHALIGE KLIMAATADAPTIEVE MAATREGELEN	4
2.1	Watersysteem stedelijk gebied	4
2.2	Systeemwerking	5
	2.2.1 Grondwater	5
	2.2.2 Oppervlaktewater	6
2.3	Watervraag	7
2.4	Wateraanvoer	8
2.5	Maatregelen	8
3	EFFECTEN VAN MAATREGELEN	10
3.1	Maatregel A Verdampingswater besparen	10
3.2	Maatregel B Benutten van hemelwater	15
3.3	Maatregel C Reguleren van ondiep grondwater	20
3.4	Maatregel D Benutten diep grondwater	22
3.5	Maatregel E Aanvoeren van water	25

4	WATERBALANS	30
4.1	Begrippen	30
4.2	Verdamping	31
4.3	Ruwheidslengte	35
4.4	Infiltratiesleuven	36
4.5	Wateropslagcapaciteit	37
4.6	Standaardisering	38
4.7	Samenvatting	38
5	PROEFTUINTJES	39
6	EINDRESULTAAT	41
6.1	Beantwoording onderzoeksvragen	41
6.2	Conclusie en aanbevelingen	44
7	REFERENTIES	46

1

INLEIDING

1.1 AANLEIDING

STOWA heeft begin 2021 de onderzoeksagenda Woning – Wijk – Watersysteem opgesteld met als doel inzicht te geven in de effecten van klimaatadaptieve maatregelen op het stedelijk watersysteem en de omgang daarmee door waterschappen. De agenda bestaat uit drie onderzoeken:

1. Handreiking modellering stedelijk watersysteem;
2. Evaluatieonderzoek effecten van kleinschalige klimaatadaptieve maatregelen op de water-vraag van het stedelijk gebied;
3. Handleiding monitoring en ondersteuning pilots en living labs.

Het eerste onderzoek uit de agenda wordt uitgevoerd door RHDHV en Aveco de Bondt. De handreiking modellering stedelijk watersysteem richt zich in hoofdzaak op de modellering van wateroverlast. Het effect van kleinschalige klimaatadaptieve maatregelen in relatie tot de watervraag is binnen de scope van dat onderzoek van beperkt belang. Het tweede onderzoek wordt parallel uitgevoerd door Arcadis. Onderliggend rapport beschrijft het resultaat. Het derde onderzoek wordt opgestart na afronding van de onderzoeken 1 en 2.

De scope van dit onderzoek verschilt van het in opdracht van DPRA door RHDHV uitgevoerde onderzoek “klimaat en watervraag stedelijk gebied”. Dat onderzoek is gericht op de hydrologische modellering van het stedelijk watersysteem. De beschreven effecten zijn modelmatig berekende effecten voor de situatie 2050 en 2085. Verder is vanuit de Rijksoverheid ook het TKI-project “Duurzame water- en ecosystemen voor klimaatrobust stedelijk groen” opgestart in 2021 (LWV 20.225). Onderdeel van dit project is het modelmatig inschatten van het effect van stedelijke verdamping op het grondwaterpeil. Ook is vanuit NKWK een modelonderzoek gaande naar de effecten van kleinschalige klimaatadaptieve maatregelen. De resultaten van deze onderzoeken zijn ten tijde van het schrijven van deze rapportage (2022) nog niet beschikbaar, maar zullen een welkome aanvulling vormen op de huidige hiaten in kennis.

Dit voorliggende onderzoek richt zich op in praktijk gemeten, berekende of waargenomen effecten onder verschillende lokale en hydrologische omstandigheden.

1.2 ONDERZOEKSVRAGEN

Voorafgaand aan dit onderzoek zijn een aantal onderzoeksvragen geformuleerd waarop in dit onderzoek een antwoord wordt gegeven:

1. Welke kleinschalige klimaatadaptieve maatregelen worden beschouwd?
2. In hoeverre hebben deze maatregelen een effect op de stedelijke watervraag en dienen waterschappen hier rekening mee te houden?
3. Wat zijn daarbij sleutelfactoren die de mate van het effect op de stedelijke watervraag beïnvloeden?
4. Wat zijn relevante aanbevelingen om de theorie en praktijk dichterbij elkaar te brengen?

Daarbij ligt de focus op modelleren, monitoren en beheer en onderhoud.

Gaandeweg het onderzoek zijn daar de volgende twee vragen bij gekomen:

5. In hoeverre hebben de kleinschalige klimaatadaptatieve maatregelen een effect op (grond) wateroverlast?
6. Welke informatie is er beschikbaar met betrekking tot verdampingsparameters van groen en verhard oppervlak?

1.3 ONDERZOEKSOPZET

De stedelijke watervraag is een nog vrij nieuw fenomeen. Hoewel er in het verleden wel vaker droge perioden zijn voorgekomen is droogte pas de laatste jaren een issue geworden. Er is daarom nog relatief weinig onderzoek beschikbaar. Om de onderzoeksvragen te kunnen beantwoorden hebben we een evaluatie uitgevoerd naar beschikbare onderzoeken in de vorm van een bureaustudie. Het gaat om onderzoeken binnen Arcadis (afstudeeronderzoeken, projecten) en relevante onderzoekstrajecten waar Arcadis in heeft geparticipeerd. In bijlage A is een overzicht van de geïnventariseerde en geraadpleegde onderzoeken opgenomen. De bureaustudie is verrijkt door middel van interviews en aangeleverde informatie.

Op basis van de bureaustudie en interviews zijn een groot aantal klimaatadaptatieve maatregelen in beeld gebracht. Daarbij hebben we per onderzoek gezocht naar informatie om de maatregel en het effect zo goed als mogelijk te doorgronden, daarbij gebruikmakend van de volgende vijf aspecten:

1. Maatregelen
2. Toepassingsgebied
3. Effect
 - a. Stedelijke watervraag
 - b. (Grond)wateroverlast
4. Sleutelfactoren
5. Aanbeveling voor richtlijn
 - c. Modelleren
 - d. Monitoring
 - e. Beheer en onderhoud

1. MAATREGEL(EN)

We focussen op kleinschalige maatregelen met een significant effect op de watervraag. De in de opdracht genoemde maatregelen vormen hierbij het vertrekpunt. We beschrijven het doel van de maatregel, de principewerking en op welke onderdelen van het stedelijk watersysteem het aangrijpt (openbare ruimte/ riolering/bodem/oppervlaktewater).

2. TOEPASSINGSGEBIED

Verschillen in type ont- of afwateringssysteem, Hoog en Laag Nederland, zand en klei, stilstaand water en stromend water, urbaan en sub-urbaan e.d. geven een eerste indicatie wat het meest geschikte toepassingsgebied is voor de maatregel. We zoeken hiervoor aansluiting bij de zes gedefinieerde landschapstypologieën uit het onderzoek 'Klimaat en Watervraag Stedelijk gebied'.

3. EFFECT

Afhankelijk van de aard en de duur van het op te nemen onderzoek zal het effect van de maatregel(en) zich niet altijd eenvoudig kwantitatief laten uitdrukken. Om een zo compleet mogelijk beeld te krijgen, drukken we het effect op de watervraag (voor zover mogelijk) zowel in kwantitatieve als in kwalitatieve zin uit met een duiding van de termijn. Aanvullend beschrijven we ook het effect op (grond)wateroverlast in termen als geen, negatief (toename kans op (grond)wateroverlast) en positief effect (afname kans op (grond)wateroverlast).

4. SLEUTELFACTOREN

Als brug naar de gewenste richtlijn voor modellering en de handleiding monitoring, beschrijven we de gevonden maatregel-effect relatie aan de hand van de ingreep, het effect en de sleutelfactoren die van belang zijn voor de effectiviteit van de ingreep. *Sleutelfactoren brengen de voorwaarden onder de aandacht die de mate van het effect van een maatregel beïnvloeden.* Zo kan bijvoorbeeld afstand een sleutelfactor zijn bij de infiltratie van hemelwater. Het geïnfilteerde water bereikt dan niet de locatie waar de watervraag is.

5. AANBEVELING VOOR RICHTLIJN

Het rapport bevat aanbevelingen voor de handreiking modelleren, de handreiking monitoring en beheer en onderhoud.

1.4 LEESWIJZER

Hoofdstuk 2 geeft een beschrijving van de systeemwerking en de maatregelen die in beschouwing worden genomen. Hoofdstuk 3 bevat een omschrijving van gemeten of berekende effecten. Hoofdstuk 4 geeft handvatten met betrekking tot de waterbalans. In hoofdstuk wordt een voorstel gedaan voor praktijkonderzoek. Hoofdstuk 6 sluit dit rapport af met een beantwoording van de onderzoeksvragen, aanbevelingen voor nader onderzoek en een redeneertrant.

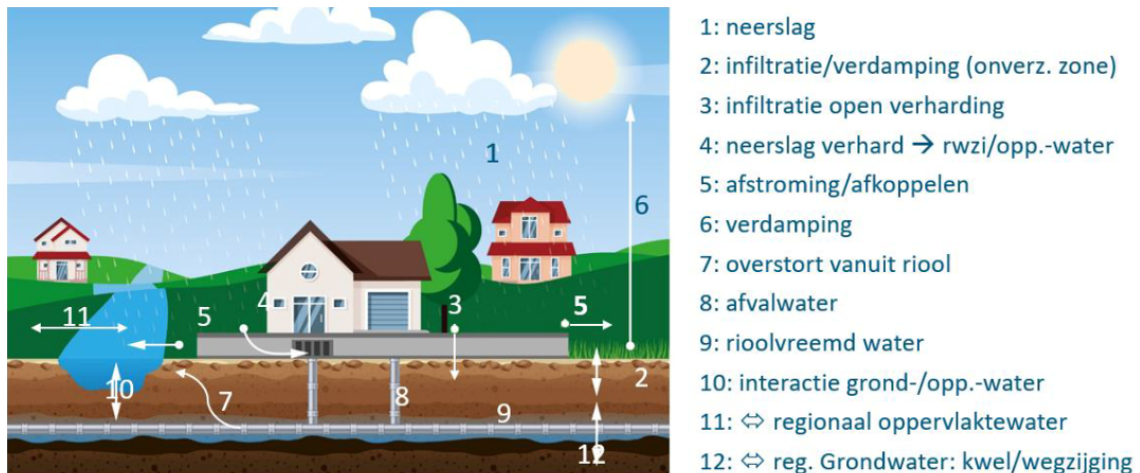
2

KLEINSCHALIGE KLIMAATADAPTIEVE MAATREGELEN

2.1 WATERSYSTEEM STEDELIJK GEBIED

Om de effecten van kleinschalige klimaatadaptatieve maatregelen op de stedelijke watervraag beter te duiden, beschrijven we eerst de verschillende delen uit het stedelijk watersysteem die de watervraag bepalen. Voor de definities sluiten we aan bij het onderzoek “Klimaat en watervraag stedelijk gebied”, uitgevoerd door Royal HaskoningDHV. Vervolgens beschrijven we welke delen van dit stedelijk watersysteem als randvoorwaarde doorgaans door de waterschappen meegenomen worden in de modelstudies. Het in beeld brengen van het effect van klimaatadaptatiemaatregelen op deze randvoorwaarden is het doel van dit onderzoek.

AFBEELDING 1 SCHEMATISCHE WEERGAVE STEDELIJK WATERSYSTEEM (BRON: KLIMAAT EN WATERVRAAG STEDELIJK GEBIED, ROYAL HASKONINGDHV)

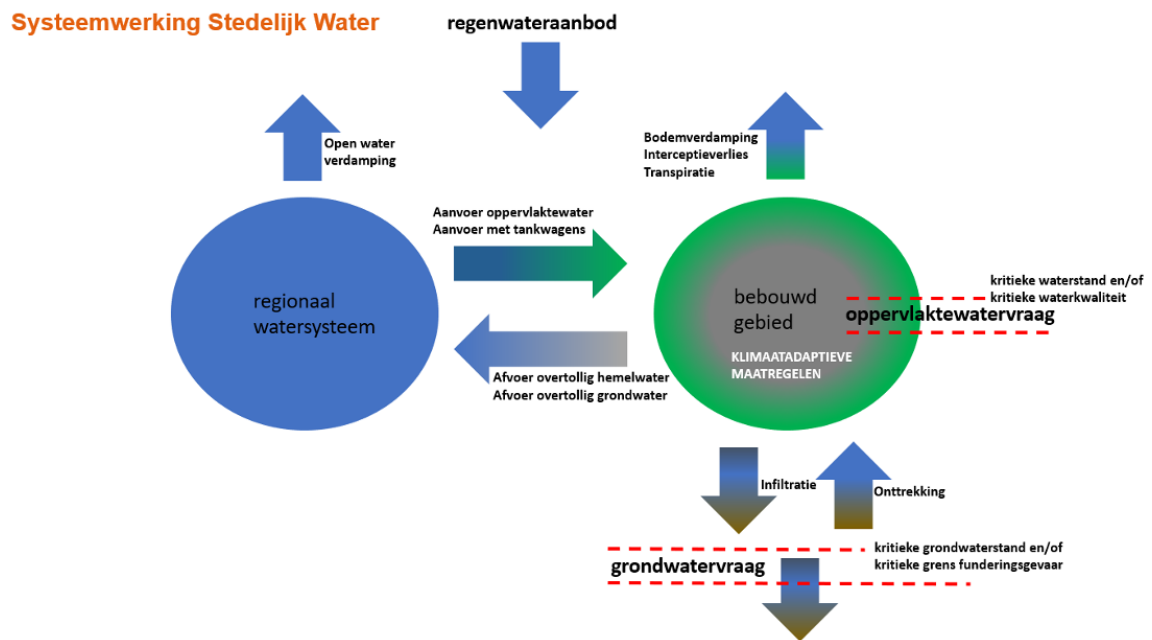


Neerslag (1.) valt op het oppervlak en verdampt (6.) of infiltreert in de onverzadigde zone (2.) of infiltreert door de open verharding (3.). Als de neerslag niet verdampt of infiltreert komt deze tot afstroming (4.) en wordt deze ingezameld door de riolering. Eenmaal in de riolering, samen met ingezameld afvalwater (8.), voert het water af naar de RWZI of het oppervlaktewater middels een overstortconstructie (7.). De neerslag kan ook rechtstreeks het oppervlaktewater bereiken door middel van afstroming (5.). Neerslag dat infiltreert vult het regionaal grondwater aan (12.), mogelijk samen met rioolvreemd water (9.). De regionale grondwatervoorraad wijzigt als gevolg van kwel of wegzijging.

2.2 SYSTEEMWERKING

De water vraag bestaat uit twee componenten: de vraag naar grondwater en de vraag naar oppervlaktewater. Onderstaand schema illustreert beide componenten. In het geval er meer grondwater wordt onttrokken dan wordt aangevoerd kan het grondwaterpeil zodanig ver weg zakken dat de capillaire werking van wortels wordt doorbroken en droogtestress ontstaat. In het geval er meer oppervlaktewater verdampt dan wordt aangevoerd kan het oppervlakte-waterpeil zodanig ver weg zakken dat er waterkwaliteitsproblemen ontstaan.

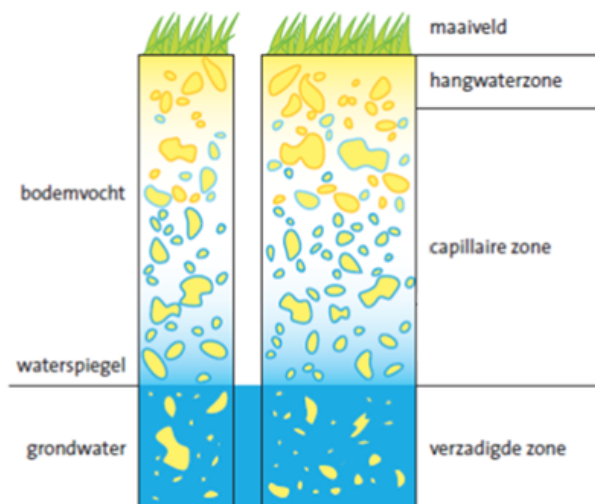
AFBEELDING 2 SCHEMATISCHE WEERGAVE SYSTEEMWERKING



2.2.1 GRONDWATER

Groen haalt haar water voornamelijk uit de onverzadigde zone van de bodem. Het water in die zone bestaat uit geïnfiltreerd regenwater dat in de bovengrond is achtergebleven ('hangwater') en uit grondwater dat via capillaire opstijging de wortels bereikt. Wortels putten water volledig uit de hangwaterzone en capillaire zone, en niet rechtstreeks uit het grondwater (uitzonderingen voor specifieke soorten daargelaten).

AFBEELDING 3 (ON)VERZADIGDE ZONE



Groen functioneert optimaal wanneer er zo veel vocht in de bodem voorradig is dat het onbeperkt kan verdampen. Bij een vochttekort en bij hoge temperaturen sluiten de bladeren als noodmaatregel hun huidmondjes om de verdamping te remmen. Maar die verdamping kan niet zonder consequenties worden gestopt. Wanneer het vochttekort te lang duurt, vermindert de celspanning in de bladeren en verwelken deze. Bij langdurige droogte veroorzaakt dit blijvende schade en sterfte.

De afhankelijkheid van de voornaamste waterbronnen (regen- en grondwater) varieert. Er zijn grofweg drie situaties:

1. Deels regenwaterafhankelijk: gebieden waar gedurende lange tijd de wortels gevoed worden door capillair vocht uit het grondwater, maar waar in droge perioden het grondwater dieper kan wegzakken en dan geen vocht meer kan leveren aan de wortels.
2. Volledig regenwaterafhankelijk: grondwater is nooit bereikbaar voor de wortels. Bepanting is afhankelijk van de hoeveelheid beschikbaar hangwater en aanvulling daarvan door neerslag. In langdurige droge periodes wordt de voorraad hangwater geheel opgebruikt.
3. Niet regenwaterafhankelijk: grondwater is altijd op geringe diepte beschikbaar, ook in droge tijden.

Voor stedelijk groen in hoog Nederland (de zandgronden in Brabant, Utrecht, Gelderland, Overijssel en Drenthe) geldt hoofdzakelijk situatie 2. Het aanvullen van een eventueel watertekort zal met name via tankwagens plaatsvinden. In laag Nederland is met name situatie 1 van toepassing. Alleen bomen en diepwortelende struiken profiteren van een voldoende hoge grondwaterstand. Gras en kruiden zijn nagenoeg altijd afhankelijk van het hangwater. Alleen in gebieden waar de grondwaterstand jaarrond erg hoog staat (circa <30 cm beneden maaiveld), zoals in het Groene Hart en delen van Friesland, voedt het grondwater ook het gras en de kruiden. In deze gebieden geldt voor al het groen dan ook situatie 3. Bij zulke natte omstandigheden horen overigens specifieke boomsoorten. Voor de meeste bomen is een grondwaterstand van circa 1 meter beneden maaiveld optimaal.

Voor groen in situatie 1 is kwetsbaar in een extreem droog jaar. Dit groen krijgt te maken met een snelle en grote beperking in vochtbeschikbaarheid wanneer de grondwaterspiegel tot onder een kritisch niveau zakt. Dieper dan 2 meter onder maaiveld is zeker kritisch.

Met name in laag Nederland speelt ook het risico op schade aan funderingen als gevolg een (te) lage grondwaterstand. Houten funderingen zijn oorspronkelijk gebouwd op 10-50 cm onder de van nature laagst voorkomende grondwaterstand. Als de laagste grondwaterstand dermate daalt dat het bovenste deel van de houten fundering boven het grondwater gaat uitsteken en droog komt te staan, ontstaat paalrot. Bijvoorbeeld door lekke drainerende riolen, te laag afgestelde drainages, bronbemaling, verlaging van het oppervlaktewaterpeil en grondwateronttrekking. Door het weggroten van het bovenste deel van het funderingshout gaat het erop staande bouwdeel zakken. Ramen en deuren gaan klemmen, er ontstaan scheuren, er treedt scheefstand op, en als er geen herfundering plaatsvindt gedeeltelijke of gehele ineenstorting.

2.2.2 **OPPERVLAKTEWATER**

Waterpartijen in en om de bebouwde omgeving blijven, afhankelijk van de situatie, op peil via de gevallen neerslag, overtollig hemel- en grondwater van lozingspunten, instromend grondwater en wateraanvoer vanuit de regio. Het water is alom aanwezig, wordt vastgehouden via (beweegbare) stuwen of aangevoerd via bovenstroomse voorzieningen. Afhankelijk van

de afdichting van bodem en oevers heeft de waterpartij een directe relatie met de heersende grondwaterstand. Bij langdurige droogte zal het waterpeil door verdamping wegzakken en situatie-afhankelijk worden aangevuld met grondwater. Bij een (te) lage waterstand kunnen waterkwaliteitsproblemen zoals vissterfte en blauwalgen ontstaan als gevolg van opwarming en zuurstofgebrek.

De afhankelijkheid van de voornaamste waterbronnen, regen- en grondwater, varieert. Er zijn grofweg vier situaties:

1. Volledig regenwaterafhankelijk: In langdurige droge periodes verdampt de watervoorraad;
2. Afhankelijk van de alom heersende oppervlaktewaterstand: het oppervlaktewaterpeil volgt de waterstand in het peilvak. Er is een directe relatie tussen het oppervlaktewater en grondwaterpeil.
3. Afhankelijk van regen- en grondwater: Als de verdamping groter is dan de aanvulling vanuit het grondwater zakt het waterpeil;
4. Afhankelijk van regenwater en bovenstroomse aanvoer van oppervlaktewater: Als de verdamping groter is dan de bovenstroomse aanvulling zakt het waterpeil;

Situatie 1 betreft met name geïsoleerde voorzieningen. Die kunnen overal in Nederland voorkomen. Situatie 2 is met name van toepassing in laag Nederland. Er is een directe wisselwerking tussen het oppervlaktewater en het grondwater. Situatie 3 is met name van toepassing in hoog Nederland. De waterpartijen zijn sterk afhankelijk van de beschikbare hoeveelheid grondwater. Situatie 4 is met name van toepassing in hoog Nederland waar waterpartijen worden gevoed vanuit beken. Wanneer de beken droogvallen is er een aanzienlijke kans dat de waterpartijen bij langdurige droogte ook droogvallen.

Vooraf waterpartijen in situatie 3 en 4 zijn kwetsbaar in een extreem droog jaar. De waterpartij krijgt dan te maken met een grote beperking in waterbeschikbaarheid wanneer de grondwaterspiegel of de aanvoer tot onder een kritisch niveau zakt. Geïsoleerde voorzieningen (situatie 1) zijn aangewezen op de aanvoer via tankwagens of tijdelijke leidingen. In situatie 2 is sprake van (bovenregionale) afspraken over de waterverdeling om de peilvakken op het gewenste niveau te houden.

Bij een lange verblijftijd in het oppervlaktewater ontstaat opwarming, kroosvorming, zuurstoftekort en vissterfte. Verversing is echter niet altijd een optie vanwege de verdringingsreeks. De verdringingsreeks geeft de rangorde van maatschappelijke behoeften aan, die bij de verdeling van het beschikbare water in acht wordt genomen. De behoefte aan verversing kan leiden tot een watervraag of inrichtingsmaatregelen zoals een grotere waterdiepte of flexibel peilbeheer om zuurstofrijk regenwater langer vast te houden.

2.3 WATERVRAAG

In het onderzoek Klimaat en Watervraag Stedelijk Gebied is de watervraag gedefinieerd als de hoeveelheid water die nodig is voor een constant oppervlaktewaterpeil. Hanteren van deze definitie zal, met name voor de hoge zandgronden, leiden tot een overschatting van de watervraag. In veel situaties is immers sprake van een natuurlijk uitzakkingsproces.

Indien de watervraag wordt gedefinieerd als de hoeveelheid water die nodig is om de (langdurig droge) periode dat het grondwater en/of het oppervlaktewater onder het kritieke niveau zakt te overbruggen, zal dat leiden tot een onderschatting van de watervraag.

Er moet immers ook water preventief worden aangevoerd of opgeslagen om te voorkomen dat het waterpeil onder het kritieke niveau zakt. Het kritieke niveau is het grondwaterniveau waarbij de capillaire werking wordt onderbroken of het oppervlaktewaterniveau waarbij de waterkwaliteit in het geding komt.

In dit verkennende onderzoek is bij duiding van het effect op de watervraag aangegeven of het gaat om het op peil houden van de waterstand en/of het overbruggen van de periode dat de waterstand onder het kritieke niveau zakt.

2.4 WATERAANVOER

Sommige gebieden hebben door de landschappelijke en geomorfologische gesteldheid ook in droge tijden een natuurlijke jaarrond (grond)wateraanvoer. Denk bijvoorbeeld aan zones onderaan stuwwallen, zoals de Veluwe, of gebieden waar het grondwater wordt gevoed uit rivieren. In andere gebieden is deze aanvoer veel beperkter, bijvoorbeeld alleen in de winter en het vroege voorjaar in de periode van het jaarlijkse neerslagoverschot. In deze gebieden kan door specifieke inrichting van de stad of in de stadsrand ervoor worden gezorgd dat hogerop water extra wordt vastgehouden in tijden van (hoge) wateraanvoer, waarna het in droge periodes weer beschikbaar is voor het groen. Dit kan door het water te laten infiltreren in de bodem of door opslag in waterpartijen en brede natuurlijke oevers. Ook kan in deze gebieden het regenwater beter worden vastgehouden. Als er weinig ruimte is kan ook worden gekozen voor opslag in ondergrondse reservoirs of bijv. onder groene (eigenlijk groenblauwe) daken. In gebieden zonder natuurlijke (grond)wateraanvoer kan dit door het verlagen van de run-off en het beter vasthouden van de neerslag, bijv. door infiltratie of in (opgezet) oppervlaktewater of in dichtbebouwde gebieden in technische voorzieningen als reservoirs en groenblauwe daken.

In de hypothetische situatie dat er voldoende schoon water beschikbaar is om te kunnen aanvoeren resteert de vraag of het water er überhaupt wel (onder vrij verval) kan komen. Zo kunnen geïsoleerde waterpartijen bijvoorbeeld niet worden gevoed en wordt bodemvocht hoofdzakelijk door neerslag aangevuld in plaats van oppervlaktewater. Als eenmaal de capillaire werking vanuit de grondwatervoorraad is doorbroken dan kan alleen water van bovenaf de werking herstellen (irrigatie, besproeiing, neerslag). Bij het aanvullen van bodemvocht door opgeslagen regenwater of peilopzet gaat de afstand/invloedssfeer een rol spelen.

2.5 MAATREGELEN

Op basis van een uitgebreide bureaustudie naar bestaande literatuur en interviews zijn we gekomen tot een bundeling van onderstaand type maatregelen die de watervraag beïnvloeden.

Verdampingswater besparen

Het beperken van onttrekkingen is een klimaatadaptieve maatregel in relatie tot droogte. Het omvat maatregelen die de mate van verdamping en daarmee de onttrekking van water uit de bodem verlagen. Bijvoorbeeld:

- Droogtebestendig groen aanplanten;
- Beschaduwen van de omgeving;
- Toepassen van bodembedekkers;
- Beleidsmaatregelen gericht op een reductie van kunstmatige wateronttrekkingen.

Benutten van hemelwater (blauwgroene maatregelen)

Het treffen van blauwgroene maatregelen is een klimaatadaptieve maatregel in relatie tot droogte, wateroverlast en hittestress. Het omvat maatregelen die het hemelwater vasthouden, bergen en vertraagd afvoeren. Bijvoorbeeld:

- Bergings- en infiltratievoorzieningen als een wadi, groen of regenton
- Afkoppelen van verhard oppervlak en lozing van het afgekoppelde hemelwater in de bodem/oppervlaktewater;
- Ontharden/vergroenen van stedelijk gebied.

Reguleren van ondiep grondwater

Het reguleren van ondiep grondwater is een klimaatadaptieve maatregel in relatie tot droogte. Het omvat maatregelen die invloed hebben op de hoogte en fluctuatie van de grondwaterstanden. Bijvoorbeeld:

- Actief grondwaterbeheer door middel van gecombineerde drainage-infiltratie;
- Peilopzet van oppervlaktewater.

Benutten diep grondwater

Het benutten van diep grondwater is een klimaatadaptieve maatregel in relatie tot wateroverlast en droogte. Het omvat maatregelen die de diepe grondwatervoorraad in watervoerende lagen in de ondergrond aanvullen en maatregelen die juist water onttrekken op grote(re) diepte. Bijvoorbeeld:

- Diepinfiltratie van overtollig hemelwater;
- Onttrekking via bronneringen.

Aanvoeren van water

Het aanvoeren van water is een klimaatadaptieve maatregel in relatie tot droogte. Het omvat maatregelen om het water in stedelijk watersysteem (bijvoorbeeld een gracht) op peil te houden. Bijvoorbeeld:

- Doorspoelen door water in te laten;
- Verweken van de bodem door water aan te voeren.

Overbruggen van langdurig droge perioden

Er zijn verschillende type maatregelen om het risico op een verslechtering van de waterkwaliteit als gevolg van langdurige droogte te voorkomen. Bijvoorbeeld:

- Benutten effluent voor aanvulling oppervlaktewater;
- Aanvoer van zuurstofrijk regenwater naar het oppervlaktewater;
- Flexibel peilbeheer;
- Grotere waterdiepte voor een trager opwarmingseffect;
- Stimuleren van re-aeratie en mengen van waterstromen door watercirculatie;
- Beïnvloeden wind om waterverdamping te reduceren.

3

EFFECTEN VAN MAATREGELLEN

Dit hoofdstuk beschrijft in algemene zin de effecten van maatregelen op de stedelijke water- vraag en het effect op (grond)wateroverlast. Bruikbare onderzoeksresultaten zijn binnen de context van het onderzochte gebied beschreven. Voor het uitdrukken van het effect van de maatregel(en) op de stedelijke water- vraag en (grond)wateroverlast is onderstaande maatlat gehanteerd:

TABEL 1 MAATLAT EFFECTEN VAN MAATREGELLEN (SCHAAL 1..5)

	1	2	3	4	5
Effect op stedelijke water- vraag	Geen	Overbrugging korte droge periode (weken)	Overbrugging middellange droge periode (maanden)	Overbrugging lange droge periode (enkele maanden)	Structurele oplossing
Effect (grond) wateroverlast	Negatief effect	Negatief effect	Geen effect	Positief effect	Positief effect
	Significante impact	Geringe impact		Geringe impact	Significante impact

Hoofdstuk 6 bevat een samenvatting per maatregel van het effect op de stedelijke water- vraag en op (grond)wateroverlast.

3.1 MAATREGEL A VERDAMPINGSWATER BESPAREN

Het besparen van verdampingswater is mogelijk door bestaand groen te vervangen door droogtebestendigere soorten. Bij voorkeur zijn dit inheemse soorten, die niet verstoring werken op het bestaande ecosysteem. Andere soortgelijke maatregelen zijn het toepassen van leeflagen, bodembedekkers en beschaduwing.

TOEPASSINGSGEBIED

Maatregelen om verdampingswater te besparen zijn toepasbaar voor alle landschapstypologieën in Nederland. Wel is het zinvoller om dergelijke maatregelen in regenwaterafhankelijke gebieden in Hoog-Nederland toe te passen omdat neerslag de enige bron is. Groen in Laag-Nederland is doorgaans kwetsbaarder voor fluctuaties in de waterbeschikbaarheid. Door de weerbaarheid van dit groen te verhogen tegen dergelijke fluctuaties vermindert de kwetsbaarheid.

EFFECT OP STEDELIJKE WATERVRAAG

Het effect van dit type maatregel is afhankelijk van het verschil in verdamping tussen de verschillende soorten groen en de mate waarin groen elkaar wel/niet beschaduwd. De gewasfactor voor verdamping kan bijvoorbeeld met wel 50% verschillen tussen gras of een solitaire bomenrij. De verwachting is dat dergelijke maatregelen een structureel effect hebben doordat er continue minder grondwater wordt onttrokken, met name tijdens warme zomermaanden.

De verdamping van groen is met name afhankelijk van de volgende factoren:

- Worteldiepte en dikte leeflaag
- Bladoppervlak
- Verdampingsreductie door vochttekort

De worteldiepte is afhankelijk van het type vegetatie en wordt in praktijk sterk bepaald door de dikte van de aangebrachte leeflaag. De worteldiepte zal vergelijkbaar zijn met de dikte van de leeflaag.

Voor de simulatie van de verdamping kan gebruik worden gemaakt van de verdampingsformule van Makkink. Deze formule geeft de verdamping voor gras dat voldoende vochtig is (potentiële verdamping). Andere typen vegetatie worden door middel van een verdampingsfactor gerelateerd aan de verdamping van gras. De verdamping van vegetatie neemt af wanneer de bodem droger wordt. Voor de verdampingsreductie als gevolg van vochttekort kan gebruik worden gemaakt van de Feddes reductiefunctie. Deze schaaft de verdamping tussen 0 en 1 afhankelijk van het bodemvochtgehalte. Hierbij neemt de verdamping lineair af wanneer een vegetatieafhankelijk bodemvochtgehalte wordt overschreden tot het verwelkingspunt.

Effect organisch stofgehalte en organische bodembedekkers

Er is nog betrekkelijk weinig informatie over de verdamping en vochthuishouding van vegetatie in de stad. In het NKWK-onderzoek “Droogte en stedelijk groen” (lit. 16) wordt melding gemaakt van het effect van het organisch stofgehalte op het vochtgehalte. Het vochtgehalte in de leeflaag bedraagt bij veldcapaciteit (grondwaterstand 1m onder onderkant wortelzone) ca. 37% bij 10% organische stof (humusrijk zand) en 23% bij 1% organische stof (humusarm zand).

Uit deze informatie kan worden afgeleid dat met het aanbrengen van een leeflaag (humusrijk) het vochtgehalte met 14% kan toenemen ten opzichte van een humusarme onderlaag.

Wetenschappelijk onderzoek naar 16 verschillende organische bodembedekkers (lit. 50) heeft aangetoond dat het bodemvochtgehalte, uitzonderingen daargelaten, vrijwel onafhankelijk is van de laagdikte van de organische bodembedekker. Voor een verhoging van het bodemvochtgehalte dient de dikte van de organische bodembedekker minimaal 5 cm te zijn. Voor de opname van regenwater dient de dikte minimaal 10 centimeter te bedragen.

AFBEELDING 4 ONDERZOEK NAAR VOCHTHUISHOUDING ORGANISCHE BODEMBEDEKKERS



Het betreffende onderzoek is een referentie voor het selecteren van organische bodembedekkers die geschikt zijn voor stedelijke vergroening.

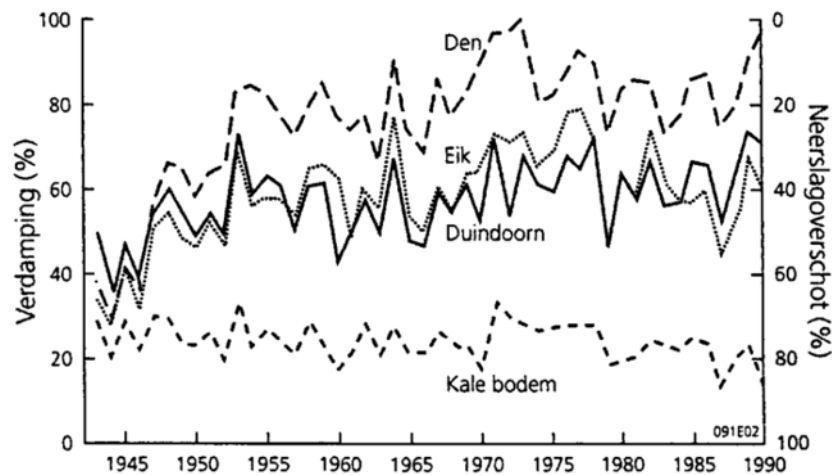
Effect bladgrootte

In plaats van het soort groen kan ook de zogenoemde Leaf Area Index (LAI) (lit. 51) worden gehanteerd. Een index waarbij de oppervlakte van het blad als uitgangspunt wordt genomen. Over het algemeen geldt: hoe groter het oppervlak van het blad, hoe meer waterdamp de boom uit haar bladeren verspreidt. Er zit wel een limiet aan de evapotranspiratie. Een 'te groot' bladoppervlak leidt tot een 'te dicht' bladerdak. De transpiratiesnelheid vermindert omdat er minder licht/zonnestraling op de bladeren valt. Ook zal bij een grotere LAI de kans toenemen dat de dikte van het bladerdek groter is. Hierdoor dringt zonnestraling moeilijker binnen in het blad. Ook daarom vermindert de transpiratiesnelheid.

Effect boomsoort

Het soort boom is sterk bepalend voor de verdampingswaarde (lit 52). Figuur 5 laat bijvoorbeeld zien dat dennenbomen meer vocht verdampen dan eiken en duindoorns.

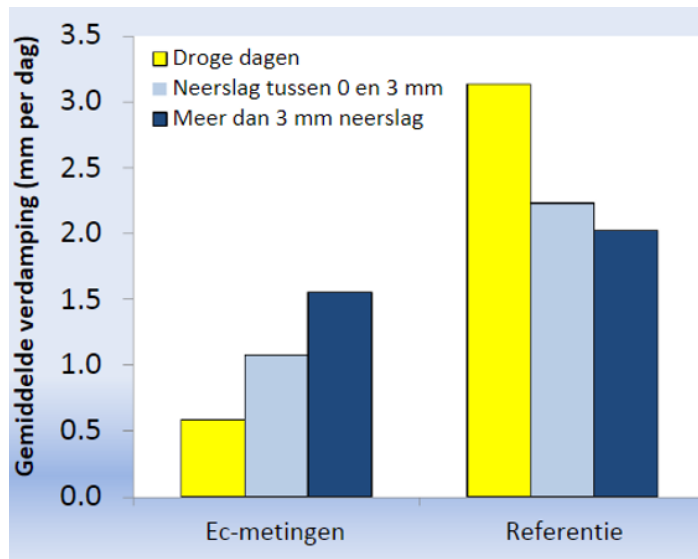
AFBEELDING 5 VERSCHIL IN VERDAMPINGSWAARDE VERSCHILLENDE BOOMSOORTEN (BRON: LIT. 52)



Verdamping van een stad

Alterra Wageningen UR meet sinds juni 2012 de verdamping in het centrum van Arnhem. De verdampingsmetingen zijn gestart in het kader van het onderzoeksprogramma Climate Proof Cities. Over langere tijd zijn de waarnemingen representatief voor een cirkel met een straal van ongeveer 1 kilometer rond het meetpunt in Arnhem. Dit stadsdeel is voor 87 procent verhard en voor 12 procent bedekt met vegetatie. De resterende 1 procent is open water. Naast de verdampingsmetingen zijn ook gewone weermetingen gedaan: neerslag, zonnestraling, temperatuur en luchtvochtigheid. Het onderzoek toont aan dat de gemeten verdamping sterk toeneemt met de neerslaghoeveelheid, terwijl de berekende referentieverdamping (grasland) juist afneemt. Op regendagen is de stad blijkbaar in staat het water efficiënter te verdampen dan een grasland, waarschijnlijk dankzij in stadsmaterialen opgeslagen zonne-energie (lit. 53).

AFBEELDING 6 REACTIE VAN DIRECT GEMETEN VERDAMPING EN REFERENTIEVERDAMPING (GRASLAND) IN ARNHEM OP NEERSLAG



Naast het in de figuur 6 getoonde effect speelt nog een tweede effect een rol. In het centrum van Arnhem bevinden zich veel gebouwen met platte daken. Door berging van regenwater op deze daken ontstaat een interceptiereservoir. Daardoor is de gemeten actuele verdamping nog langere tijd verhoogd. Dit effect is terug te vinden tot 3 à 4 droge dagen na een regendag. Terwijl de actuele, gemeten verdamping geleidelijk afneemt tijdens het opdrogen van de daken, neemt de berekende referentieverdamping gemiddeld juist toe. Naast dit verschillend gedrag is ook opgevallen dat de gemeten actuele verdamping geen duidelijk seizoenspatroon vertoont, terwijl de berekende referentieverdamping normaal gesproken een duidelijk maximum laat zien in de zomer. Bij gebruik van de referentieverdamping als maatstaf voor de stadsverdamping zou de watervraag van het centrum van Arnhem in de zomerperiode waarschijnlijk dus overschat worden.

EFFECT OP (GROND)WATEROVERLAST

Interceptie van neerslag door boomkronen (en andere vegetatie) kan een bijdrage leveren aan het voorkomen van wateroverlast bij zware buien. Een deel van de neerslag blijft achter op blad, takken en stam en kan vandaar weer verdampen. Hierdoor, en doordat het overige water vertraagd via de stam naar de grond vloeit (stemflow) of van het blad afdruipt (throughfall), worden neerslag pieken afgevlakt. De mate waarin bomen water vasthouden is afhankelijk van omvang en dichtheid van de kroon, bladeigenschappen en schorstype. De capaciteit van bomen hiervoor is het hoogst voor grote bomen met een dichte altijd groene kroon en weinig stemflow (bijv. *Picea abies*), veel minder voor kleinere bomen of grote bomen met een relatief open kroon (bijv. *Populus*) en het geringst voor kleine bomen en bomen met een relatief smalle of zuilvormige kroon en een gladde bast (bijv. *Cercidiphyllum*). J. Hiemstra heeft in 2018 een soortentabel met ruim 100 boomsoorten gepubliceerd. Per boomsoort is de mate van interceptie aangegeven. De indeling in de verschillende klassen is gebaseerd op een inschatting (expert knowledge) en moet gezien worden als een indicatie vanwege het ontbreken van experimentele gegevens. De waardering verwijst naar het effect van volwassen bomen, jonge pas geplante bomen hebben een veel beperkter effect.

J. Fidal en T.R. Kjelden (*Journal of Hydrology*, Volume 589, October 2020, 125122) hebben in een studie het effect onderzocht van bodemvocht op de run-off in verschillende wijken. Ze hebben hiervoor twee conceptuele modellen gebruikt die rekening houden met hydro-

logische effecten van stedelijk gebied. Het eerste model gebruikt een constant percentage afvoer, het tweede model koppelt expliciet bodemvocht aan de afvoer van stedelijk gebied. De resultaten laten zien dat het model met een expliciete link naar bodemvocht 12% beter presteerde dan het model met een vast percentage in 28 stedelijke stroomgebieden in het Verenigd Koninkrijk. Voor piekafvoeren in sterk verstedelijkte stroomgebieden presteerde het gekoppelde model 17% beter dan het vaste percentagemodel. Het meten en modelleren van het bodemvochtgehalte is op basis van deze bevindingen van toegevoegde waarde.

De maatregel heeft met name een plaatselijk effect, er wordt uit de groeiplaats minder bodemvocht onttrokken. Om de grondwaterstand te kunnen beïnvloeden is een significant oppervlak nodig.

SLEUTELFACTOREN

- Er moet een goede balans zijn tussen soortkeuze en de verhouding tussen de verschillende soorten groen. Als één groensoort dominant wordt zal deze de gewasverdamping gaan bepalen.
- Beschaduwning van groen zorgt voor een verlaging van de omgevingstemperatuur en daarmee de verdamping. Dit effect wordt pas bereikt door gelaagdheid aan te brengen en planten/bomen in elkaars schaduw te plaatsen.
- Water onder verharding zal minder snel verdampen. De verhardingsgraad speelt dus een rol van betekenis.

AANBEVELING VOOR RICHTLIJNEN

Een stedelijk interceptiemodel biedt mogelijk uitkomst om de verdamping op wijk- of stadschaal beter in te schatten. Hiervoor dienen tenminste de grote groene oppervlakken te worden opgenomen in het model en de gewasverdamping van de meest dominante soort(en) te worden gehanteerd.

Over met name gewasfactoren per type groen in het stedelijk gebied is nog weinig bekend. Er zijn slechts enkele voorbeelden gevonden m.b.t. het monitoren van verdampingswaarden in stedelijk gebied. Dergelijke waarden kunnen via wetenschappelijk onderzoek worden bepaald. Voor de stedelijk waterbeheerder heeft het wel zin om op enkele strategische locaties de omgevingstemperatuur te meten om zo een betere inschatting te kunnen maken van de gewasverdamping op basis van bijvoorbeeld een temperatuur-verdampingscurve. Met de inzet van bodemvochtsensoren en peilbuizen kan de stedelijk waterbeheerder een vinger aan de pols houden.

Met het kort houden van groen (snoeien of maaien) in combinatie met instandhouding van beschaduwing wordt de gewasverdamping beperkt.

CONCLUSIE

Het beperken van verdamping/vocht beter vast te houden door o.a. andere soorten groen toe te passen (kleiner bladoppervlak), het organisch stofgehalte van de leeflaag te verhogen (vocht beter vasthouden) en bodembedekkers toe te passen (verdamping tegengaan) scoort een 4 tot 5 (overbrugging (zeer) lange droge perioden) op de maatlat “effect op stedelijke watervraag” (tabel 1). Door interceptie, stemflow en throughfall vertraagt de regenafvoer wat een positief effect heeft op het beperken van wateroverlast. Het aanbrengen van gelaagdheid (leeflaag, bodembedekker en groen met een klein bladoppervlak) en het creëren van schaduwwerking zijn sleutelfactoren om het vocht beter vast te houden en de verdamping te verminderen.

De impact op wateroverlast is gering (score 4) en verschilt per boomsoort. Uit modelonderzoek in Engeland blijkt een verbetering van modelresultaten (10%) als de parameter bodemvocht wordt meegenomen in de berekening. Uit praktijkonderzoek in Arnhem blijkt dat het hanteren van de referentieverdamping (grasland) tot een over- of onderschatting kan leiden als gevolg van de nalevering van warmte, waterberging op platte daken en een afwijkend seizoenseffect. Het toepassen van een interceptiemodel heeft op basis van deze bevindingen meerwaarde aangezien het afvlakkend effect op de watervraag en de runoff wordt meegenomen. Het meten van bodemvocht en gewasverdamping zal bijdragen aan een meer nauwkeurige modellering.

De range in verdamping van verschillende type bomen is ca. 10-20% gedurende het jaar. Dit ligt in dezelfde orde van grootte als de modelnauwkeurigheid van het achterwege laten van een stedelijk interceptiemodel. Aanbevolen wordt om de interceptie door groen geschematiseerd te modelleren.

Bronnen: onder andere nr. 16, 50,51,52, 53 (zie Bijlage Literatuurlijst voor nummering en literatuurverwijzing)

3.2 MAATREGEL B BENUTTEN VAN HEMELWATER

Het vasthouden, bergen en vertraagd afvoeren van hemelwater is een klimaatadaptieve oplossing die een diversiteit aan (blauwgroene) maatregelen kent. Het gaat hierbij o.a. om ontharden (vervangen van verharding door groen), afkoppelen van verhard oppervlak, maaiveld-herinrichting en hemelwaterwaterberging. De riolering is met deze maatregelen beter bestand tegen hevige regenbuien, waarbij de bodem zoveel als mogelijk als spons wordt gebruikt. Berging en infiltratie kan plaatsvinden op straat, in het groen, met een infiltratievoorziening (een doorlatend medium zoals een leiding, krat of substraat), op groene daken etc. Hemelwaterberging kan bestaan uit piekberging (berging moet weer zo snel mogelijk beschikbaar zijn voor de volgende bui) of seizoensberging (opgevangen neerslag wordt opgeslagen voor later gebruik).

TOEPASSINGSGBIED

Maatregelen voor vasthouden, bergen en vertraagd afvoeren van hemelwater kunnen in principe in heel Nederland toegepast worden. De landschapstypologie heeft wel implicaties voor toepasbaarheid. In Laag-Nederland zijn infiltratiemogelijkheden beperkt door hoge grondwaterstanden. In Hoog Nederland kunnen de mogelijkheden voor afstroming naar open water beperkt zijn doordat er relatief weinig oppervlaktewater aanwezig is. Daarentegen is er wel meer opslagcapaciteit in de bodem. In heuvelachtig landschap is vaak sprake van een combinatie van maatregelen.

EFFECT OP STEDELIJKE WATERVRAAG

Van de netto neerslag (neerslag minus verdamping) die valt op verhard oppervlak, wordt in Nederland ongeveer de helft afgevoerd naar de rioolwaterzuivering, een kwart naar het oppervlaktewater en een kwart naar het grondwater. Ervan uitgaande dat de bodem als spons functioneert kan dus mogelijk 50-75% uit het systeem verdwijnen. Er is dus nog een groot potentieel aan te benutten hemelwater voor het overbruggen van langdurig droge perioden.

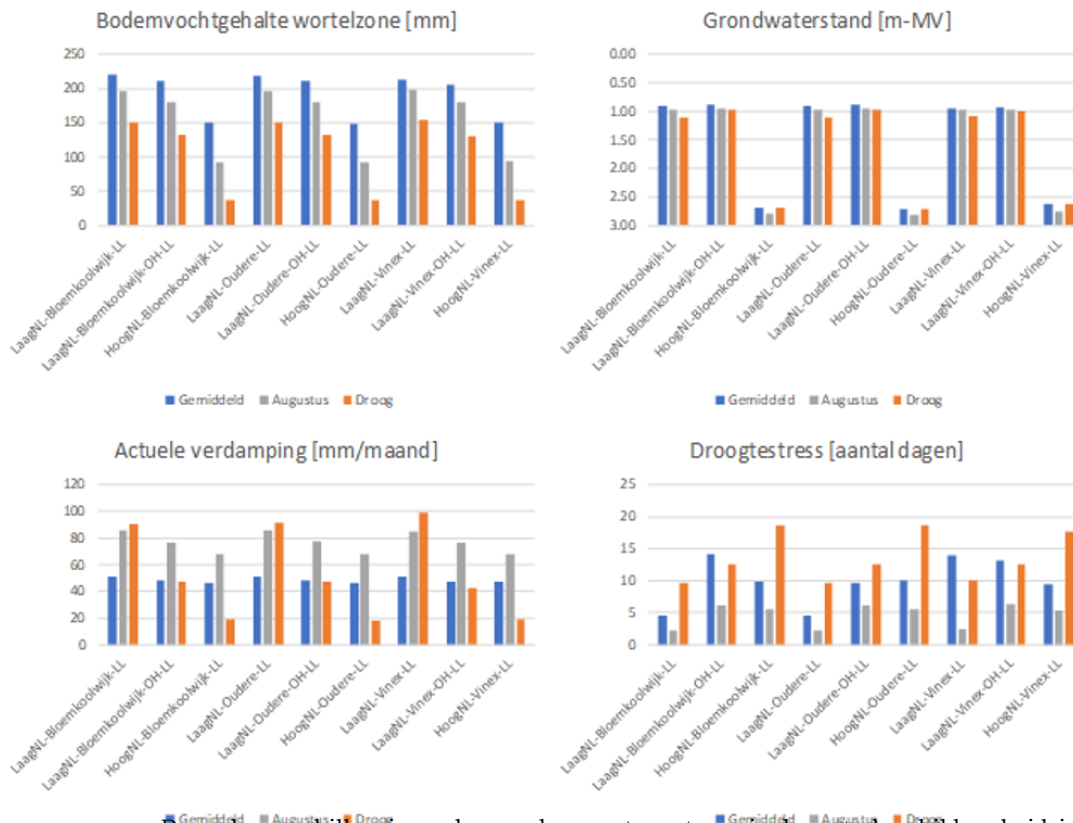
Ontharding (hetzij door waterdoorlatende bestrating, door afstroming naar plaatselijke infiltratievoorzieningen of verwerking via wadi's) heeft een structureel positief effect op de onverzadigde en verzadigde zone. De piekafvoer naar waterlopen of de RWZI wordt gereduceerd, maar al het water wat infiltreert zorgt voor een verhoogde vochttoestand in groenzones en groeiplaatsen van bomen.

Bij blauwe maatregelen zoals regentonnen, vijverpartijen, waterpleinen e.d. blijft het gebufferde hemelwater overwegend binnen het stedelijk watersysteem. De berging op straat en op vlakke daken zal verdampen. Op basis van meerjarige tijdreeksberekeningen en uitgaande van open waterverdamping in de straatbak is de verdamping van versteend oppervlak ca. 80-100 mm per jaar.

Bij groenblauwe maatregelen zoals wadi's en verlaagde groenstroken is sprake van zowel open waterverdamping gedurende de periode dat het water bovengronds wordt geborgen (2-3 dagen) als gewasverdamping. Een deel van het geborgen hemelwater wordt toegevoegd aan de bodem en draagt bij aan een vermindering van de watervraag, maar een ander deel verdampt en draagt bij aan een verhoging van de watervraag. Volgens modelberekeningen voor verschillende type wijken (lit. 16) bedraagt de actuele verdamping van een bepaald type wijk orde grootte 50-100 mm per maand gedurende de zomermaanden. Ten opzichte van blauwe maatregelen hebben groene of groenblauwe maatregelen dus een significant effect op de watervraag.

Onderstaande resultaten van globale modelsimulaties tonen verschillen in bodemvochtgehalte, grondwaterstand, verdamping en droogtestress (dit zijn dagen waarop minder dan 10% van de potentiële verdamping kan plaatsvinden) voor gebieden in laag en hoog Nederland en voor bloemkoolwijken, oude centra en Vinex-wijken. De doorgerekende maatregelen zijn: toepassen van waterpasserende verharding, afkoppelen van wegen en daken naar groen en verschillen in peilopzet.

AFBEELDING 7 RESULTAAT GLOBALE MODELSIMULATIES VOOR DRIE VERSCHILLENDE WIJKTYPEN, VOOR LEEFLAAG OP KLEIIGE ONDERGROND (LL) EN LEEFLAAG OP ZANDIGE OPHOOGLAAG OP KLEI (OH-LL) BRON: LIT. 16



Door de verschillen in ondergrond en watersysteem is de waterbeschikbaarheid in hoog Nederland geringer dan in laag Nederland. Dit komt tot uitdrukking in een aanzienlijk

lager bodemvochtgehalte en meer dagen waarop het groen droogtestress ondervindt. In laag Nederland, waar over het algemeen een leeflaag direct op klei ligt, is wat meer bodemvocht beschikbaar dan in de situatie waarbij eerst een ophooglaag is aangebracht op de klei. In een profiel met een zandige ophooglaag percoleert de neerslag snel door naar het grondwater en is er minder capillaire opstijging vanuit dit grondwater. Het resultaat is een lager bodemvochtgehalte in de wortelzone en meer dagen met droogtestress.

In laag Nederland heeft het groen in gemiddelde jaren profijt van de klimaatadaptieve maatregelen. Maar bij extreme droogte vermindert hier het aantal dagen met droogtestress nauwelijks door inzet van maatregelen. Het extra gebufferde water is in een extreem droog jaar snel opgebruikt. Acceptatie of irrigatie zijn dan toch nodig. Peilopzet scoort iets beter dan andere maatregelen. Hierbij stijgt de grondwaterspiegel en daarmee de capillaire nalevering, wat weer resulteert in een hoger bodemvochtgehalte. Voor deze maatregel is in tijden van schaarste extra wateraanvoer nodig, wat omwille van de waterverdeling en waterkwaliteit vaak minder wenselijk is.

In hoog Nederland zijn de klimaatadaptieve maatregelen altijd nuttig. Het aantal droogtestressdagen wordt hier in een extreem droog jaar met circa 50% gereduceerd. Vooral doordat de grondwaterstand via infiltratie van neerslag omhoog wordt gebracht. Maximaal infiltreren levert circa een maand overbruggingstijd. Dat is echter niet genoeg in een extreem droog jaar.

In een onderzoek naar droogte en waterschaarste in Antwerpen (lit. 29) is voor een vlakhellend gebied het effect onderzocht van een grondwaterstandsverlaging van 0,5-1 meter als gevolg van klimaatverandering. Uit modelsituaties bleek de hoeveelheid kwel bij gemiddeld 35% met 20% af te nemen naar 15% bij 40% ontharding en van 35% naar 0% bij 100% ontharding. Hierbij traden grote verschillen op per postcodegebied. Globaal is er over de stad op jaarbasis een overaanbod aan regenwater, effluentwater en drainagewater om te voldoen aan de potentiële vraag. Maar vraag en aanbod zijn echter niet optimaal verdeeld, niet in tijd en niet in ruimte. De extra watervraag voor groenvoorzieningen betrof 42.000 m³/maand, voor aanvulling van vijverpartijen 28.000 m³/maand en voor de watergift van minder droogte tolererende bomen 540.000 m³/maand. Totaal 610.000 m³.

Bruikbare kentallen uit dit onderzoek:

- Watergift nieuw aangeplante bomen 80 liter per boom per week gedurende de eerste 2 seizoenen (in mei-september) → 1,6 m³/boom per jaar;
- Onderscheid bomen < 2 jaar (3%), toekomstbomen (> 100 jaar) (<1%), bomen met lage droogtetolerantie (80%) en bomen met hoge droogtetolerantie (16%);
- Benodigde watergift ca. 7 m³ per boom per maand (kruindiameter 10 m) → omgerekend een tankwagen per boom per 2 maanden of ca. 3 mm/dag;
- Besproeiing bij tekort 100 mm/maand gedurende 2 zomermaanden → 3 mm/dag.

De stedelijke watervraag voor de stedelijk waterbeheerder voor besproeien en kunstmatige watergift wordt op basis van bovenstaand onderzoek geschat op ca. 3 mm/dag om (van bovenaf) te voorzien in water om een langdurig droge periode te overbruggen.

Het Kennisdocument hemelwaterverwerkende voorzieningen van Waternet (lit. 60) biedt een overzicht van kengetallen en ervaringen op basis van praktijksituaties. Uit dit (lopende)

onderzoek blijkt dat verschillende doelen tot conflicterende ontwerpkeuzes kunnen leiden. Denk hierbij aan het maximaal vasthouden van hemelwater t.b.v. verdamping, terwijl tegelijkertijd voldoende berging beschikbaar moet zijn om intensieve regenbuien op te vangen. Geadviseerd wordt om in de ontwerpfase duidelijke functionele eisen op te stellen. Bijvoorbeeld de maximale tijd waarbinnen de voorziening leeg moet zijn, maar ook een minimale vertraging van hemelwaterafvoer. De ontwerpen vereisen ook een nauwgezette uitvoering, waarbij alle verbindingen en overstorten op het juiste niveau worden aangelegd. In de praktijk blijken dergelijke voorzieningen bij de realisatie vaak vragen op te roepen, waardoor een voorziening verkeerd wordt aangelegd en de werking na oplevering onduidelijk is. Omdat het falen van één object gevolgen kan hebben voor het functioneren van het hele systeem wordt geadviseerd om in het ontwerp een goede balans tussen complexiteit en robuustheid van het systeem te bewaren. Tijdens de realisatie dient aandacht voor de beoogde werking van het systeem te worden geborgd. Ook blijkt het functioneren van veel systemen gevoelig te zijn voor verstopping door vuil. Dit kan relatief grof materiaal zijn (zoals blaadjes), maar ook kleinere opgeloste bestanddelen (< 63 µm). Aandacht voor de onderhoudbaarheid en de benodigde onderhoudsconcepten (inclusief monitoring) direct na realisatie is vereist.

De gemeten infiltratiesnelheden voor de verschillende typen hemelwatervoorzieningen varieert tussen gemiddeld 100 en 300 mm/h met uitschieters naar beneden (1-35 mm/h) en naar boven (1000 mm/h).

In het lopende vervolg NKWK-onderzoek (2022) bestaat het voornemen om op zowel gebiedsniveau als straatniveau met een waterbalansmodel berekeningen uit te voeren voor de volgende drie verschillende maatregelen:

- Afkoppelen en infiltreren naar de bodem
- Water aanvoeren via oppervlaktewater
- Meer groen in de straat

De uitkomsten van dit onderzoek zullen tot meer inzicht in het effect van klimaatadaptieve maatregelen in tijd en ruimte leiden.

EFFECT OP (GROND)WATEROVERLAST

Het benutten van hemelwater draagt bij aan het beperken van het risico op wateroverlast. Wel dienen hemelwatervoorzieningen tijdig leeg te zijn voor opvang van de volgende bui en dient de infiltratiecapaciteit van een infiltratievoorziening op orde te blijven. Aangezien een deel van het hemelwater wordt toegevoegd aan het grondwater en niet wordt afgevoerd kan dit in langdurige natte perioden leiden tot tijdelijke verhoging van de grondwaterstand en hiermee een grotere kans op grondwateroverlast. In veen- en kleigebieden zijn maatregelen om door droogte veroorzaakte schade tegen minder van belang. De effectiviteit van maatregelen als verharding afkoppelen en lokaal infiltreren dienen te worden afgewogen tegen de mogelijke toename van de kans op (grond)wateroverlast.

SLEUTELFACTOREN

De bodemgeschiedheid en grondwaterstand en de dikte van het (zand)pakket bepalen de mate waarin water kan worden geïnfilteerd en vastgehouden.

AANBEVELING VOOR RICHTLIJNEN

Voor de modellering is het van belang te onderkennen dat blauwgroene maatregelen vaak zijn voorzien van een overloopconstructie. Bij zware buien voeren deze overloopconstructies overtollig water af naar het openbare stedelijk watersysteem. Het stedelijk watersysteem moet daar dan wel op berekend zijn.

De ledigingstijd van een voorziening is een indicator voor een goed functioneren. Zeker bij ondergrondse waterbergingsvoorzieningen is het zinvol om de waterstand (handmatig) te meten. Daar waar er kans op grondwateroverlast is, verdient het aanbeveling om ook de grondwaterstand te monitoren.

Blauwgroene maatregelen zijn onderhoudsgevoelig. Goten kunnen dichtgroeien, voorzieningen kunnen dichtslaan, gewassen kunnen gaan woekeren. Dit is een aandachtspunt voor beheer. Verder is het van groot belang om goed zicht te houden op de locatie en toestand van de hemelwatervoorzieningen. Ze dienen net als rioleringsobjecten te worden beheerd met gebruikmaking van een beheersysteem. Ook dient juridisch te worden verankerd dat dergelijke voorzieningen niet onbedoeld verdwijnen of een andere functie krijgen.

CONCLUSIE

Het benutten van hemelwater door o.a. te ontharden, af te koppelen en (bovengrondse) hemelwaterberging scoort een 2 tot 4 (overbrugging korte tot lange droge perioden) op de maatlat “effect op stedelijke watervraag” (tabel 1). In Laag-Nederland is het extra in de bodem gebufferde water in een extreem droog jaar snel opgebruikt, waardoor acceptatie of irrigatie toch nog nodig zijn. Peilopzet scoort iets beter dan andere maatregelen. Hierbij stijgt de grondwaterspiegel en daarmee de capillaire nalevering, wat resulteert in een hoger bodemvochtgehalte. In Hoog-Nederland zijn de klimaatadaptieve maatregelen altijd nuttig, vooral doordat de grondwaterstand via infiltratie van neerslag omhoog wordt gebracht. Maximaal infiltreren levert circa een maand overbruggingstijd. Dat is echter niet genoeg in een extreem droog jaar. Het lokaal kunnen verwerken van het hemelwater is de belangrijkste sleutelfactor. Al het water wat binnen een gebied kan worden gehouden kan in potentie ook worden benut om de watervraag te reduceren.

De impact op wateroverlast kan gering tot significant zijn (score 4 tot 5), afhankelijk van het sponseffect van de bodem en de omvang van bovengrondse waterberging. De kans op grondwateroverlast kan bij een structurele stijging van de grondwaterstand wel enigszins toenemen. Bij de modellering is het van belang om te beseffen dat hemelwater wat van de riolering wordt afgekoppeld of infiltreert bij ontharden niet weg is uit het systeem tenzij het te ver wegzakt of direct wordt afgevoerd vanuit het stedelijk watersysteem. Het is meer een verplaatsing van water binnen het stedelijk watersysteem. Deze verplaatsing is niet of nauwelijks te meten. Wel kunnen peilmetingen in grond- en oppervlaktewater en eventueel bodemvochtsensoren worden gebruikt voor modelverificatie.

Verschillende doelen van hemelwatervoorzieningen (bergen, verdampen, infiltreren, afvoeren) kunnen tot conflicterende ontwerpkeuzes leiden en vereisen ook een nauwgezette uitvoering, waarbij alle verbindingen en overstorten op het juiste niveau worden aangelegd. In het ontwerp dient een goede balans tussen complexiteit en robuustheid van het systeem te worden bewaard. Ook blijkt het functioneren van veel systemen gevoelig te zijn voor verstopping door vuil. Aandacht voor de onderhoudbaarheid en de benodigde onderhoudsconcepten (inclusief monitoring) direct na realisatie is vereist.

De range in verdamping van verschillende type wijken is orde grootte 20-80 mm per maand gedurende een droge periode. Hieruit kan voorzichtig worden opgemaakt dat gedurende een droge periode een vergroende wijk circa 50 mm per maand meer kan verdampen in verhouding tot een versteende wijk. Daarentegen wordt er als gevolg van minder verharding ook minder regenwater uit het watersysteem afgevoerd. Aanbevolen wordt om groenblauwe infrastructuur al dan niet geschematiseerd te modelleren om meer grip te krijgen op de verplaatsing van water binnen of buiten een systeem.

Bronnen: onder andere nr. 7, 9, 10, 16, 17, 26, 29, 33 (zie Bijlage Literatuurlijst voor nummering en literatuurverwijzing)

3.3 MAATREGEL C REGULEREN VAN ONDIEP GRONDWATER

Door het grondwater in het stedelijk gebied te reguleren kan grondwateroverlast, maar ook -onderlast, verminderd worden. Denk bij overlast aan nadelige effecten als drassige gebieden en bij onderlast aan funderingsschade door paalrot of verdroging van stedelijk groen. Het reguleren van het ondiepe grondwater kan op verschillende manieren. De meest bekende maatregel is de lokale aanleg van drainage-infiltratieleidingen (DIT). Met de aanleg van DIT-leidingen worden pieken in het grondwaterpeil afgevoerd en bij neerslag infiltreert water in de bodem. Ook het verhogen of verlagen van het waterpeil van nabijgelegen oppervlaktewater kan het grondwaterpeil beïnvloeden. Bij een peilopzet infiltreert water via oevers/bermen in de bodem en draagt bij aan het bodemvocht/grondwater.

TOEPASSINGSGEBIED

Een DIT-stelsel kan in principe in heel Nederland toegepast worden. De meest voorkomende toepassing vindt plaats in peilgestuurde gebieden in Laag-Nederland. In de zomerperiode heeft het systeem een infiltrerende werking en in de winter een drainerende werking (uitzonderingen nagelaten). Het is efficiënter om deze maatregel toe te passen in slecht doorlatende gebieden omdat water daar langer wordt vastgehouden in de bodem. Denk daarbij aan veen- en kleilandschappen. Een (tijdelijke) peilverhoging of peilverlaging in het oppervlaktewater is in principe overal mogelijk waar de afvoer kan worden gereguleerd.

Kenmerkend is het zogenaamde 'instelniveau', dat is het streefpeil van het grondwater waarop het leidingsysteem is ingesteld. Actief grondwaterpeilbeheer is erop gericht om zowel grondwateroverlast als -onderlast (verzakkingen, funderingsschade, groenschade) te voorkomen of te beperken. Met actief grondwaterpeilbeheer wordt door de overheid de grondwaterstand in het openbare terrein geregeld. Private eigenaren kunnen, net als bij de regenwater- en afvalwaterriolering, een aansluiting aanvragen op het systeem voor actief grondwaterpeilbeheer. Zo kan dit systeem aan private eigenaren een effectieve randvoorwaarde bieden om op particulier terrein de grondwaterstand te regelen.

EFFECT OP STEDELIJKE WATERVRAAG

- Het verhogen of verlagen van het oppervlaktewaterpeil heeft een structureel effect op de watervraag. Het verhoogde oppervlaktewaterpeil voedt lokaal het grondwater met als gevolg dat de grondwatervoorraad wordt aangevuld en het grondwaterpeil stijgt.
- De aanleg van een DIT-stelsel kan zowel een positief als negatief effect op de watervraag hebben. In de winter wordt overtollig water afgevoerd naar het oppervlaktewater met als gevolg dat dit water op een later moment niet gebruikt kan worden om het grondwater aan te vullen. Daarentegen kan neerslag tijdens de zomer wel direct infiltreren en de grondwatervoorraad aanvullen. Dit positieve effect is echter veel kleiner dan het negatieve effect van overtollig water afvoeren.
- De aanleg van een DIT-stelsel is effectiever in het ophogen van het grondwaterpeil

in vergelijking met het toepassen van een verhoogd oppervlaktewaterpeil. Met een DIT-stelsel kan het water gelijkmatig worden gedistribueerd, terwijl de invloedssfeer van een verhoogd oppervlaktewaterpeil wordt beperkt door het oppervlak waarover het kan inzijgen.

Volgens het onderzoek “Grootschalig actief grondwater peilbeheer in bebouwd gebied” van Deltares (lit. 31) genereert actief grondwaterpeilbeheer een watervraag aan het oppervlaktewatersysteem in tijden van infiltratiebehoefte. Deze watervraag ligt in een droge zomerperiode veelal in de orde van grootte van 1 tot 1,5 mm per dag, maar kan in gebieden met een goed doorlatende, dikke ophooglaag hoger zijn. Voor de watervraag kan op basis van deze gegevens worden uitgegaan van ca. 1,1 mm per dag gedurende 100 dagen in een zeer droog jaar.

Praktijkervaring bij het Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden (HDSR) wijst uit dat door peilopzet de grondwaterstand wel degelijk verhoogd kan worden maar dat dit een proces is van 1-3 maanden en niet van dagen/weken. Dynamisch peilbeheer zonder onderwaterdrains is een onvoldoende effectief instrument om de grondwaterstanden te beïnvloeden of de bodemdaling te remmen.

EFFECT OP (GROND)WATEROVERLAST

Zolang de drainerende werking van het DIT-systeem blijft functioneren en het drainagepeil goed is ontworpen heeft deze maatregel geen effect op (grond)wateroverlast. Het overtollige water wordt afgevoerd via de drainagebuizen.

Het opzetten van een oppervlaktewaterpeil kan leiden tot instroom van oppervlaktewater in de riolering of een opstuwende werking hebben bij de lozingspunten. Dit heeft dan een significant negatief effect op de kans op wateroverlast.

SLEUTELFACTOREN

- De ligging van het DIT-stelsel en het infiltratie-oppervlak van de oever/berm bepalen in sterke mate de *invloedssfeer*.

AANBEVELING VOOR RICHTLIJNEN

Om het effect op de grondwaterstand te kunnen inschatten dient de verhouding tussen het wateroppervlak (natte omtrek) en het gebiedsoppervlak te worden gemodelleerd. Voor een meer nauwkeurige schatting van de invloedssfeer dient het DIT-stelsel te worden gemodelleerd en het oppervlaktewater inclusief bermen/oever met een bepaalde infiltratiecapaciteit. Verder dient de peilregeling/hoogte van een eventuele peilregelaar te worden opgenomen in het rekenmodel.

Door de oppervlaktewaterstand en de grondwaterstand gelijktijdig te monitoren wordt inzicht verkregen in de interactie tussen beide systemen.

Het is van belang om de DIT-stelsels regelmatig te reinigen en te inspecteren om de infiltratie- en drainagecapaciteit te waarborgen. In geval er een niveauregelaar in het drainagesysteem aanwezig is bepaalt deze de hoogte waarop het grondwaterniveau zich kan instellen. Deze hoogte moet bekend en betrouwbaar zijn. In praktijk komt het voor dat eventueel aanwezige peilregelaars scheef staan of afbreken als gevolg van onderhoud (of zelfs geheel ontbreken). Deze peilregelaars hebben eenzelfde essentiële functie als de overstorten in een riolerings-

model. Een afgebroken peilregelaar kan het grondwater onbedoeld tientallen centimeters naar beneden trekken.

CONCLUSIE

Het (beter kunnen) benutten van ondiep grondwater via o.a. een verhoogd oppervlakte-waterpeil en/of de aanleg van een DIT-stelsel scoort een 3 tot 5 op de maatlat “effect op stedelijke watervraag” (overbrugging middellange tot (zeer) lange droge perioden). De impact hangt af van de mate waarin het water de locatie met watervraag weet te bereiken en de maximum haalbare peilopzet.

De aanleg van een DIT-stelsel heeft een geringe tot significante impact op het beperken van de kans op grondwateroverlast of -onderlast vanwege de regulerende functie (score 4-5). Bij een te hoge peilopzet neemt de kans op (grond)wateroverlast toe, maar kan uiteraard wel een langere droge periode worden overbrugd.

De (oppervlakte)watervraag ligt in een droge zomerperiode veelal in de orde van grootte van 1 tot 1,5 mm per dag, maar kan in gebieden met een goed doorlatende, dikke ophooglaag hoger zijn. Aanbevolen wordt om de stedelijke watervraag die actief grondwaterpeilbeheer in perioden van droogte genereert, mee te nemen als standaardcomponent van regionale en landelijke waterbeheerstudies. Voor stedelijk waterbeheerstudies is het van belang om actuele hoogten van de peilregelaars in te meten.

Bronnen: onder andere nr. 11, 29, 30, 31, 33, 40 (zie Bijlage Literatuurlijst voor nummering en literatuurverwijzing)

3.4 MAATREGEL D BENUTTEN DIEP GRONDWATER

Aquifer storage & recovery (ASR) of ondergrondse waterberging (OWB) is het infiltreren van zoet water in ondergrondse watervoerende lagen in perioden van wateroverschot (winter of bij hevige neerslag). Het doel is tweeledig: (1) berging bij wateroverlast en (2) deze voorraad kunnen onttrekken in perioden van droogte (zomer) of tegen verzilting. Het opgeslagen water kan bijvoorbeeld worden benut voor het aanvullen van oppervlaktewater, irrigatie of gebruik in gebouwen. Bij diepinfiltratie wordt het water op grote diepte geïnfiltrated. Hiertoe wordt een verticale buis in de bodem geplaatst. Het geperforeerde deel van de buis, waar het water kan infiltreren, bevindt zich onder tenminste één waterafsluitende bodemlaag. Zo wordt het water niet in het eerste, maar in een onderliggend watervoerend pakket geïnfiltrated.

TOEPASSINGSGEBIED

De maatregel wordt hoofdzakelijk toegepast in laag Nederland (veen, rivier- en zeekele gebieden) en in stedelijk (industriële) gebied. Toepassing vindt plaats wanneer een gebied kampt met knelpunten in de zoetwaterbeschikbaarheid (o.a. bij verzilting, droogte, bodemdaling). Diepinfiltratie is een hemelwatervoorziening die zeer calamiteitgevoelig is. In geval van een calamiteit wordt het verontreinigde water door de voorziening rechtstreeks in het diepe grondwater geïnfiltrated. Een zuivering vóór een diepinfiltratieput is daarom onmisbaar. De hoge infiltratiecapaciteit van de put betekent dat in het water aanwezige vervuiling zich snel kan verspreiden, op een moeilijk te bereiken diepte. Er kan een pomp in de voorziening worden aangebracht die in geval van een calamiteit water uit de infiltratieput pompt, om zo verspreiding van de verontreiniging tegen te gaan.

EFFECT OP STEDELIJKE WATERVRAAG

Het injecteren van zoet water in diep grondwater betekent dat deze hoeveelheid niet wordt afgevoerd uit het systeem. De capaciteit van de pomp is bepalend. Uitgaande van bijvoorbeeld 25% extra afvoercapaciteit is ca. 50 m³/uur per hectare verhard oppervlak nodig om het te injecteren. Bij oppompen van de opgeslagen watervoorraad komt de hoeveelheid water beschikbaar voor een lokale toepassing. In principe is dit dezelfde hoeveelheid water die niet is afgevoerd, maar opgeslagen. De capaciteit van neerslagverwerking is op te voeren door o.a. injectie onder hogere druk, meer putten of infiltreren in een tweede watervoerend pakket.

EFFECT OP (GROND)WATEROVERLAST

Het injecteren van overtollig regenwater kan lokaal een significant positief effect hebben op het voorkomen van wateroverlast (extra afvoercapaciteit). De gemeente Holten-Rijssen heeft in het verleden een diepinfiltratiesysteem aangelegd om wateroverlast tegen te gaan. Ondiepe infiltratieputten vangen het regenwater van normale regenbuien op en bij stortbuien wordt het overtollige regenwater in de diepinfiltratieput opgevangen. Omdat diepinfiltratie vrijwel altijd gepaard gaat met enige negatieve beïnvloeding van het grondwater is dit niet toegestaan volgens de KRW/GWR. Diepinfiltratie van afvloeiend hemelwater is een uiterste middel, wanneer blijkt dat geen alternatieven voorhanden zijn.

SLEUTELFACTOREN

- Warmte-koude opslag (WKO) is een met OWB concurrerende toepassing in de ondergrond (*interferentie*)
- Het deel van het geïnjecteerde water dat kan worden teruggewonnen met acceptabele kwaliteit kan in brakke of zoute pakketten tegenvallen. De locatie en schaalgrootte zijn van invloed op het rendement.
- De inzet kan beperkt worden door de *dikte van het klei/veenpakket* voor opslag van water en de aanwezigheid van infrastructuur voor distributie van het teruggewonnen water naar de gebruikslocatie.

AANBEVELING VOOR RICHTLIJNEN

- Een ASR of OWB kan worden gemodelleerd als een reservoir met een pomp.
- Het te injecteren water dient te voldoen aan bepaalde kwaliteitseisen in verband met vergunningverlening.
- Bij toepassing van OWB is voorzuivering van het te infiltreren water essentieel om putverstopping te voorkomen en de grondwaterkwaliteit te beschermen.

Een infiltratieput vraagt weinig onderhoud tijdens de levensduur. Een infiltratieput is echter gevoelig voor verstopping, met name tijdens een hevige regenbui wanneer het water turbulent is. Het vuil op de bodem van de put woelt op en krijgt de kans om de infiltratiegaten te verstopen. Het hemelwater moet eerst gezuiverd zijn, om verstoppingen en verspreiding van verontreiniging (na een calamiteit) te voorkomen. Het is daarom aan te raden om bijvoorbeeld een infiltratiekoffer, bezinkbak of een blad/zandvanger toe te passen. Om een infiltratieput goed te laten functioneren is het belangrijk dat de voorziening minimaal éénmaal per jaar geïnspecteerd en gereinigd wordt.

De inspectie kan visueel worden gedaan als de deksel van de put wordt opengetrokken. Het eerste jaar na de aanleg van de voorziening moet de infiltratieput minimaal 1 à 2 keer geïnspecteerd worden. Vaak komt er een relatief grote hoeveelheid zand en slib in de voorziening terecht tijdens den vlak na de aanleg. Daarna bestaat het onderhoud uit het periodiek inspecteren en indien nodig reinigen van de put. Het schoonhouden van het filterdoek is specialistisch werk, maar doordat verstoppingen hiervan niet regelmatig voorkomen blijven de beheerkosten hiervan beperkt.

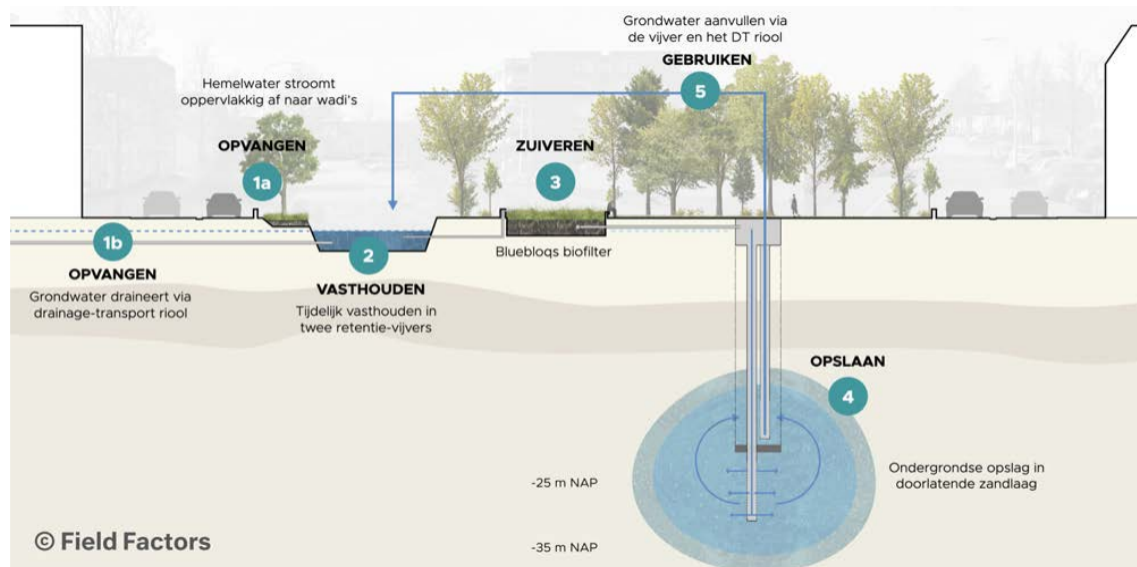
Voor het reinigen van de voorziening is een spuitlans en een zuigwagen nodig. Eens in de 5 jaar wordt geadviseerd een monster van de infiltrerende grond te nemen. Als de grond zodanig vervuild is dat de gestelde norm wordt overschreven, dan moet deze grond worden afgevoerd en aangevuld. Door de grote diepte is het van belang dat diepinfiltratieputten vaker geïnspecteerd worden en aanwezige zandvangen regelmatig geleegd worden. Zodra dit de infiltratiebuis ingaat, is het er vrijwel niet meer uit te halen.

PRAKTIJKTOEPASSING URBAN WATERBUFFER

De gemeente Pijnacker realiseert in de wijk Klapwijk drie Urban Waterbuffers. De Urban Waterbuffer Klapwijk-Wijkpark slaat overtollig oppervlakkig afstromend hemelwater en gedraineerd grondwater lokaal op om in droge perioden het grondwater mee aan te vullen. De werking is hieronder in vijf stappen weergegeven, zie afbeelding:

1. Overtollig hemelwater wordt opgevangen en stroomt niet naar het riool of het oppervlakte-water.
 - a. Hemelwater op verhard oppervlak stroomt oppervlakkig af naar wadi's in het wijkpark.
 - b. Overtollig grondwater draineert via drainage-transport riool naar de vijvers.
2. Het water uit de wadi's en het DT-riool wordt tijdelijk vastgehouden in twee retentievijvers in het park;
3. Zuivering vindt plaats in de vijver en in het biofilter;
4. Het gezuiverde water wordt middels een infiltratiebron opgeslagen in een aquifer (goed doorlatende zandlaag) op 15-35 meter diepte;
5. Opgeslagen water wordt onttrokken uit gecreëerde "waterbel" in de aquifer en wordt gebruikt om het grondwater aan te vullen via de vijver en het DT riool.

AFBEELDING 8 GEMIDDELDE WATERVRAAG EN AANBOD IN GREENPORTS OOSTLAND EN WESTLAND. BRON: KENNIS VOOR KLIMAAT (2014)



Toestemming van de gemeente om deze afbeelding te gebruiken (e-mail 14-9-2022)

Ondergrondse opslag en terugwinning van water is een vergunningsplichtige activiteit binnen het beheersgebied van de betreffende waterbeheerder. Het uitgangspunt van deze vergunning is om het bestaande grondwater te beschermen en nadelige effecten voor de omgeving te voorkomen. Hiertoe wordt getoetst dat de waterkwaliteit van het te infiltreren water beter is dan van het huidige grondwater en dat de kwantiteit/snelheid van de nieuwe infiltratie- en onttrekkingsvoorziening geen nadelige impact heeft op het watersysteem en overige voorzieningen in de omgeving. Voor het verkrijgen van de vergunning dient een beheerplan te worden opgesteld, het water te worden gefilterd en gemonitord gedurende een periode van enkele maanden. Als de waarden gedurende de monitoringsperiode voldoen aan de normeringen, mag het water geïnfilteerd worden.

CONCLUSIE

Het benutten van diep grondwater via o.a. Aquifer storage & recovery (ASR) of ondergrondse waterberging (OWB) scoort een 3 tot 4 (overbrugging middellange tot lange droge perioden) op de maatlat “effect op stedelijke watervraag” (tabel 1). Het mogelijke effect van hangt af van de verhouding tussen de te behalen capaciteit, de benodigde voorzuiveringstechnieken en beïnvloeding van of door de omgeving. Diepinfiltratie kan een geringe tot significante impact hebben op het beperken van de kans op wateroverlast. Het scoort een 1 tot 2 voor wat betreft de kwaliteit van het grondwater vanwege mogelijke afspoeling van straatvuil, maar bovenal de kans op calamiteiten. Voor de modellering is het van belang om rekening te houden met het optredend effect van vervuiling/verstopping.

Vanwege regelgeving zal diepinfiltratie vermoedelijk beperkt blijven tot kleine lokale toepassingen, waardoor modellering van weinig toegevoegde waarde is voor de regionaal waterbeheerder. Met het oog op het beperken van de kans op wateroverlast kan modellering van het systeem mogelijk wel wenselijk zijn voor de stedelijk waterbeheerder.

Bronnen: onder andere nr. 2, 41, 42, 47, 48 (zie Bijlage Literatuurlijst voor nummering en literatuurverwijzing)

3.5 MAATREGEL E AANVOEREN VAN WATER

Aanvoeren van water is een maatregel die zorgt voor doorspoeling om onder andere de waterkwaliteit te verbeteren. Bijvoorbeeld bij stilstaande wateren waarvan de waterkwaliteit is verslechterd als gevolg van toenemende watertemperaturen. Door water in te laten wordt water in de watergangen verdund tot de gewenste waterkwaliteit. De maatregel kan ook toegepast worden om het waterpeil en de grondwaterstanden te reguleren (zie reguleren ondiep grondwater). Water kan vanuit het oppervlaktewater worden ingelaten. Eventueel is de hemelwaterriolering te benutten als distributienetwerk (omgekeerde werking) om het water het gebied in te krijgen.

TOEPASSINGSGBIED

De maatregel is met name van toepassing in gebieden waar van nature geen of een slechte doorstroming is of bij (bijna) droogvallende watergangen.

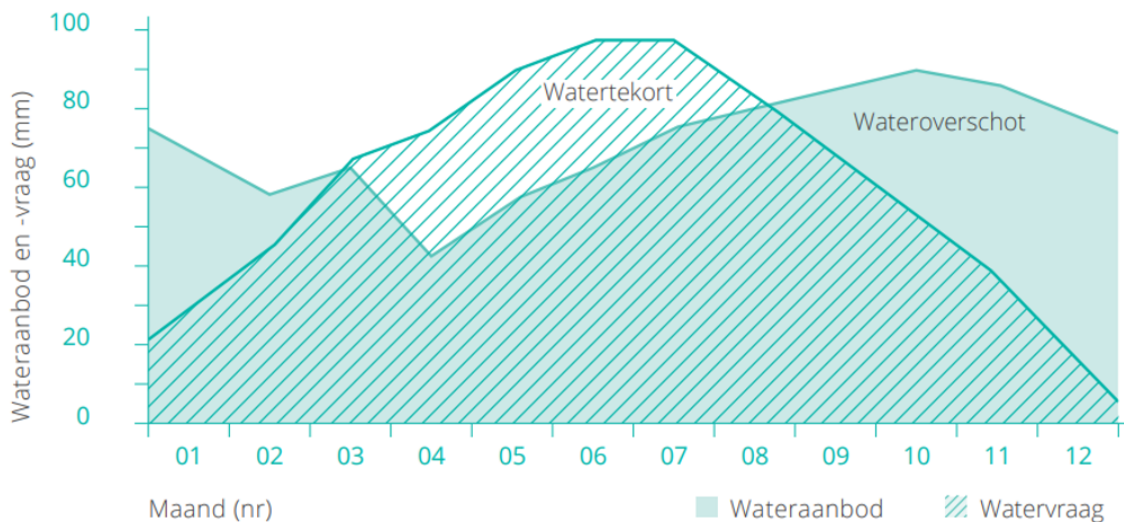
EFFECT OP STEDELIJKE WATERVRAAG

De hoeveelheid water die nodig is hangt samen met de afvoer van de betreffende watergang en omstandigheden als neerslag en verdamping, de vuilconcentratie, wegzijging en kwel. Bij een kortdurende inzet heeft het geen structureel effect op de oppervlaktewater-of grondwaterstand. Als continue water wordt ingelaten en wordt gecirculeerd kan een significant deel wegzijgen en kan het structureel bijdragen aan het in stand houden van een minimaal

gewenste grondwaterstand. De aanwezige landschapstypologie met haar bodem- en geohydrologische kenmerken zijn hierin in sterke mate bepalend.

Ons land kent een neerslagoverschot van 150 tot 325 mm per jaar. Dit manifesteert zich vooral in de wintermaanden. Gedurende de zomerperiode kan het watertekort in Laag-Nederland oplopen tot ca. 150 mm. Een dicht net van ontwaterings- en afwateringsmiddelen zorgt voor een snelle afvoer van dit overschot naar zee. Dat water zijn we kwijt. Hebben we vervolgens te maken met droge perioden, dan vallen we terug op gebiedsvreemd zoetwater dat vanuit de rivieren wordt aangevoerd, aan het grondwater wordt onttrokken of het effluent afkomstig van RWZI's. Grondwater in Laag-Nederland is op veel plaatsen brak tot zout en dus minder goed bruikbaar. Het overgrote deel van de neerslag verdwijnt nog via de riolering of het oppervlaktewater, waardoor er slechts zo'n 5 – 10% overblijft voor grondwateraanvulling. Een grotere grondwateraanvulling is alleen weggelegd voor hoger gelegen gebieden.

AFBEELDING 9 GEMIDDELDE WATERVRAAG EN AANBOD IN GREENPORTS OOSTLAND EN WESTLAND. BRON: KENNIS VOOR KLIMAAT (2014)



Nederland kent nog nauwelijks voorzieningen om zoetwater voor een langere periode vast te houden totdat een watervraag optreedt. De aanleg van grote spaarbekkens op het land met dit doel is kostbaar en betekent een inefficiënt gebruik van schaarse ruimte. Ook zijn er nog weinig bovengrondse voorzieningen om langdurig water op te slaan. Geschikte plekken voor opslag van zoetwateroverschotten beperken zich tot enkele bekkens van het hoofdwatersysteem (zoals het IJsselmeer) en bijvoorbeeld bassins in de tuinbouw. Een Nederlandse zoetwaterbron die middels infiltratie ontstaat en bruikbaar is, betreft de omvangrijke zoetwaterbel in onze duinen. Zelfvoorziening via ondergrondse waterberging is het hele jaar door mogelijk, zo laten recente (kleinschalige) projecten in de land- en tuinbouwsector langs onze kust zien. In natte tijden slaan gebruikers zoetwateroverschotten in ondergrondse zandlagen op, waarna ze dit bij droge perioden terugwinnen om te gebruiken. Onder de juiste condities blijkt dit concept op kleine schaal te realiseren, is het beheersbaar en tevens economisch rendabel.

De STOWA-Deltafactsheet “Effectiviteit van waterinlaat” (lit. 49) gaat in op waterinlaat voor de landbouw, met name voor beregening en voor doorspoeling met het oog op vermindering van de chlorideconcentraties in het oppervlaktewater dat voor beregening wordt gebruikt. Hoewel gericht op het landelijk gebied zijn hier bepaalde inzichten ook voor het stedelijk gebied van toepassing. Zo is de gewenste waterkwaliteit per deelgebied afhankelijk van de in het gebied voorkomende teelten. In principe is het meest zoutgevoelige gewas maatgevend.

Binnen stedelijk gebied zal de gebruiksfunctie maatgevend kunnen zijn, bijvoorbeeld recreatie op- en langs de waterkant. Complicerende factoren voor de effectiviteit van doorspoelen zijn dat doelen van doorspoelen regelmatig niet zijn vastgelegd en inlaatdebieten doorgaans niet bekend zijn doordat deze onbemeten blijven.

Van doorspoelen is sprake wanneer het water in de watergangen significant wordt verdund met het ingelaten water. Het proces van doorspoelen is het meest efficiënt bij een rechte waterloop zonder vertakkingen, met een inlaat aan de ene zijde en een uitlaat aan de andere en een uniform verhang in de richting van de uitlaat. Dit wijkt sterk af van de situatie in stedelijk gebied met vele vertakkingen en doodlopende sloten. Metingen met gadolinium als tracer laten zien dat inlaatwater minder ver doordringt in de kleinste waterlopen dan eerder werd aangenomen. Het inlaatwater beperkt zich tot de kortste route tussen inlaat en gemaal.

In het onderzoek “Biologische gevolgen van vergroting van waterinlaat in de provincie Drenthe (RVN, Torenbeek, verdonschot, Higler, 1987) wordt geconcludeerd dat waterinlaat ecologisch nadelige gevolgen heeft. De macrofaunalevensgemeenschap in beken met soorten die gebonden zijn aan stromend en helder water verdwijnt door waterinlaat. In stilstaande, ondiepe wateren (sloten en wijken) treedt door waterinlaat een verschuiving op in de beïnvloedingsreeks naar de meer verontreinigde stadia. De situatie in droge jaren is in het algemeen slechter dan in andere jaren. Het nadelige effect van waterinlaat wordt niet in de eerste plaats veroorzaakt door de relatief slechte kwaliteit van het ingelaten IJsselmeerwater zelf, maar door de verspreiding van interne bronnen.

In een studie naar de wateraanvoer en waterkwaliteit van waterschap Aa en Maas is aangetoond dat er juist weinig negatieve effecten zijn op de waterkwaliteit door het inlaten van water. Sterker nog, de voordelen van water inlaten zijn groter, dan de negatieve effecten. Er zijn geen dwingende redenen gevonden in deze studie om de inlaat te stoppen of de inlaat te verminderen.

Wateraanvoer met tankwagens

In een onderzoek naar droogte en waterschaarste in Antwerpen (lit. 29) wordt uitgegaan van een watergift voor nieuw aangeplante bomen van ongeveer 80 liter per boom per week gedurende de eerste twee seizoenen en een benodigde watergift bij waterschaarste van 7.000 liter per boom per maand voor bomen met een kruindiameter van ca. 10 meter. Voor besproeiing is uitgegaan van 100 mm/maand.

De gemeente Wijdmeren geeft bomen en 1 tot 2x per week water, afhankelijk van de bodem. Zeker in zandige ondergrond zakt het water zodanig snel weg dat een dubbele watergift effectiever is. De watergift bedraagt orde grootte 100 liter per boom per beurt (100-200 liter per week).

Gemeente Rijswijk heeft bodemvochtsensoren geplaatst om de watergift te optimaliseren.

EFFECT OP WATERKWALITEIT

De lozing van overtollig regenwater op oppervlaktewater is niet per definitie slecht voor de waterkwaliteit. Zo toonde praktijkonderzoek in o.a. Purmerend aan dat het zuurstofgehalte van het ontvangende oppervlaktewater toenam als gevolg van de lozing van zuurstofrijk regenwater. Dit kan echter een kortetermijneffect zijn. Het geloosde water kan immers ook

verontreinigde stoffen bevatten die door afbraakprocessen leiden tot een (extra) zuurstofvraag.

EFFECT OP (GROND)WATEROVERLAST

Zolang de waterstand door de aanvoer niet uitstijgt boven de gangbare waarden, is er geen effect op (grond)wateroverlast te verwachten.

SLEUTELFACTOREN

- De hoeveelheid in te laten water heeft een relatie met een *kritische belastinggrens* van het ontvangende watersysteem. De belasting waarbij het systeem bijvoorbeeld omslaat van een heldere naar een troebele toestand of omgekeerd, of de drempelwaarde voor het chloride-gehalte.
- Bij langdurige droogte kan de *verblijftijd* van het oppervlaktewater ongewenst hoog worden met waterkwaliteitsproblemen tot gevolg.
- Vanwege de verdringingsreeks is het inlaten van water geen structurele oplossing. Het benodigde inlaatwater is er niet of wordt mogelijk elders ingezet.

AANBEVELING VOOR RICHTLIJNEN

Ervan uitgaande dat de waterlopen in een rekenmodel worden opgenomen, dienen ook de lozingspunten van de riolering te worden opgenomen. Deze vormen immers een (tijdelijke) bron van wateraanvoer. Het lijkt logisch om naast oppervlaktewaterverdamping in een model ook te werken met een schatting voor wegzijging en kwelstromen. Geïnfiltreerd regenwater kan bijvoorbeeld wegzijgen naar de rivier bij lage waterstanden, dat water kan dan niet meer bijdragen aan een eventuele lokale waterbehoefte. Wanneer bekend is wat (1) een gemiddelde vuilconcentratie voor het aan te voeren oppervlaktewater is en (2) wat de achtergrondconcentratie van het te doorspoelen systeem is, kan de tijdsduur worden ingeschat waarbij een maximumwaarde dreigt te worden overschreden. Of er kan worden gerekend met tracers, zoals bijvoorbeeld gadolinium.

De waterkwaliteit is de trigger om al dan niet water aan te voeren. Hiervoor kan het bestaande waterkwaliteitsmeetnet worden gebruikt en/of gebruik worden gemaakt van meldingen. Bij verdergaande automatisering van de aanvoer valt te denken aan een waterstandsmeting of een chloride-meting. Bij over- of onderschrijding van een grenswaarde wordt dan oppervlaktewater aangevoerd met een bepaalde tijdsduur.

Voor een goed doorspoelend systeem is het van belang dat de duikers goed doorstromen. Overhangende planten of vuil dienen periodiek te worden verwijderd. Het effect van doorspoelen is groter naarmate het systeem minder vertakt is.

Het inzetten van gezuiverd restwater van industrieën en rwzi's voor droogtebestrijding is in Nederland een nog weinig toegepaste, maar opkomende vorm van (klimaat)adaptatie om te anticiperen op toenemende watertekorten in de landbouw. De kwaliteit van in te zetten restwater is een uitermate belangrijk aandachtspunt voor het ecosysteem, het ontvangende grondwatercompartiment en het doel waarvoor het wordt ingezet (bruikbaarheid) (lit. 43).

CONCLUSIE

Het via het watersysteem aanvoeren van water scoort een 3 tot 4 (overbrugging middellange tot lange droge perioden) op de maatlat “effect op stedelijke watervraag” (tabel 1). De impact van “gebiedsvreemd” water op de waterkwaliteit in relatie tot de gebruiksfunctie zal echter van doorslaggevend belang zijn. Het aanvoeren van water heeft gering tot geen effect op het beperken van de kans op (grond)wateroverlast (score 2-3).

De balans tussen de stedelijke watervraag en het aanbod van “gebiedsvreemd” water kan niet louter kwantitatief worden beschouwd, de waterkwaliteit speelt een grote rol. Ook speelt de vertaktheid van het systeem een rol in relatie tot het effect. Dit pleit ervoor om het gehele oppervlaktewatersysteem zowel kwantitatief als kwalitatief schematisch door te rekenen. Een louter kwantitatieve benadering zou leiden tot een (sterke) overschatting van de watervraag, het is immers vanuit waterkwaliteitsoogpunt niet overal toepasbaar.

Bronnen: onder andere nr. 6, 9, 11, 13, 17, 49 (zie Bijlage Literatuurlijst voor nummering en literatuurverwijzing)

4

WATERBALANS

Dit hoofdstuk bevat een aantal beknopte samenvattingen van recente wetenschappelijke onderzoeken waarin verdampingsparameters van groen en/of verhard oppervlak een rol spelen en die van betekenis kunnen zijn op de waterbalans.

4.1 BEGRIPPEN

De waterbalans kan als volgt worden voorgesteld (Roestel, Transpiratie en interceptie van bos, 1984):

Bruto neerslag + toevoer vanuit andere gebieden = evapotranspiratie + interceptie + drainage/afvoer van water + verandering van de waterinhoud over de beschouwde tijdsperiode.

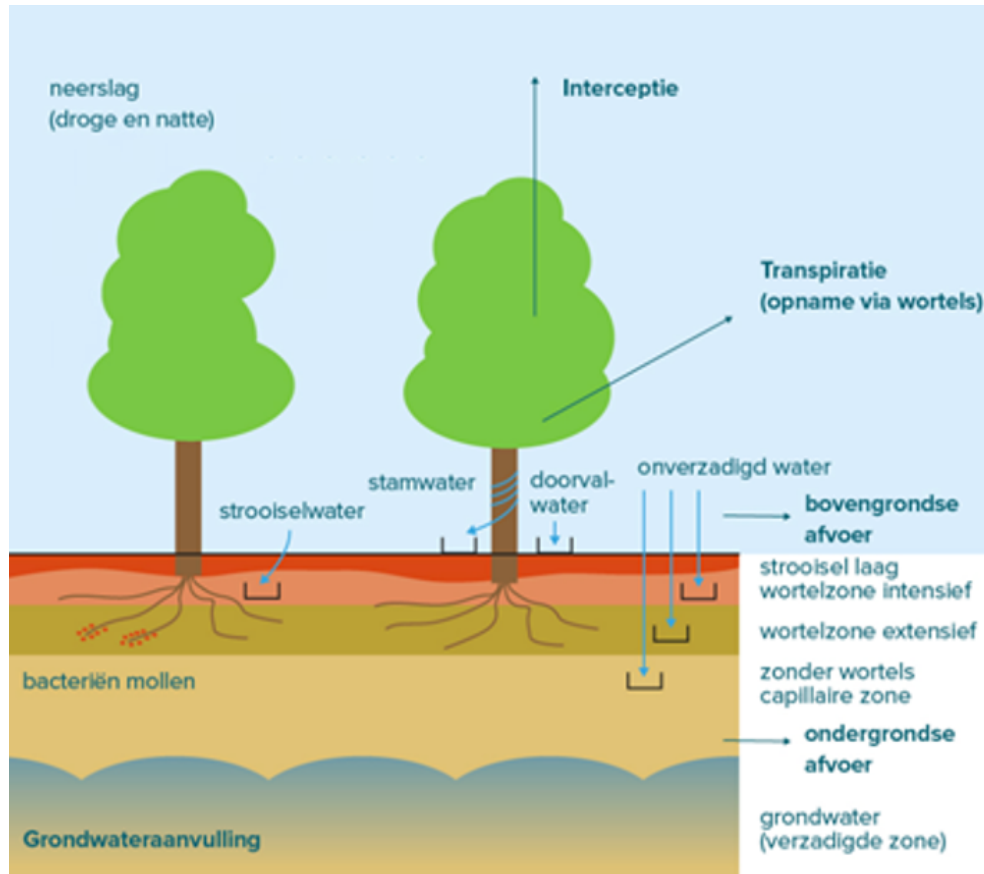
Evapotranspiratie = transpiratie van de bomen zelf, de transpiratie van de kruidlaag en de evaporatie van de bodem.

Interceptie = neerslag die verdampt vanaf de natte delen en dus de bodem niet bereikt. Het interceptieverlies bij bomen(groepen) is veel groter dan bij kortere vegetaties. De variatie in interceptie bepaalt in belangrijke mate de hoeveelheid water die de bodem bereikt.

De onverzadigde zone is het gedeelte van de bodem boven de grondwaterspiegel. Deze zone bevat zowel water als lucht en is van belang voor de plantengroei. De onverzadigde zone fungeert als een reservoir dat wordt aangevuld door infiltratie en door capillaire opstijging van water uit de verzadigde zone.

De verzadigde zone is het deel van de grond onder het grondwaterpeil. De poriën zijn hier volledig verzadigd en er zit geen lucht meer in de grond.

AFBEELDING 10 INTERCEPTIE, VERDAMPING EN OPPERVLAKKIGE AFVOER (BRON: STICHTING RIONED)



4.2 VERDAMPING

Evapotranspiratie is in de waterkringloop de som van evaporatie (het verdampen van water op het oppervlak en uit de bodem) en transpiratie (de verdamping van water uit de vegetatie). Evapotranspiratie is daarmee de totale flux water richting de atmosfeer. Voor de modellering is het van belang om rekening te houden met interceptie, deze hoeveelheid water bereikt immers niet de ondergrond en vult dus het bodemvocht niet aan.

De grondwateraanvulling in Nederland varieert ruimtelijk sterk, onder invloed van bodem en landgebruik. Gemiddeld valt in Nederland ongeveer 900 mm neerslag per jaar. Hiervan verdampt het grootste deel (70%) en stroomt een klein deel (5%) via oppervlakkige afstroming af. Naast de vegetatie zelf kan een strooisellaag (dode bladeren en andere plantendelen op de bodem) neerslag opvangen. Deze interceptie in de strooisellaag wordt enigszins onderschat en kan tot 15% van de brutoneerslag doen verdampen. Slechts een beperkt deel (30%) van de neerslag infiltreert dus en kan zo vertraagd via de extensieve wortelzone en de capillaire zone de bovenste watervoerende lagen aanvullen.

In Nederland is de aanvulling gemiddeld 250 mm per jaar. Maar door de soorten vegetatie, bodems, grondwaterstanden en ontwateringssituatie zijn er lokaal wel grote verschillen. In tegenstelling tot wat vaak wordt gedacht, kan hemelwater goed door klinker- en tegelverhardingen infiltreren. Bovendien kan het eenmaal geïnfiltreerde water minder makkelijk terug verdampen dan bij onverharde of begroeide oppervlakken. In een waterbalansstudie voor een naoorlogse wijk in Lelystad (onderzoek Toekomst van de Nederlandse grondwater-

voorraad in relatie tot klimaatverandering, TNO, 2008) is de grondwateraanvulling geschat op circa 300 mm per jaar. Volgens diezelfde waterbalansberekeningen is de grondwateraanvulling in dicht stedelijk gebied circa 150 tot 200 mm per jaar.

Bron: Stichting RIONED, kennisbank riolering en stedelijk water, module stedelijke hydrologie.

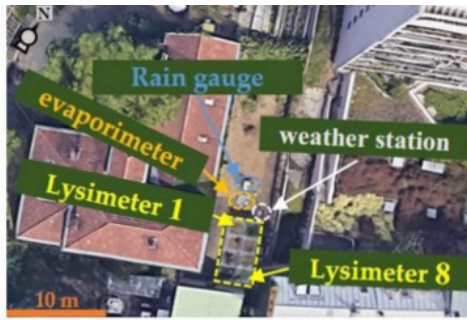
Verdamping onverhard oppervlak

Alterra heeft in 2005 een onderzoek uitgevoerd naar de 'ware' neerslag en verdamping (Alterra rapport 1158). Voor verschillende locaties met een bepaalde bostypologie is o.a. de verdamping (evapotranspiratie) bepaald. Een literatuuronderzoek naar gemeten verdamping heeft de volgende typische waarden voor de veeljarig gemiddelde verdamping opgeleverd:

- kale grond, duinzand 200 mm
- kale grond, overig 300 mm
- natuurlijke duinvegetatie 480 mm
- loofbos 520 mm
- naaldbos 680 mm
- gras 535 mm

Het totale waterverbruik van populier en lariks is vrijwel gelijk (ca. 650 mm per jaar) en hoger dan dat van de grove den (ca. 550 mm per jaar). De populieren hebben een hogere transpiratie dan lariks. Bij interceptie geldt het omgekeerde, waardoor het totale waterverbruik gelijk is. Grove dennen hebben zowel het laagste transpiratie- als interceptieverlies. De transpiratie van Populieren, Lariks bomen en Grove dennen is voor het groeiseizoen geschat op respectievelijk 420 mm, 380 mm en 280 mm. Tijdens de winter treedt er op alle locaties een substantiële verdamping op. In de eerste drie maanden van 1995 loopt dit op tot zo'n 100 mm. 50 procent hiervan is vermoedelijk interceptieverdamping; de rest waarschijnlijk afkomstig uit bodem en strooisel. In de winter heeft de populierenopstand de geringste interceptieverdamping, echter altijd nog zo'n 17% van de bruto neerslag. Dit verloop is consistent met de bepaling van de verzadigingswaarde en ruwheid. *Het verloop in verdamping is consistent met metingen van bodemvocht en de grondwaterstandsdiepte.*

In een praktijkonderzoek in Parijs [lit. 62] is de evapotranspiratie (ET) voor de periode juni-augustus geschat op 60-90% van de neerslag. In dit onderzoek is gebruik gemaakt van 8 vegetietypen. De ET is gemeten met gebruikmaking van lysimeters. De bandbreedte in ET bedroeg gemiddeld 2,5 mm/dag (vegetaties zonder interne wateropslagtank) tot 4 mm/dag (vegetaties met interne wateropslag). Deze waarden lagen in hetzelfde bereik als die geschat door andere onderzoekers [lit. 63]. Struiken bleken gemiddeld 6% meer te verdampen dan kruidachtigen. Struiken in de schaduw bleken 15% minder te verdampen.



(a)



(b)

<p>Lysimeter 2</p> <p>cotoneaster sylvatica</p> <p>IWS of 20 cm</p>	<p>Lysimeter 4</p> <p>carex sylvatica + deschampsia cespitosa</p> <p>Without IWS</p>	<p>Lysimeter 6</p> <p>carex sylvatica + deschampsia cespitosa</p> <p>IWS of 20 cm</p>	<p>Lysimeter 8</p> <p>regularly removed (twice a year)</p> <p>IWS of 20 cm</p>
<p>Lysimeter 1</p> <p>carex sylvatica + deschampsia cespitosa</p> <p>IWS of 20 cm</p>	<p>Lysimeter 3</p> <p>carex sylvatica + deschampsia cespitosa</p> <p>Without IWS</p>	<p>Lysimeter 5</p> <p>spontaneous flora</p> <p>IWS of 20 cm</p>	<p>Lysimeter 7</p> <p>cotoneaster sylvatica</p> <p>AIWS of 20 cm</p>

In een Amerikaans onderzoek [lit.64] is geconstateerd dat naarmate de verdamping hoger is, ook het effect van vegetatie significant hoger is. De ET van grasland bedroeg gemiddeld 7-9 mm/dag in de periode juli-augustus. De ET van kale grond was lager (3-4 mm/dag). De ET van struiken was relatief constant rond 6 mm/dag, terwijl deze in het onderzoek in Parijs juist bleek af te nemen met een afname van het bodemvocht.

Hess et al. [lit. 63] schatten gemiddelde ET's van respectievelijk 2,9 en 2,7 mm/d voor vrij drainerend zandleem en zandgrond (gegevens over drie jaar). In termen van waterbalans was de ET voor zandleem goed voor 47% en voor zandgrond 43% van de waterbalans. De verschillen tonen aan dat fijnere bodems gunstiger zijn voor ET omdat ze veel meer water vasthouden dan grof getextureerde bodems. Zij concluderen echter ook dat de vegetatie door zijn ontwikkeling de hydraulische eigenschappen van de bodem kan beïnvloeden en hiermee dus de ET kan beïnvloeden.

De combinatie van wateropslag, vegetatietype, bodemtype en schaduw bepalen in belangrijke mate de ET.

Verdamping verhard oppervlak

Over de verdamping van verhard oppervlak is nog maar weinig bekend. F. van de Ven en B. Voortman hebben in 1985 (lit. 54) de resultaten van een uitgebreid onderzoek naar de waterbalans in stedelijk gebied (Lelystad) gepubliceerd. In twee meetgebieden, een woonwijk en een parkeerplaats, zijn vanaf het eind van de jaren zestig continu metingen verricht aan het waterafvoerproces. De parkeerplaats is in 1972 aangepast waardoor het meetgebied is verkleind. Karakteristieken:

- Woonwijk: Daken 13%, asfalt 17%, tegels/klinkers 23%, gras 24%, bomen en struiken 18%, tuin-diversen 5%.
- Parkeerplaats: asfalt 36-42%, klinkers/keien 36-29%, tegels 20-22%, gras en plantgaten 8-7%.

Samenvattend wordt in dit onderzoek geconcludeerd dat aan de hand van de meetreeksen (12 jaar) van de twee meetgebieden ca. 50-55% van de neerslag op het verharde gebied tot afstroom komt. De gemiddelde jaarlijkse verdamping vanaf de verharde terreingedeelten bedroeg 12-20% van de neerslag (de bepalingsmethode is echter onnauwkeurig volgens de onderzoekers).

Ongerekend ten opzichte van de huidige jaarlijkse neerslag van 900 mm per jaar zou de verdamping dan ca. 100-200 mm per jaar bedragen. De verschillen tussen de woonwijk en de parkeerplaats lopen uiteen van 1 mm per maand in de winter tot ruim 4 mm/maand in de periode juni-juli.

30-40% van de neerslag op de verharding infiltreert door de open verharding in de ondergrond. Van de neerslag op het onverharde, begroeide terrein verdampt ca. 65% en percoleert ca. 35%. De natuurlijke grondwateraanvulling onder onverharde en verharde, deels doorlatende oppervlakken is derhalve van dezelfde orde van grootte.

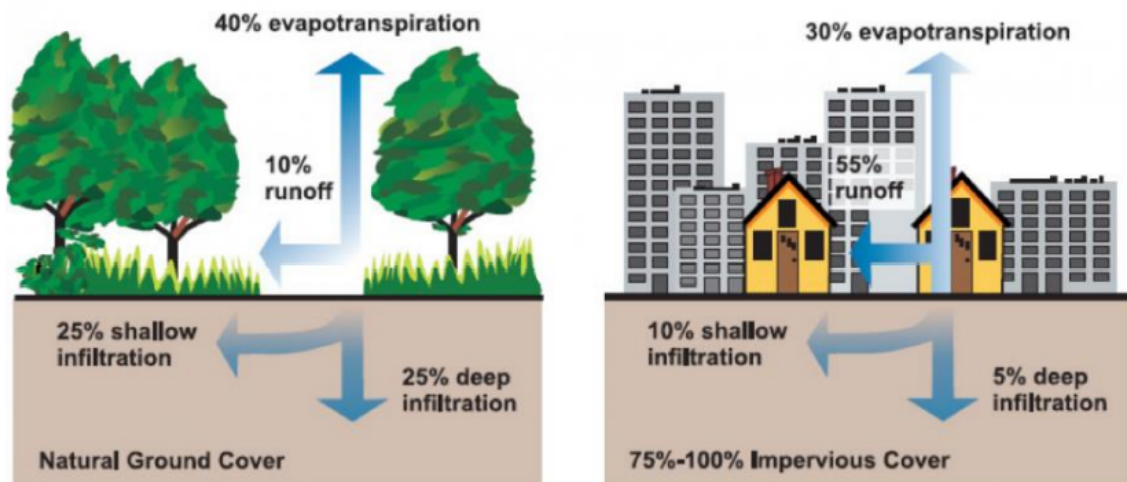
TABEL 2 RESULTATEN PRAKTIJKONDERZOEK LELYSTAD

	onverhard	open verhard	verhard
Gemiddelde jaarlijkse verdamping (evapotranspiratie)	ca. 65% (600 mm)		12-20% (100-200 mm)
Gemiddelde jaarlijkse percolatie/infiltratie	ca. 35% (300 mm)	30-40% (270-360mm)	
	woonwijk	parkeerplaats	
verdamping solitaire bomen	3%	3%	
verdamping onverhard oppervlak	27%	-	
verdamping verhard oppervlak	8%	13%	
Gemiddelde afvoer regenwaterriool	20%	45%	
Gemiddelde afvoer drainage	40%	40%	

Bronnen: lit. 54 (zie Bijlage Literatuurlijst voor nummering en literatuurverwijzing)

In een EPA-studie van 2003 is de stedelijke waterbalans vergeleken met natuurlijk gebied. Dat geeft onderstaand beeld van het verschil in verhouding van de waterstromen. De lokale kenmerken van een gebied zullen in meer of mindere mate de balans bepalen.

AFBEELDING 12 VERSCHIL IN EVAPOTRANSPIRATIE STEDELIJK EN NATUURLIJK GEBIED



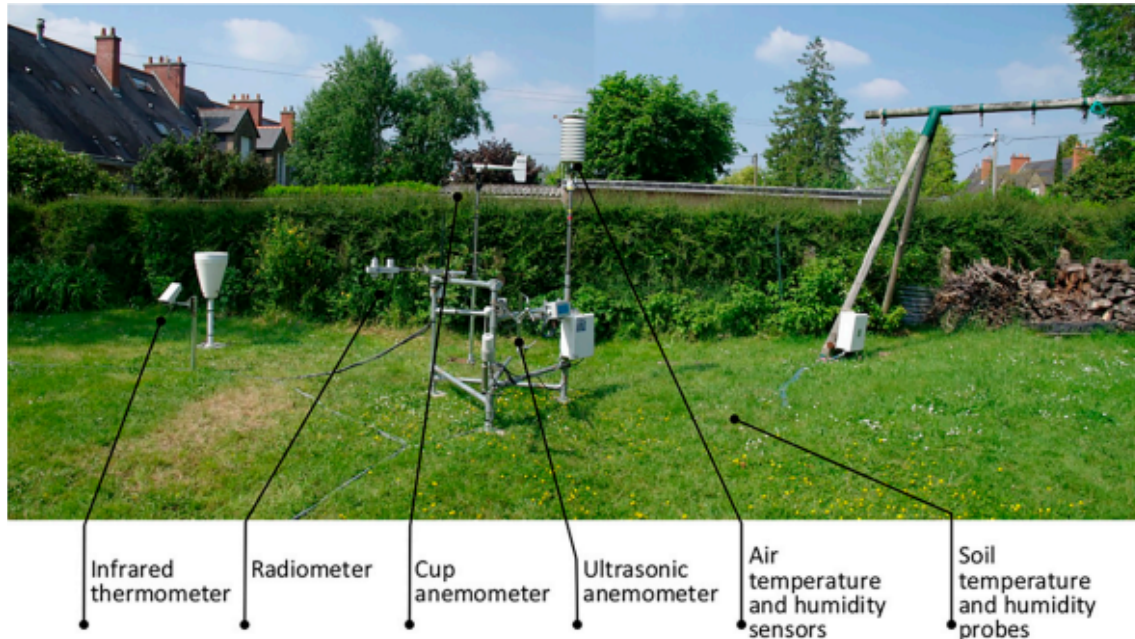
4.3 RUWHEIDSLENGTE

Aude Lemonsu et al hebben het ISBA-DF-model voor bodem-vegetatie-atmosfeer toegepast op een gazon in een woonwijk om de vochthuishouding en temperatuur in een stedelijke omgeving te simuleren. De invloed van de ruwheid van het oppervlak/de vegetatie en bodemkarakteristieken van de woonwijk zijn bestudeerd met behulp van observaties en modelbenaderingen (combinatie ISBA-DF met TEB). De bodem is beschreven als een homogene textuur van zand, klei en slib. In deze casestudy is een systematische overschatting van de bodemtemperatuur aan de oppervlakte geconstateerd. Ook het berekende bodemvochtgehalte week af van de praktijkmetingen. Er is aangetoond dat de aerodynamische ruwheidslengte een belangrijke parameter is in de verdampingsflux. De **aerodynamische ruwheidslengte zou derhalve moeten worden aangepast aan de complexe omgeving** in plaats van het hanteren van een gemiddelde waarde voor grote vlakken.

AFBEELDING 13 WIJKKARAKTERISTIEK ONDERZOEKSGBIED (GEEN COPYRIGHT)



AFBEELDING 14 MEETOPSTELLING IN EEN PRIVÉTUIN (GEEN COPYRIGHT)

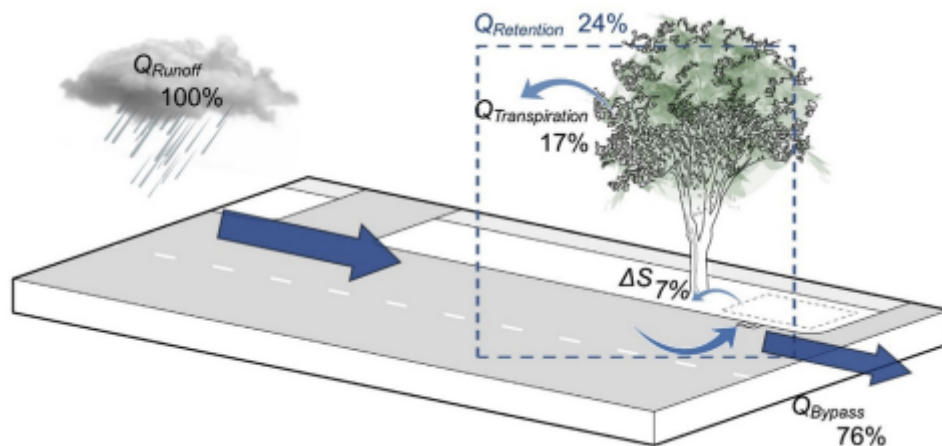


Bron: Lit. 55 (zie Bijlage Literatuurlijst voor nummering en literatuurverwijzing)

4.4 INFILTRATIESLEUVEN

Over het algemeen wordt aangenomen dat evapotranspiratie een ondergeschikte rol speelt in de waterbalans van regenwater beheersingsmaatregelen. Grote gevestigde stedelijke bomen kunnen echter grote hoeveelheden water gebruiken. Jasmine K. Thom et al installeerden infiltratiesleuven naast een in Australië voorkomende boomsoort (*Lophostemon confertus*) in de begroeide berm van een typische voorstedelijke straat. Ze onderzochten of het omleiden van regenwater naar de bomen de transpiratie zou kunnen verhogen en wat de bijdrage was aan de waterbalans. In het onderzoek van bleek de maatregel de verdamping van bomen niet te verhogen. De bomen gebruikten wel grote hoeveelheden water (tot ca. 100 liter per dag, ofwel 3-4 mm/dag per kruinprojectie). Jaarlijks werd ca. 25% aan regenwater vastgehouden. De verdamping was gelijk aan 17% van de afvoer. Gevestigde straatbomen kunnen op basis van dit onderzoek dus als regenwaterbeheersingsmaatregel worden beschouwd (integreren van bomen met maatregelen voor regenwaterbeheersing).

AFBEELDING 15 EFFECT INFILTRATIEZONE EN GEVESTIGDE BOOM OP RUN-OFF



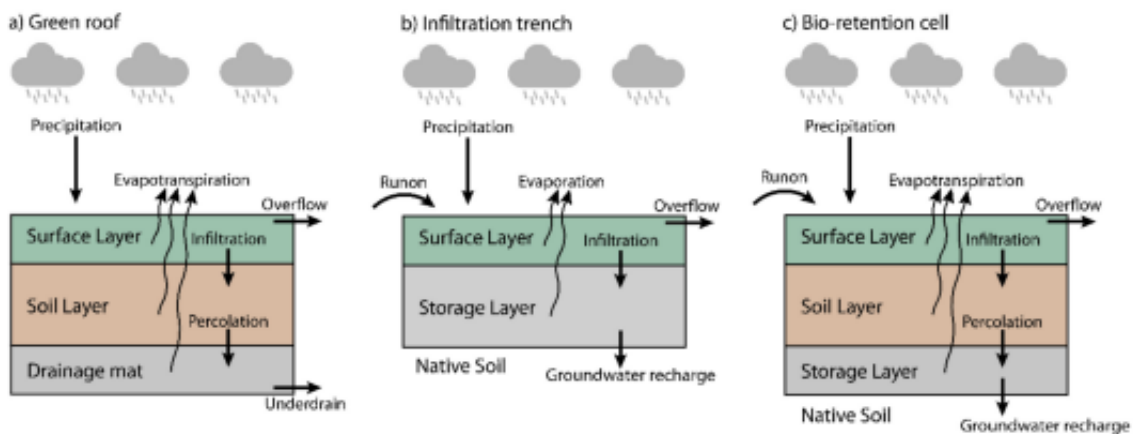
Bron: Lit. 56 (zie Bijlage Literatuurlijst voor nummering en literatuurverwijzing)

4.5 WATEROPSLAGCAPACITEIT

Het bepalen van de opslagcapaciteit van steden voor hemelwater is een uitdaging vanwege de heterogeniteit van het stedelijk oppervlak. Traditioneel wordt de effectieve opslag geschat vanuit afvloeiing van regenwater. De onderzoekers presenteren in dit artikel een nieuwe benadering om de effectieve wateropslagcapaciteit te schatten aan de hand van het tempo waarin de verdamping afneemt tijdens neerslagvrije perioden. Ze testten deze aanpak voor steden op buurtniveau van veertien locaties met verschillende lokale klimaatzones, vegetatiebedekking en -kenmerken en klimaten. Op basis van een analyse van 583 droge perioden vonden ze voor steden een *opslagcapaciteit voor hemelwater tussen 1-28 mm, wat overeenkomt met 2-20 dagen. De stedelijke opslagcapaciteit is volgens de onderzoekers minstens vijf keer kleiner dan waarden voor natuurlijke ecosystemen. Dit als gevolg van een verdampingsregime dat wordt gekenmerkt door extreme waterbeperking.*

Low impact development (LID) strategieën zijn gericht op het verminderen van de negatieve effecten van verstedelijking, zoals de toename van afvloeiing en de afname van evapotranspiratie. Via hydrologische simulaties kunnen LID strategieën worden getoetst aan het effect op de volledige waterbalans. Dit onderzoek presenteert de resultaten van een wereldwijde gevoeligheidsanalyse van modelgebaseerde waterbalanscomponenten (afvloeiingsvolume, evapotranspiratie, grondwateraanvulling / opslagverandering) met behulp van het SWMM-model (Us Environmental Protection Agency Storm Water Management Model) voor de parameters (bijv. bodemdikte, porositeit) van een groendak, een infiltratiesleuf en een goene berging.

AFBEELDING 16 DOORGEREKENDE SYSTEMEN



De analyse is gebaseerd op langetermijnsimulaties van 10 jaar met behulp van SWMM. Het geeft een totaalbeeld van de invloed van de LID-parameter op de waterbalans. De lange termijn berekeningen toonden niet-invloedrijke en invloedrijke parameters voor de waterbalans van de drie onderzochte LID's. De waterbergingscapaciteit (beïnvloed door de straatdikte en porositeit van het groendak, de verwerkingscapaciteit in en rondom de infiltratiesleuf en de diepte van de groene berging) en de ledigingstijd (beïnvloed door infiltratie en wegzijging) zijn belangrijke kenmerken die de waterbalans beïnvloeden. De gesimuleerde evapotranspiratie vertoont een zeer kleine bandbreedte omdat infiltratie het dominante proces is en SWMM de reactie van evapotranspiratie op het bodemvochtgehalte negeert. De resultaten zijn meestal in overeenstemming met andere studies.

De kenmerken van de neerslaggebeurtenis, de neerslagdiepte en de voorafgaande droge periode beïnvloeden het afvloeiingsvolume en de gevoeligheid voor opslagverandering/aanvulling van grondwater. De neerslagdiepte en de neerslagduur zijn van invloed op de

evapotranspiratiegevoeligheid. De resultaten tonen aan dat langetermijnsimulaties dienen te worden gebruikt om de initiële toestand van de opslagcapaciteit voorafgaand aan een bui mee te nemen. De evapotranspiratie en kwel zijn belangrijke processen die het herstel van de LID-retentiecapaciteit regelen, vooral in perioden tussen de neerslaggebeurtenissen.

Bron: Lit. 57 (zie Bijlage Literatuurlijst voor nummering en literatuurverwijzing)

4.6 STANDAARDISERING

Bartesaghi Koc et al hebben een systematische review uitgevoerd van 165 studies die rapporteren over de relatie tussen vegetatiegerelateerde kenmerken en het effect op het menselijk thermisch comfort, lucht- en oppervlaktetemperatuur. De resultaten tonen aan dat er nog weinig bekend is over de thermische voordelen van stedelijke vergroening in tropische en woestijnklimaten, ontwikkelingslanden en regio's op het zuidelijk halfrond. Er blijkt een gebrek aan gestandaardiseerde protocollen en classificatiesystemen voor groene infrastructuur die de rapportage en vergelijking van thermische gegevens mogelijk maken. De meeste studies zien de ruimtelijke heterogeniteit, onderlinge relaties en multifunctionaliteit van groene infrastructuur over het hoofd. Deze zijn nodig om het samenspel en de cumulatieve effecten te begrijpen.

Bron: Lit. 58 (zie Bijlage Literatuurlijst voor nummering en literatuurverwijzing)

4.7 SAMENVATTING

De onderzoeken in dit hoofdstuk leiden tot de volgende voorzichtige bevindingen:

- Gevestigde bomen kunnen tot wel 3-4 mm/dag water per kruinprojectie gebruiken;
- De verschillen in gemeten ET (evapotranspiratie) tonen aan dat het zinvol is om voor verdampingswaarden onderscheid te maken naar kale grond, gras, kruidachtigen, struiken en bomen;
- De ET is gemiddeld 1,5 mm/dag hoger voor vegetatie met ondergrondse wateropslag;
- Door ontharden kan de verdamping voor de betreffende oppervlakte in de zomerperiode aanzienlijk hoger zijn, tot wel het drievoudige;
- De opslagcapaciteit voor hemelwater ligt tussen 1-28 mm, wat overeenkomt met 2-20 dagen;
- Voor de modellering is het van belang om rekening te houden met het verschil in evapotranspiratie en interceptie;
- De aerodynamische ruwheidslengte kan een rol spelen bij verdamping als gevolg van windeffect;
- Om de initiële toestand van de opslagcapaciteit voorafgaand aan een bui mee te nemen dienen langetermijnsimulaties te worden gebruikt;
- Het verloop in verdamping is consistent met metingen van bodemvocht en de grondwaterstandsdiepte.

5

PROEFTUINTJES

Met de toegenomen aandacht voor droogte is er ook meer behoefte aan modellering van de stedelijk waterbalans. We verkeren nog in een fase dat we moeten volstaan met sterk geschematiseerde modellen. Maar ook deze zullen zich in de loop van de tijd ontwikkelen. Dit onderzoek laat zien dat met name de invloedssfeer van maatregelen een belangrijke sleutelfactor is en dat bodemvocht met name van bovenaf wordt aangevuld. Kwel en wegzijging spelen een belangrijke, maar onzekere rol en verdamping is zeker een niet te onderschatten factor. De waarde van de uitkomsten van de huidige generatie waterbalansen geven weliswaar meer inzicht in de watervraag, maar het blijft een balans. Met modellering op systeemniveau in plaats van op reservoir-niveau kunnen we beter rekening houden met zaken als de invloedssfeer, fluctuaties door interacties. In de ideale situatie zijn er verschillende proeftuintjes ter verificatie van rekenmodellen.

Een eerste stap op weg is op zoek te gaan naar een klein gebied waar veel praktijkinformatie bekend is. Door de meetwaarden in zo'n gebied te vergelijken met berekende waarden aan de hand van een waterbalansmodel kan een indruk worden verkregen van eventuele verbeterpunten.

Een proeftuintje zou er grofweg als volgt uit kunnen zien (eerste indicatie):

- Gebiedsgrootte ca. 1-2 ha
- Metingen beschikbaar van de temperatuur, oppervlaktewaterstand, de grondwaterstand en bodemvocht
- Systeminformatie zoals riolering, waterlopen en drainage beschikbaar
- Eventuele kwel- en wegzijgingsstromen in beeld
- Inlaathoeveelheden in beeld
- Weinig variatie in groen, wel grote vlakken
- Verdampingscijfers van de groensoorten beschikbaar
- Verhard oppervlak en groen gedetailleerd in beeld (inclusief materiaalsoorten)
- Bodemprofiel in beeld

Met een spreiding van proeftuintjes over Hoog- en Laag-Nederland en voor verschillende typologieën zal er mogelijk bruikbare informatie beschikbaar komen. Wellicht leent het vergroenen van schoolpleinen zich hiervoor of kan worden aangehaakt bij lopende onderzoeken in Delft en/of Wageningen.

LOPENDE ONDERZOEKEN TECHNISCHE UNIVERSITEIT DELFT

TU-onderzoekers, bedrijven en overheden testen in "The Green Village" duurzame technologie in praktijk in een duurzaam dorp. Eén van de onderdelen is de Waterstraat. Hier worden verschillende soorten open verharding beproefd om piekbelasting door regenbuien beter af te voeren en tijdelijk op te slaan. De WaterStraat biedt de mogelijkheid om concepten en producten te testen, te ontwikkelen en te demonstreren. Denk aan oplossingen als ondergrondse waterreservoirs, slimme regentonnen en betonnen blokken voor regenwaterafvoer en -buffering.

In het onderzoeksprogramma “*Urban Forestry*” ondersteunen de Faculteit Bouwkunde van de TU Delft en de Vereniging van Hoveniers en Groenvoorzieners (VHG) fundamenteel onderzoek naar de relatie tussen boomarchitectuur en het stedelijk microklimaat. Om erachter te komen hoe fysieke eigenschappen zoals de stamvorm, takkenstructuur, kroonvorm en bladeigenschappen de lucht- en de gevoelstemperatuur ter plekke beïnvloeden zijn klimaat-arboreta ontworpen en ingericht met tijdelijke opstellingen van gangbare boomsoorten. Het gaat om drieënvijftig basismodellen of typen. Op vier plaatsen (Delft, Almere, Dordrecht en Barendrecht) wordt in de periode 2022-2024 de lucht- en stralingstemperatuur, de luchtvochtigheid en de verdamping gemeten. Wellicht biedt dit onderzoek kansen voor het bijplaatsen van bodemvochtsensoren om op deze manier de relatie tussen verdamping en bodemvocht te meten.

Met betrekking tot klimaatadaptatie en in het kader van het netwerk “*Amsterdam Rainproof*” worden in Amsterdam steeds meer systemen gerealiseerd om hemelwater op andere manieren te verwerken dan via de traditionele hemelwaterriolering. Waternet onderzoekt hoe deze voorzieningen in de praktijk functioneren. De systemen worden langere tijd gemonitord, zodat kennis wordt ontwikkeld voor het beheer en onderhoud ervan. De metingen zijn gericht op het functioneren van de voorzieningen en niet zozeer op de effecten.

6

EINDRESULTAAT

In dit hoofdstuk wordt met de verkregen informatie een antwoord gegeven op de onderzoeksvragen. Beseft moet worden dat voor de beantwoording van deze vragen een eerste verkenning is uitgevoerd op basis van beperkt beschikbare en/of goed gedocumenteerde informatie.

6.1 BEANTWOORDING ONDERZOEKSVRAGEN

In hoeverre hebben kleinschalige klimaatadaptatieve maatregelen een effect op de stedelijke water-vraag en dienen waterschappen hier rekening mee te houden?

In tabel 2 zijn de bevindingen uit dit verkennende onderzoek bij elkaar gezet.

TABEL 2 EFFECT OP STEDELIJKE WATERVRAAG

	1 Geen	2 Overbrugging korte droge periode (weken)	3 Overbrugging middellange droge periode (1-2 maanden)	4 Overbrugging lange droge periode (enkele maanden)	5 Structurele oplossing
Verdampingswater besparen				■	■
Benutten van hemelwater		■	■	■	
Reguleren van ondiep grondwater				■	■
Benutten van diep grondwater			■	■	
Aanvoeren van water			■	■	

De stedelijke water-vraag voor de regionale waterbeheerder wordt geschat op ca. 1-1,5 mm/dag om via peilopzet (van onderaf) te voorzien in een goede vochtvoorziening. Dit is het berekende verschil in water-vraag bij wel of geen toepassing van dynamisch peilbeheer en het gemeten verschil in verdamping tussen vegetatie met én zonder ondergrondse water-opslag. Door peilopzet en ondergrondse waterberging is er voor het groen dan relatief meer en langer water beschikbaar om te kunnen verdampen. Peilopzet is, afhankelijk van o.a. drukverschil en infiltratiesnelheid, pas na langere tijd effectief (minimaal 1-3 maanden). Met het aanbrengen van ondergrondse drainagesystemen kan dit effect worden versneld.

De stedelijke water-vraag voor de stedelijk waterbeheerder voor besproeien en kunstmatige watergift wordt geschat op ca. 3 mm/dag om (van bovenaf) te voorzien in water om een langdurig droge periode te overbruggen.

Regionale en stedelijk waterbeheerders kunnen met de water-vraag beter rekening houden als bij modelberekeningen ook een interceptiemodel wordt toegepast met praktijkgerichte parameterwaarden. In In dit onderzoek worden enkele kengetallen voor verdamping van groen aangereikt op basis van praktijkonderzoek.

Op basis van de bevindingen in dit verkennende onderzoek hoeven de waterschappen, vanwege de naar verwachting kleinschalige lokale toepassing en regelgeving (KRW/GWR), geen rekening te houden met het benutten van diep grondwater zoals diepinfiltratie en ondergrondse waterbergingstechnieken.

Aanvoeren van oppervlaktewater leidt tot een stedelijke watervraag, maar zal omwille van waterkwaliteitsredenen telkens maatwerk zijn. Het benodigde water zal niet altijd beschikbaar zijn bij droogte en als gevolg van toepassing van de verdringingsreeks. Hiervoor is geen inschatting van het effect te maken.

In hoeverre hebben de kleinschalige klimaatadaptatieve maatregelen een effect op (grond)wateroverlast?

In tabel 3 zijn de bevindingen uit dit verkennende onderzoek bij elkaar gezet.

Het gros van de maatregelen heeft een positief effect op het beperken van de kans op (grond)wateroverlast. Het benutten van diep grondwater kan een negatief effect hebben op de grondwaterkwaliteit als gevolg van het mogelijk optreden van calamiteiten. Het aanvoeren van water kan een beperkt negatief effect hebben als de waterstand zodanig hoog komt dat opstuwing plaatsvindt.

TABEL 3 EFFECT OP (GROND)WATEROVERLAST / MILIEU

	1	2	3	4	5
Effect (grond)wateroverlast	Negatief effect Significante impact	Negatief effect Geringe impact	Geen effect	Positief effect Geringe impact	Positief effect Significante impact
Verdampingswater besparen				■	
Benutten van hemelwater				■	■
Reguleren van ondiep grondwater				■	■
Benutten van diep grondwater	■	■			
Aanvoeren van water		■	■		

Wat zijn daarbij sleutelfactoren die de mate van het effect op de stedelijke watervraag beïnvloeden?

Kort samengevat zijn de volgende sleutelfactoren te destilleren uit dit verkennende onderzoek:

Vergroenen (beperken verdamping)

- Verhardingsgraad
- Soort(keuze)
- Gelaagdheid en beschaduwing
- Vochtvoorziening

Water opslaan in de bodem

- Bodemgeschiktheid en grondwaterstand
- Doorworteling en deeltjesgrootte
- Dikte (zand)pakket
- Interferentie van bronnen en verzilting

Op natuurlijke wijze water aanvoeren (aanvullen tekorten)

- Invloedssfeer
- Kritische belasting en verblijftijd

Op kunstmatige wijze water aanvoeren (aanvullen tekorten)

- Nabijheid oppervlaktewater
- Beschikbaarheid materieel

Wat zijn relevante aanbevelingen om de theorie en praktijk dichter bij elkaar te brengen?

Ontwerpen en modelleren

Verschillende doelen van hemelwatervoorzieningen (bergen, verdampen, infiltreren, afvoeren) kunnen tot conflicterende ontwerpkeuzes leiden en vereisen ook een nauwgezette uitvoering, waarbij alle verbindingen en overstorten op het juiste niveau worden aangelegd. Door in het ontwerp een goede balans te bewaren tussen complexiteit en robuustheid neemt de beheersbaarheid toe. Het effect van doorspoelen op de waterkwaliteit is groter naarmate het systeem minder vertakt is.

Om de watervraag in stedelijk gebied te kunnen bepalen is o.a. inzicht nodig in verdampingswaarden. Voor de modellering is het, bij het interpreteren van verdampingswaarden, van belang om verschil te maken tussen evapotranspiratie en interceptie. Evapotranspiratie is de transpiratie van de bomen en de kruidlaag (opname via wortels) en de evaporatie van de bodem (verdamping). Interceptie is de neerslag die verdampt vanaf de natte delen en dus de bodem niet bereikt.

Enkele bevindingen uit deze verkenning tonen aan dat het zinvol kan zijn om het proces van verdamping beter in beeld te brengen voor het bepalen van de stedelijke watervraag. Door ontharden kan de verdamping voor de betreffende oppervlakte in de zomerperiode aanzienlijk hoger, tot wel het drievoudige.

Zo kunnen gevestigde bomen tot wel 3-4 mm/dag water per kruinprojectie gebruiken. Ook zijn er significante verschillen in gemeten evapotranspiratie voor kale grond, gras, kruidachtigen, struiken en bomen. De evapotranspiratie voor vegetatie met ondergrondse wateropslag blijkt uit praktijkonderzoek 1,5 mm/dag hoger te zijn dan vegetatie zonder wateropslag. Omdat er meer water beschikbaar is om te kunnen verdampen zal het verkoelend effect ook hoger zijn. De opslagcapaciteit voor hemelwater ligt volgens onderzoek tussen 1-28 mm, wat overeenkomt met 2-20 dagen.

Om de initiële toestand van de opslagcapaciteit voorafgaand aan een bui mee te nemen dienen langetermijn simulaties te worden gebruikt. Ook de aerodynamische ruwheidslengte speelt een rol bij de mate van verdamping (windeffect).

Beheren en monitoren

De soortkeuze, het aanbrengen van gelaagdheid (schaduwwerking/interceptie) en het verhogen van het organisch stofgehalte in de leeflaag dragen bij aan een betere vochtbalans (minder verdampen, meer vocht vasthouden) en hiermee reductie van de watervraag.

Het verloop in verdamping is consistent met metingen van bodemvocht en de grondwaterstandsdiepte. Het meten van bodemvocht is hiermee een interessante parameter om te monitoren naast gebruikelijke parameters als neerslag en grondwaterstand. De relatie tussen bladoppervlak (satellietwaarnemingen), neerslag (radarbeelden), temperatuur, grondwaterstand en het bodemvochtgehalte is van toegevoegde waarde om de watervraag beter in beeld te kunnen brengen.

Voor stedelijk waterbeheerstudies is het van belang om actuele hoogten van peilregelaars in te meten. Door scheefstand of breuk kunnen deze peilen afwijken, waardoor er onbedoeld meer grondwater wordt afgevoerd dan bedoeld.

6.2 CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN

Dit verkennende onderzoek toont aan dat er nog relatief weinig bruikbare/beschikbare praktijkinformatie is over de effecten van kleinschalige klimaatadaptatieve maatregelen op de stedelijke watervraag. De beschikbare informatie is, zoals verwacht, ook dermate locatie-specifiek dat het lastig is om de effecten te extrapoleren naar andere situaties. Hoewel in dit verkennende onderzoek wel richtwaarden zijn genoemd voor het inschatten van de watervraag zal in veel situaties een modelmatige benadering nodig zijn. Het koppelen van interceptiemodellen, waterlopenmodellen, ontwaterings- en rioleringsmodellen kan het inzicht in effecten verhogen. Dit dient dan wel hand in hand te gaan met praktijkmetingen ter verhoging van de betrouwbaarheid.

Er is een spanningsveld tussen het maximaliseren van verdamping ter bestrijding van hitte en het minimaliseren van verdamping ter reductie van de watervraag. Met het vergroenen van wijken, aanpassing naar droogtebestendige groensoorten en ontharden zal de watervraag door meer verdamping toenemen. Met aanbrenge van o.a. gelaagdheid in groen, schaduwwerking en toepassing van bodemverbetering kan de verdamping worden beperkt.

Het resultaat van dit onderzoek moet worden beschouwd als een eerste stapje in een nieuw onderzoeksveld. Er valt nog veel te leren en te ontdekken en er is ongetwijfeld meer informatie beschikbaar dan nu te overzien en benut is. Het bundelen van alle beschikbare en nog te verwerven inzichten zal de vakwereld verder brengen. Het pleit in ieder geval voor (continuering van) samenwerking tussen bureaus, overheden en onderzoeksinstituten en een centrale coördinatie.

EÉN VAN DE AANBEVELINGEN IN HET RAPPORT "TOWARDS WATER SMART CITIES" (ALTERRA, 2016)

There is a need for evidence base and knowledge transfer of climate adaptation strategies: There is a strong need for showcases and best practises about cost-effective climate adaptation strategies and experimentation space for co-creating new solutions. Cities need this knowledge for upscaling in order to become climate adaptive. Investing in living labs or demonstration projects where governments, citizens, researchers and businesses test and monitor innovative and nature based adaptation approaches is important.

Gelet op de positieve effecten van het reguleren van ondiep grondwater (dynamisch peilbeheer), mag worden verwacht dat dit in omvang zal toenemen. Regionale waterbeheerders kunnen hier al concreet rekening mee houden in de modellering.

Het effect van ontharding en vergroening op de vraag naar oppervlaktewater of via tankwagens aan te voeren water moet niet worden overschat. De verdamping zal weliswaar kunnen toenemen, maar met voldoende aandacht voor de aan- en herplant van droogtebestendig groen, verbetering van de leeflaag/vochthuishouding en als gevolg van natuurlijke mechanismen (sluiten huidmondjes) en extra percolatie/infiltratie door ontharding is er een compenserend effect. Proeftuintjes zijn mogelijk een geschikt middel om theorie en praktijk verder bij elkaar te brengen. Wellicht leent het vergroenen van schoolpleinen zich hiervoor of kan worden aangehaakt bij lopende onderzoeken in Delft en/of Wageningen. Hierbij

dient wel te worden overwogen dat grote waterbalansposten zoals kwel, wegzijging en rioolvreemd water niet nauwkeurig zijn te meten. Waterbalansposten die je wil toetsen (bijvoorbeeld evapotranspiratie) zijn dan niet goed te bepalen.

Het monitoren van gidsparameters zoals bodemvocht, niveaus, of temperatuur is niet alleen vanuit wetenschappelijk oogpunt van belang. Het verschaft ook inzicht om het beheer en onderhoud te optimaliseren. Net zoals bij zonnepanelen is het wellicht een optie om een app te ontwikkelen die dergelijke sensordata op overzichtelijke wijze visualiseert. Met een dergelijke app wordt het voor beleidsmakers, modellers en beheerders een uitdaging om gezamenlijk de stedelijke watervraag te optimaliseren!

7

REFERENTIES

Nr	Case/Naam	Bron/Organisatie	Titel/Relevantie
1	Eikendonkplein	Tauw/Hanzehoogeschool Groningen	Waterpleinen voor klimaatadaptatie. case Eikendonkplein Den Bosch
2	Diepinfiltratiesystemen	KWR/Deltares/Arcadis/Allied Waters	COASTAR. Cities2Recharge. Monitoringsparameters voor functioneren van diepinfiltratiesystemen in stedelijke omgeving
3	Afkoppelen hemelwater	STOWA	Afkoppelen. Kansen en risico's van anders omgaan met hemelwater in de stad
4	Delfland	Arcadis	Resultaten hoofdstuk doorspoelen watersysteem
5	Domineeskamp	Arcadis	Hydraulisch functioneren riolering en maaiveld Zuidlaren. Klimaatrobuust ontwerp Domineeskamp en Leenakkerweg
6	Effluent Delfland	Arcadis	Onderzoek naar mogelijkheden van hergebruik effluent op de boezem van Delfland
7	Groene daken	STOWA	Groene Daken naderd beschouwd. Over de effecten van begroeide daken in breed perspectief met de nadruk op de stedelijke waterhuishouding
8	Klimaatstraat	Gemeente Borsele/Rothuizen Architecten Stedenbouwkundigen/Het Nieuwe Samenspel/ HZ University of Applied Science	Eindrapportage. Impactproject Klimaatstraat Nieuwdorp
9	Stedelijk waterkwaliteit	RIVM/Arcadis/Deltares/Wageningen Environmental Research	Stedelijke Waterkwaliteit, Klimaat en Adaptatie. Achtergrondrapport
10	Steenderen afkoppel	Arcadis	Afkoppelplan Steenderen
11	Sturen met water	Arcadis/Hoogheemraadschap Delfland	Sturen met Water - Verkenning
12	t Harde Afkoppelplan	Arcadis/Gemeente Elburg	Afkoppelplan 't Harde fase 3
13	Watersysteemanalyse	Arcadis	Watersysteemanalyse en maatregelenpakket Groenlose Gracht. Diagnose van de blauwalgenproblematiek op basis van de Ecologische Sleutelfactoren
14	Verstedelijkingsopgave	Arcadis/Provincie Zuid-Holland/Vereniging Zuid-Hollandse Waterschappen	Het effect van de verstedelijkingsopgave op wateroverlast. Onderzoek naar kwetsbaarheid en klimaatbestendige verdichting
15	LIFE @ Urban roofs	Arcadis	LIFE @ Urban roofs 2.0 Onderbouwingsrapport kentallen
16	Droogtebestendig groen NKWK	Deltares	NKWK Klimaatbestendige Stad, Werkpakket Droogte en Groen, onderzoeksplan
17	Effectiviteit klimaatadaptieve maatregelen	Stichting RIONED	De effectiviteit van klimaatadaptatiemaatregelen
18	Bergingsmogelijkheden West Betuwe	Arcadis	Bergingsmogelijkheden West Betuwe. Voorbeelden t.b.v. toepassing op particulier terrein
19	Kootwijkerbroek infiltratie	Arcadis	Beproeving waterpasserende verharding. Uitbreidingslocatie Kerkweg te Kootwijkerbroek

Nr	Case/Naam	Bron/Organisatie	Titel/Relevantie
20	Elburg	Arcadis/Gemeente Elburg	Herberekening infiltratiestelsel 't Harde
21	Kenniswisseling infiltratie	Arcadis	Kenniswisseling infiltratie
22	MKBA klimaatbestendig inrichten	Hogeschool van Amsterdam	De Klimaatbestendige Wijk, onderzoek voor de praktijk
23	Hittebestendige stad	Hogeschool van Amsterdam	De hittebestendige stad
24	Infiltrerende verharding	Hogeschool Rotterdam	De infiltrerende stad, RAAK MKB project
25	Watervraag stedelijk gebied	Royal Haskoning	Klimaat en watervraag stedelijk gebied
26	Kosten klimaatbestendige nieuwbouw	Arcadis/&flux	Kosten en bekostiging klimaatbestendige nieuwbouw. Programma Metropoolregio Amsterdam Klimaatbestendig
27	Kosten klimaatadaptieve Stadsharten	Arcadis/&flux	Kosten klimaatadaptatie van gebiedsontwikkeling in negen MRA stadsharten
28	Regenwaterrecuperatie Zuiderdokken	IMDC/Tractebel/stad Antwerpen	Haalbaarheidsstudie regenwaterrecuperatie Zuiderdokken
29	WP4 Droogte en waterschaarste Antwerpen	IMDC	Onderzoek naar droogte en waterschaarste in Antwerpen. WP4 Beleidsaanbevelingen
30	Bestendige stedelijk waterbalans	Deltares	Naar een bestendige stedelijke waterbalans
31	Grootschalig actief grondwaterpeilbeheer	Deltares	Grootschalig actief grondwaterpeilbeheer in bebouwd gebied
32	Onderwaterdrainage en watervraag	Deltares/WUR	Effecten van onderwaterdrainage op de regionale watervraag. Berekeningen met het Landelijk Hydrologisch Model
33	Huidige en toekomstige waterbehoefte	Deltares	Studie naar de huidige en toekomstige waterbehoefte van stedelijke gebieden
34	Watervraag Groene Hart	Alterra	Watervraag Groene Hart Onderwaterdrainas
35	Alternatief gebruik drinkwater productieproces	Arcadis/Posad/OneArchitecture	Robuuste ruimte voor water en energie. Conceptstudie duurzame herinrichting bedrijvenszone Albertkanaal
36	Modellering regenwaterput	Arcadis	Dimensionering regenwaterput voor hergebruik (sanitair, koeling, irrigatie)
37	Nature based solutions	Gemeente Eindhoven	Nature based solutions. Inspiratieboek
38	Waterberging groen dak	Arcadis	Effectiviteit en toepassing groene daken
39	Kunstmatige infiltratie oppervlaktewater	STOWA	Deltafact Effecten van kunstmatige infiltratie van oppervlaktewater op de grondwaterkwaliteit
40	WP3 Droogte en waterschaarste Antwerpen	IMDC	Onderzoek naar droogte en waterschaarste in Antwerpen. WP3 Scenario's en Strategieën
41	Ondergronds voorraadbeheer	STOWA	Ondergronds bergen en terugwinnen van water in stedelijk gebied. Een verkenning van de (on) mogelijkheden
42	Ondergrondse waterberging	STOWA	Deltafact Ondergrondse waterberging
43	Hergebruik effluent	STOWA	Deltafact Hergebruik van effluent als zoetwaterbron
44	Onderwaterdrainage en passieve peilstijging	Deltares	Het effect van onderwaterdrainage en passieve peilstijging in veenweidegebieden op knelpunten in de zoetwatervoorziening
45	Hergebruik industrieel restwater	KWR	Hergebruik van industrieel restwater voor de watervoorziening van de landbouw. Praktijkproef subirrigatie met gezuiverd restwater van Bavaria

Nr	Case/Naam	Bron/Organisatie	Titel/Relevantie
46	Afvalwaterzuivering en waterbalans	Grontmij	Duurzame afvalwaterketen in Amersfoort
47	COASTAR Waterbank Westland	COASTAR partners	COASTAR Waterbank Westland. Droge voeten, voldoende gietwater
48	Opschaling COASTAR	COASTAR partners	Regionale en nationale opschaling COASTAR toepassingen
49	Effectiviteit waterinlaat	STOWA	Deltafact Effectiviteit van waterinlaat
50		https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.08.001	Effects of organic ground covers on soil moisture content of urban green spaces in semi-humid areas of China
51		https://doi.org/10.1007/s00271-008-0124-1	Water use and the development of seasonal crop coefficients for Superior Seedless grapevines trained to an open-gable trellis system
52	Rapport 333	DLO Staring centrum	Hydrologie en waterhuishouding van bosgebieden in Nederland
53		H ₂ O-Online (28 oktober 2015)	Hoeveel water verdampt de stad?
54	H ₂ O (18) 1985	edepot.wur.nl/383079	De waterbalans van een stedelijk gebied; ervaringen in twee meetgebieden in Lelystad
55		https://doi.org/10.1175/jamc-d-21-0067.1	Influence of the Local Urban Environment on the Thermoradiative and Hydrological Behavior of a Garden Lawn
56		https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115597	Transpiration by established trees could increase the efficiency of stormwater control measures.
57			Sensitivity of Model-Based Water Balance to Low Impact Development Parameters (2018). Water.
58		https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.03.008	Evaluating the cooling effects of green infrastructure
59		STOWA Deltafact	Dynamisch peilbeheer
60		Waternet, februari 2022	Kennisdocument hemelwaterverwerkende voorzieningen
61	Rapport 2787	WUR (Alterra, 2016)	Towards Water Smart Cities
62		https://doi.org/10.3390/hydrology9030042	Determinants of Evapotranspiration in Urban Rain Gardens: A Case Study with Lysimeters under Temperate Climate
63		https://www.mdpi.com/2306-5338/9/3/42	Evapotranspiration in Rain Gardens Using Weighing Lysimeters.
64		https://doi.org/10.1061/JSWBAY.0000794	Understanding the Role of Evapotranspiration in Bioretention: Mesocosm Study