

NKWK

Nationaal Kennis- en
innovatieprogramma
Water en Klimaat

Droogte en stedelijk groen

Datum: 24 december 2021
Versie: definitief v1.0

Kernteam:

Marco Hoogvliet (projectleiding, Deltares)
Joop Spijker (WEnR)
Wilmer Noome (Sweco)
Erwin Slingerland (Arcadis)
Monique de Groot – Reichwein (Tauw)

Projectteamleden:

Toine Vergroesen (Deltares)
Reinder Brolsma (Deltares)
Sven van Baren (WEnR)
Brian van Straalen (Sweco)
Lisanne den Ouden (Arcadis)
Michel Moens (Arcadis)
Annemieke Feijen (Tauw)
Francesca Sahit (Tauw)



Inhoud

Samenvatting - Droogte en stedelijk groen.....	4
1 Inleiding droogte en stedelijk groen	15
1.1 Droogte geeft problemen in de bodemvocht huishouding	15
1.2 Relatie tussen bodemprofiel en benutbare waterbronnen	18
1.3 Droogte nu en in de toekomst	23
1.3.1 Vers in het geheugen: 2018, 2019 en 2020.....	23
1.3.2 Waar kan klimaatverandering toe leiden?.....	24
2 Wat kenmerkt droogtebestendiger groen?.....	26
2.1 Stedelijke groentypen en groeiomstandigheden	27
2.2 Wat maakt groen droogtebestendiger?	30
2.2.1 Aanpassen aan wijzigende klimaatomstandigheden	30
2.2.2 Vereisten die horen bij droogtebestendiger groen	31
2.2.3 Hoe is droogtebestendiger groen te definiëren?	32
2.3 Invulling eisen droogtebestendiger groen.....	33
2.3.1 Individuele boom of plant	33
2.3.2 Combinaties van groen	34
2.3.3 Inrichting van het groen in relatie tot de vochtvoorziening	34
2.3.4 Mogelijkheid van wateraanvoer.....	35
2.3.5 Inrichting van het groen i.r.t. biodiversiteit	35
3 Invloed van landschap en stedenbouwkundige inrichting	37
3.1 Bepalende landschapskenmerken.....	37
3.2 Ruimtelijke inrichting en wijktypen.....	38
3.2.1 Inrichting groeiplaats	38
3.2.2 Classificatie van inrichting in karakteristieke wijktypen	43
4 Haalbare maatregelen, handelingsperspectieven.....	46
4.1 Optimaliseren vochtvoorziening	47
4.1.1 Water besparen	47
4.1.2 Water vasthouden.....	48
4.1.3 Water aanvoeren uit duurzame bronnen	51
4.2 Optimaliseren groeiplaats.....	52
4.3 Optimaliseren soortkeuze.....	54
5 Factsheets wijktypen en daarbij passende maatregelen	56
5.1 Oudere woonwijken.....	58
5.2 Bloemkoolwijken.....	62
5.3 Vinexwijken.....	66
6 Effect van droogte en maatregelen op waterbalans	70
6.1 Het waterbalansmodel	71
6.2 Balanstermen, indicatoren.....	71
6.3 Gesimuleerde varianten	72

6.3.1	Referentie situaties	72
6.3.2	Toegepaste maatregelen.....	73
6.3.3	Klimaat- en weersomstandigheden.....	74
6.4	Modelresultaten	74
6.4.1	Waterbalans in referentie situaties	74
6.4.2	Effect van maatregelen op de waterbalans	78
7	Raming van opgetreden en te verwachten schades	84
7.1	Typen schades.....	84
7.2	Schades in recente droge jaren.....	86
7.2.1	Aanpak schade analyse.....	86
7.2.2	Schadeverschillen tussen jaren en tussen gebieden.....	88
7.3	Aanbevelingen voor raming schades en verlies van baten	95
7.3.1	Gebruik scenario's om potentiële droogteschade te ramen	95
7.3.2	Benut bestaande instrumenten om verlies van baten te bepalen	96
7.3.3	Houdt rekening met extra beheerkosten	97
7.4	Wat kon wel en wat kon niet worden geraamd?	98
8	Invullen kennis- en informatiehiaten	99
8.1	Verbetering ramingen, aanleg en beheer.....	99
8.2	Geprogrammeerd en lopend onderzoek.....	102
	Referenties.....	104
	Bijlage: Achtergrondinformatie waterbalansmodellering	106
	Het balansmodel.....	106
	Landgebruik – Wijktype en hoog/Laag NL	107
	Ondergrond en watersysteem – hoog/laag Nederland.....	109
	Vegetatie.....	110
	Oppervlakte water	116
	Meteorologie	116
	Beschikbare oppervlaktewaterberging	117
	Overzicht modelparameters	118

Samenvatting - Droogte en stedelijk groen

In 2021 is in het NKWK programma Klimaatbestendige Stad een inventariserend onderzoek uitgevoerd naar door droogte veroorzaakte schade aan groen in de openbare stedelijke ruimte, en naar mogelijkheden om die schade te voorkomen. Prominente bevindingen en conclusies zijn hier samengevat.



Wat is het probleem en wie moet hiermee aan de slag?

Extreme droogte bedreigt de waarde die groen levert voor stedelijk gebied

Groen in de stad verbetert het milieu, zorgt voor een rijke biodiversiteit, vermindert luchtvervuiling, dempt geluidshinder, draagt bij aan regenwaterbeheer en verkoelt. Daarnaast is een aangetoond positief effect op de gezondheid en sociale verbindingen van mensen die in een groene omgeving wonen, werken en recreëren.

Tegelijkertijd is in stedelijke gebieden groene ruimte een schaars goed en is soms bezuinigd op aanleg en onderhoud. Maar dat tij lijkt te keren. Mede door de positieve bijdrage die groen levert aan een klimaatbestendiger en duurzame leefomgeving heeft vergroening de aandacht.

Met die hogere waardering komt ook verhoogde aandacht voor bedreigingen van groen. Eén bedreiging is extreme droogte. De meerjarige droogte van 2018 t/m 2020 maakte duidelijker welke negatieve effecten langdurige droogte kan veroorzaken. Vooral in landbouw- en natuurgebieden, maar ook in stedelijk gebied. In een stad spelen daarbij specifieke factoren een rol die alles te maken hebben met hoe steden zijn gebouwd en ingericht, en met de soorten groen die bij de inrichting zijn gekozen.

In 2050 twee keer zoveel kans op een 2018-droogte. Houd daarmee nu al rekening. De herhalingstijd waarmee een droogte als in 2018 optreedt in 2050, uitgaande van het droge KNMI'14 WH scenario, is 1/15 jaar. Nu is dat nog 1/30 jaar. De kans op extreme droogte is over 28 jaar dus al twee keer zo groot geworden. Gezien de levensverwachting van bomen en de levenstermijn van de inrichting van de openbare ruimte, moet met deze toekomstige omstandigheden nu al rekening worden gehouden.

Wanneer uit de situatie in 2018 een indicatieve norm wordt afgeleid, zou groen dat nu wordt gerealiseerd (liefst zonder hulp in de vorm van irrigatie) bestand moeten zijn tegen perioden zonder neerslag die langer duren dan 8 weken en waarin een neerslagtekort van circa 350mm optreedt. Dat is vooral voor de hogere delen van Nederland, waar het groen hoofdzakelijk afhankelijk is van regenwater, een enorme opgave. Geheel bestand zijn tegen dergelijke omstandigheden lijkt niet haalbaar. Bestendiger worden is dat wel. Daarmee zal het groen ook beter gedijen onder de veranderde gemiddelde omstandigheden rond 2050.

De sleutels tot droogtebestendiger groen liggen bij drie disciplines. Die moeten samenwerken om een optimaal resultaat te kunnen behalen

Er zijn op hoofdlijnen drie sleutelfactoren die op elkaar moeten worden afgestemd om droogtebestendiger stedelijk groen te realiseren. Die factoren zijn:

Het vinden van een gebiedsgericht optimum tussen soortkeuze, inrichting van de groeiplaats en de wijze waarmee het vochtgehalte van de bodem kan worden beheerst, is essentieel



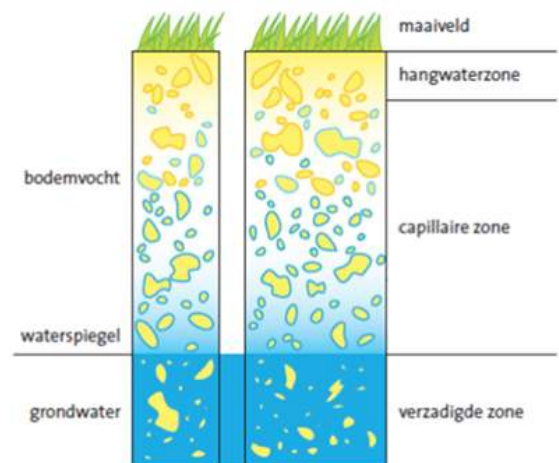
om stedelijk groen droogtebestendiger te maken. Dit is alleen te bereiken wanneer de drie disciplines die aan deze knoppen draaien, samenwerken. Het gaat dan respectievelijk over groenbeheerders, stedenbouwkundigen en waterbeheerders.



Samenwerking vereist verdieping in ieders opgaven en mogelijkheden. Om dit te faciliteren heeft het project gefocust op punten waar de disciplines elkaar raken en beïnvloeden. Het kennisniveau over wat groen biedt en nodig heeft, ligt bij waterbeheerders lager. Het project 'Droogte en stedelijk groen' heeft zich daarom voornamelijk gericht op het beschrijven aspecten die zij moeten kennen om een verbinding te kunnen maken met groenbeheerders en stedenbouwkundigen. Tegelijkertijd is het voor deze twee disciplines noodzakelijk om kennis te nemen van de water-balanseer-opgave die bij waterbeheerders ligt. In het project is deze opgave centraal gesteld, door de te behalen lat voor de drie disciplines hoog te leggen, en na te gaan of en hoe droogtebestendiger groen kan worden gerealiseerd zonder het creëren van een extra externe watervraag door stedelijk, openbaar groen. Dit heeft een serie aandachtspunten opgeleverd. Stukjes fundamentele basiskennis die interdisciplinair werken faciliteren.

Aandachtspunten rond vochtvoorziening

Voor stedelijk groen betekent droogte een tekort aan bodemvocht. Let daarom vooral op wat er gebeurt in de onverzadigde zone. Groen haalt haar water voornamelijk uit de onverzadigde zone van de bodem. Het water in die zone bestaat uit geïnfiltrerd 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).



Groen functioneert optimaal wanneer er zoveel 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.

Met name neerslag levert bruikbaar bodemvocht. Grondwater niet altijd en niet overal. 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. In laag Nederland situatie 1. Maar alleen bomen en diepwortelende struiken kunnen daar van het grondwater profiteren. Gras en kruiden zijn nagenoeg altijd afhankelijk van het hangwater. Alleen in gebieden waar de grondwaterstand jaarrond erg hoog staat (circa <30cm beneden maaiveld), zoals in het Groene Hart en delen van Friesland, voedt het grondwater ook het gras en de kruiden, en geldt voor al het groen situatie 3. Bij zulke natte omstandigheden horen overigens specifieke boomsoorten. Voor de meeste bomen is een grondwaterstand van circa 1 meter beneden maaiveld, optimaal.

Vooral groen in situatie 1 is kwetsbaar in een extreem droog jaar. Dit groen krijgt dan 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.

Aandachtspunten rond groeiplaats

Wees je bewust van effecten van het onnatuurlijke bodemprofiel in steden. Gebouwen, tuinen en een groot deel van de openbare ruimte zijn gerealiseerd op een aangebrachte, zandige funderingslaag. Op plaatsen waar tuinen en openbaar groen zijn voorzien wordt veelal een 30-50cm dikke leeflaag aangebracht. Dit kunstmatige bodemprofiel, met een scherpe overgang van zand naar een humusrijkere laag, heeft consequenties voor de vochtvoorziening. De capillaire opstijging in zand is kleiner, waardoor het moeilijker is om hoog genoeg te komen om de wortels te bereiken (boomwortels reiken meestal niet dieper dan 1 tot 1,5 meter). Het groen is in zo'n kunstmatig profiel dus in grotere mate afhankelijk van het hangwater, de neerslag die achterblijft in de daarvoor bedoelde leeflaag.



De ondergrondse inrichting is minstens zo belangrijk als de bovengrondse. Plan 3D Steden hebben de afgelopen ruim 100 jaar grote ontwikkelingen doorgemaakt. Elke periode kent haar eigen wijkontwikkeling met kenmerkende eigenschappen als woningtype, straatopbouw, watersysteem en hoeveelheid en soort groen. De kennis over de groeiplaats van stedelijk groen is de afgelopen 50 jaar ook verder ontwikkeld.

Waar een goede groeiplaats aan moet voldoen en met welke omvang deze optimaal is, is gekoppeld aan de initiële ruimtelijke inrichting en hoe die door de tijd wijzigt. Bij de aanplant van nieuwe bomen dient voldoende wortelruimte te worden gecreëerd met gebruik van bomenzand, granulaat en sandwichprofielen waarin teelaarde voor bomen is verwerkt. Een goede groeiplaats heeft voldoende organische stof voor de ontwikkeling van de bomen, waterbufferend en drainerend vermogen en een draagkracht die past bij de functie. Elk jaar heeft een groeiende boom tussen de 0,5 en 1m³ extra doorwortelbare ruimte nodig. Daarnaast dienen voldoende infiltratiemogelijkheden nabij het groen te zijn om hemelwater de groeiplaats te laten bereiken.

Voorkom additionele negatieve effecten door verstoring

Groen in de stad groeit meestal in moeilijkere omstandigheden dan in het omliggende landelijke gebied. De groeiomstandigheden zijn slechter door bijvoorbeeld grondverdichting door verkeer en (bouw)werkzaamheden, verzilting door strooizout en regelmatig openen van de bodem voor werkzaamheden, waarbij wortels worden verstoord en vernietigd. Al deze omstandigheden

hebben tot gevolg dat groen in de stad sowieso stress ondervindt, wat de groei en overlevingskansen van groen niet ten goede komt. Additionele droogtestress komt daardoor bij stedelijk groen extra hard aan.

Aandachtspunten rond soortkeuze

Droogte pakt anders uit voor grassen en kruiden, struiken en bomen. Stedelijk groen bestaat uit veel verschillende soorten en maten groene elementen, die vaak worden beschreven als verschillende beheercategorieën of groentypen. Het groen van deze beheercategorieën ondervindt op verschillende manieren de effecten van de wijzigende klimaatomstandigheden. De drie belangrijkste beheercategorieën zijn de gras- en kruidlaag, de struiken en de bomen. Tijdens langdurige droogte is verdorring van gras en kruiden meestal niet te voorkomen, maar deze groentypen herstellen zich ook weer gemakkelijk. Voor struiken en vooral bomen ligt dit anders. De impact van sterfte van stadsbomen is groot. Bomen staan daarom bovenaan de zorgenlijst.

Soorten moeten bestand zijn tegen drogere, maar ook nattere condities. Het klimaat wordt ook natter. Het daarom beter om in meer algemeenheid naar 'klimaatbestendiger groen' te streven. Oftewel groen dat tegen langduriger droogte én tegen langere natte periodes bestand is. Groen kan op sommige plekken zelfs onder water komen te staan. Soms is dit een gevolg van klimaatadaptatie maatregelen om wateroverlast te voorkomen. De omstandigheden waaronder het groen moet gedijen worden dan nog dynamischer, en soortkeuze nog belangrijker.

Wanneer is groen droogtebestendiger te noemen? Groen is droogtebestendig genoeg als het een periode van droogte goed kan doorstaan, ook als deze periodes in het groeiseizoen of meerdere jaren achtereen herhaald voorkomen. Een tijdelijke groeivertraging is daarbij overkomelijk, mits de beplanting na de droogte de draad weer kan oppakken. Droogtebestendig groen blijft ook in droge periodes zijn ecosysteemdiensten leveren. Alleen in extreme droogteperiodes kunnen sommige ecosysteemdiensten tijdelijk wat achterblijven. Bestendiger groen, kenmerkt zich samengevat door:

- bestand tegen extremere hitte, vorst, droogte, nattigheid, verzilting en storm
- draagt bij aan buffering piekneerslag
- vermindert hittestress
- versterkt en verhoogt biodiversiteit
- heeft veerkracht bij ziektes en plagen
- levert bijdrage aan betere luchtkwaliteit
- verhoogt leefbaarheid en recreatieve waarde



Het bovenstaande komt neer op het zoeken naar een voor een specifieke situatie optimale instelling van de drie sleutelfactoren: soort, groeiplaats en vochtvoorziening. Deze drie factoren bepalen in combinatie met elkaar of het groen wel of niet gedijt. Als één van deze variabelen niet (meer) aansluit op de anderen, vervalt de bestendigheid.

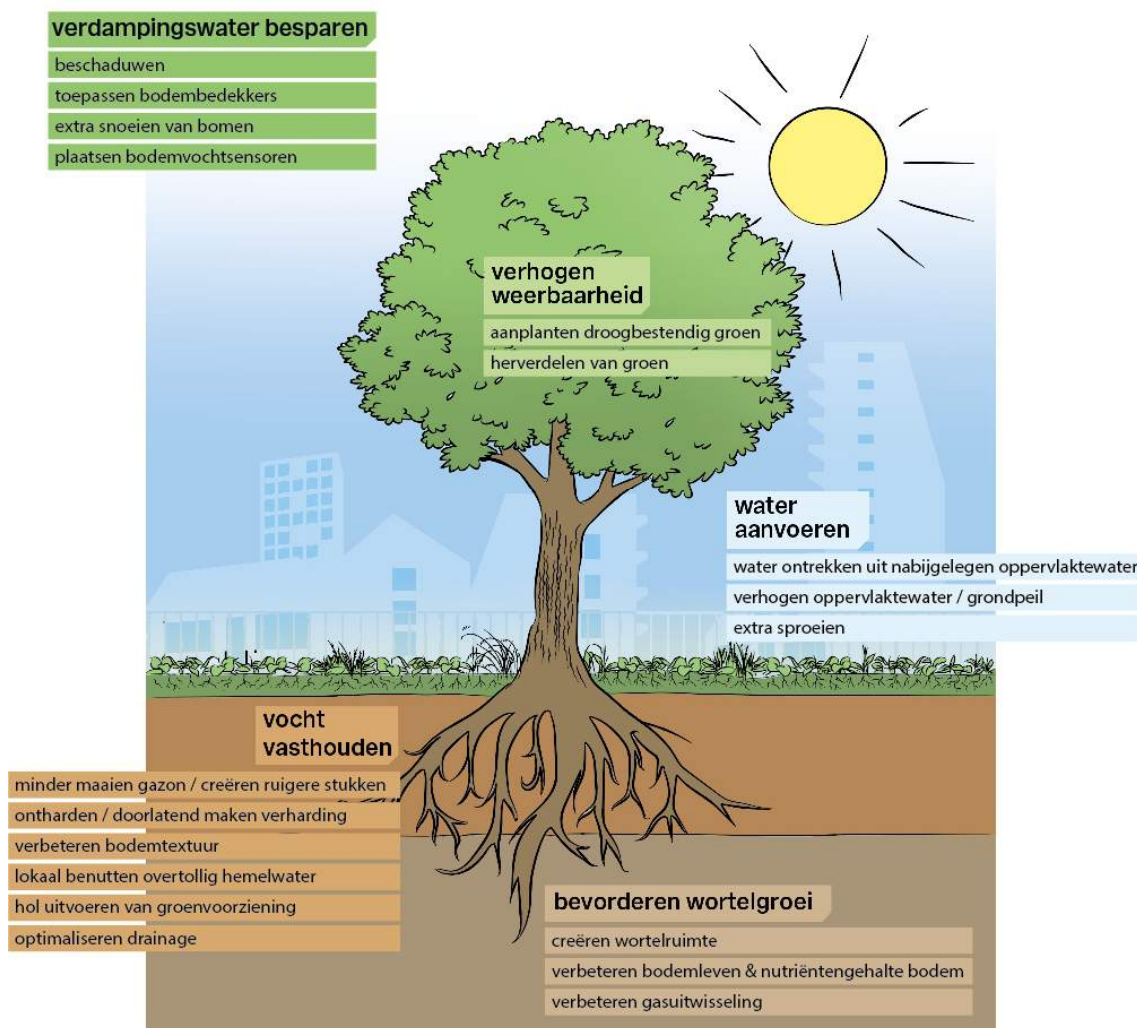
Handelingsperspectieven

Hoe vertalen de aandachtspunten zich naar concrete maatregelen?

De aandachtspunten helpen bij het vormen van handelingsperspectieven: inzet van concrete (combinaties van) maatregelen die groen droogtebestendiger maken. Het handelingsperspectief is voor nieuw groen anders dan voor bestaand groen. Bestaand groen kan droogtebestendiger worden door met name het onderhoud te optimaliseren en bij vervanging/reconstructies de omstandigheden te verbeteren. Bij nieuw groen kan al vroegtijdig rekening worden gehouden met langdurig droge perioden door de inrichting en soortkeuze te optimaliseren.

Navolgende figuur geeft een overzicht van typen maatregelen die zijn geordend naar de drie sleutelfactoren:

- Vochtvoorziening – besparen, vasthouden, aanvoeren (uit hernieuwbare bron)
- Groeiplaats - bevorderen wortelgroeiruimte
- Soort(keuze) - verhogen weerbaarheid.






Niet elke maatregel werkt overal even goed. Wijkkenmerken zeggen iets over de haalbaarheid en het te verwachten succes













































































































Op basis van stedenbouwkundige historie en daarbij behorende praktijken, zijn drie voor Nederlandse steden representatieve wijktypen geïdentificeerd die op specifieke groen-gerelateerde kenmerken van elkaar verschillen. Deze kenmerken, die wederom zijn onder te verdelen naar de sleutelfactoren soort, groeiplaats en vochtvoorziening, vormen op hun beurt aangrijpingspunten voor maatregelen waarmee het groen droogtebestendiger kan worden

gemaakt. Sommige maatregelen zijn in een wijk beter/slechter uitvoerbaar en daarom meer/minder succesvol. De verschillen in condities tussen hoog en laag Nederland zijn ook bepalend.

Navolgende tabel toont hoe de haalbaarheid varieert tussen de drie wijktypen. Voor oudere woonwijken zijn bijvoorbeeld minder maatregelen 'zeer toepasbaar' (de groene gezichtjes) in vergelijking met een vinexwijk. De haalbaarheid is toegekend op basis van de mix van landschap, wijk en groenkenmerken, en op basis van de ervaring in het projectconsortium.

-  - Zeer haalbaar handelingsperspectief / maatregel
-  - Gemiddeld haalbaar handelingsperspectief / maatregel
-  - Minder haalbaar handelingsperspectief maatregel

Haalbaarheid en verwacht succes van maatregelen, per wijktipe en landschapstype (laag-NL / hoog-NL)

Maatregel		Oudere woonwijk (laag-NL / hoog-NL)	Bloem Koolwijk (laag-NL / hoog-NL)	Vinex Wijk (laag-NL / hoog-NL)	
Optimaliseren vochtvoorziening					
Beschaduwen	Optie 1: Verdampings- water besparen	Bovengrondse maatregelen	 / 	 / 	 / 
Toepassen bodembedekkers			 / 	 / 	 / 
Extra snoeien van bomen			 / 	 / 	 / 
Plaatsen bodemvochtsensoren			 / 	 / 	 / 
Minder maaien gazon/creëren ruigere stukken			 / 	 / 	 / 
Ontharden/doorlatend maken verharding	Optie 2: Vocht vasthouden	Bovengrondse maatregelen	 / 	 / 	 / 
Verbeteren bodemtextuur			 / 	 / 	 / 
Hol uitvoeren van groenvoorziening			 / 	 / 	 / 
Optimalisatie drainerende werking			 / 	 / 	 / 
Lokaal benutten overtollig hemelwater			 / 	 / 	 / 
Water onttrekken uit nabijgelegen oppervlaktewater	Optie 3: Water Aanvoeren vanuit duurzame bron	Systeem- gerichte maatregelen	 / 	 / 	 / 
Verhogen oppervlaktewater-/grondwaterpeil			 / 	 / 	 / 
Extra sproeien			 / 	 / 	 / 
Optimaliseren groeiplaats					
Creëren wortelruimte	Bevorderen wortelgroei	Ondergrondse maatregelen	 / 	 / 	 / 
Verbeteren bodemleven & nutriëntengehalte bodem			 / 	 / 	 / 
Verbeteren gasuitwisseling			 / 	 / 	 / 
Optimaliseren soort(keuze)					
Aanplanten droogtebestendig groen	Verhogen weerbaarheid		 / 	 / 	 / 
Herverdelen van groen			 / 	 / 	 / 

Waterbalans: hoeveel water is er tekort en kunnen de maatregelen dit tekort invullen?

Dit project is geboren uit een behoefte aan meer kwantitatieve informatie over stedelijke watertekorten bij droogte. Daarom is in een separaat onderdeel met behulp van waterbalansberekeningen bepaald hoeveel water het stedelijk groen in de openbare ruimte mist tijdens droogte, en in welke mate de maatregelen dit tekort kunnen aanvullen.

Ga óók samen rekenen

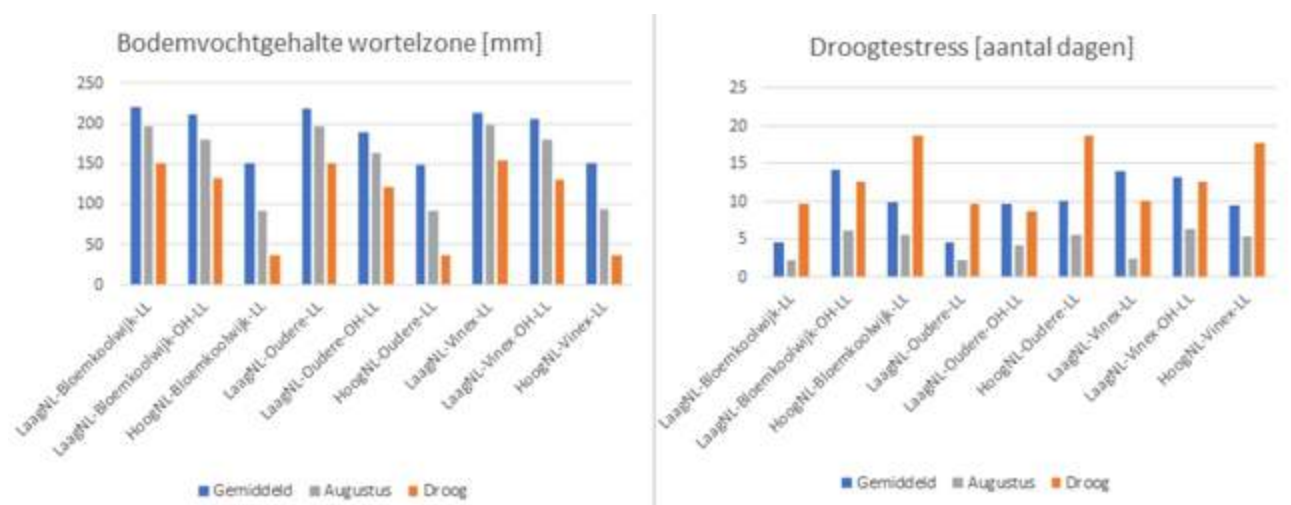
Met toenemende vergroening en inzet van groenblauwe maatregelen in het stedelijk waterbeheer, wordt het ook belangrijk dat door de drie disciplines gezamenlijk wordt gerekend aan de generieke effecten van veranderingen in de stedelijke inrichting. Dat gebeurt niet of zelden (goed genoeg) en daardoor liggen fouten a.g.v. gebrek aan afstemming op de loer. Ook in dit project bleek dat een door stedelijk waterbeheerders gebouwd model pas meerwaarde heeft als daar input van stedenbouwkundigen en groendeskundigen in is verwerkt.



Vergelijk tussen wijktypen, in gemiddelde en (extreem) droge omstandigheden
 Figuur 0.1 toont waterbalansuitkomsten voor de drie wijktypen in hoog en laag Nederland:

- Over een geheel klimatologisch gemiddeld jaar
- In een gemiddelde maand augustus, vaak de maand waarin de bodemdroogte piekt
- In de maand juli van het extreem droge jaar 2018, in deze maand piekte de bodemdroogte van 2018.

Zo laten de diagrammen zien hoe de omstandigheden verschillen in een gemiddelde maand augustus (grijs) t.o.v. de gemiddelde omstandigheden in een jaar (blauw), en hoeveel erger de piekdroogte was in 2018 (oranje) t.o.v. de piekdroogte in een gemiddelde augustusmaand (grijs). In deze samenvatting worden de uitkomsten geïllustreerd via de balans term 'bodemvochtgehalte wortelzone' en het uit de balans resulterende 'aantal dagen met droogtestress' voor groen (dit zijn dagen waarop minder dan 10% van de potentiële verdamping kan plaatsvinden). Dit aantal dagen is hier een maat voor de impact op het groen.



Figuur 0.1: Variabelen die waterbeschikbaarheid en -verbruik illustreren voor de wijktypen in hoog Nederland (HoogNL) met een leeflaag op de zandige ondergrond, en in laag Nederland (LaagNL) met een leeflaag op kleiige ondergrond (LL) en met een leeflaag op een zandige ophooglaag op klei (OH-LL).

Meeste droogtestress dagen in hoog Nederland

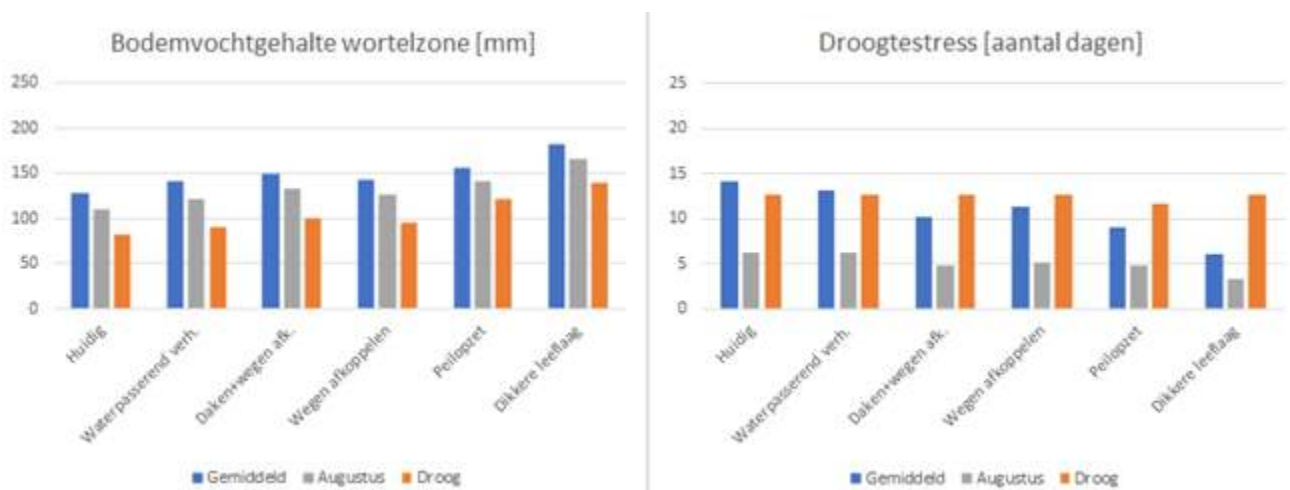
Door de verschillen in ondergrond en watersysteem is de waterbeschikbaarheid in hoog Nederland geringer dan in laag Nederland. Dit komt tot uitdrukking in een aanzienlijk lager bodemvochtgehalte en meer dagen waarop het groen droogtestress ondervindt.

In juli 2018 waren in hoog Nederland in elke wijk meer droogtestress dagen dan het totaal aantal in een geheel gemiddeld jaar. In een gemiddeld jaar treedt circa de helft van de droogtestress dagen op in augustus. In juli 2018 was dit aantal overal het 2 tot 3-voudige van een gemiddelde augustusmaand.

In laag Nederland veroorzaakt zandige ophooglaag toename van droogtestress
In laag Nederland, waar 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. Resultaat is een lager bodemvochtgehalte in de wortelzone en meer dagen met droogtestress.

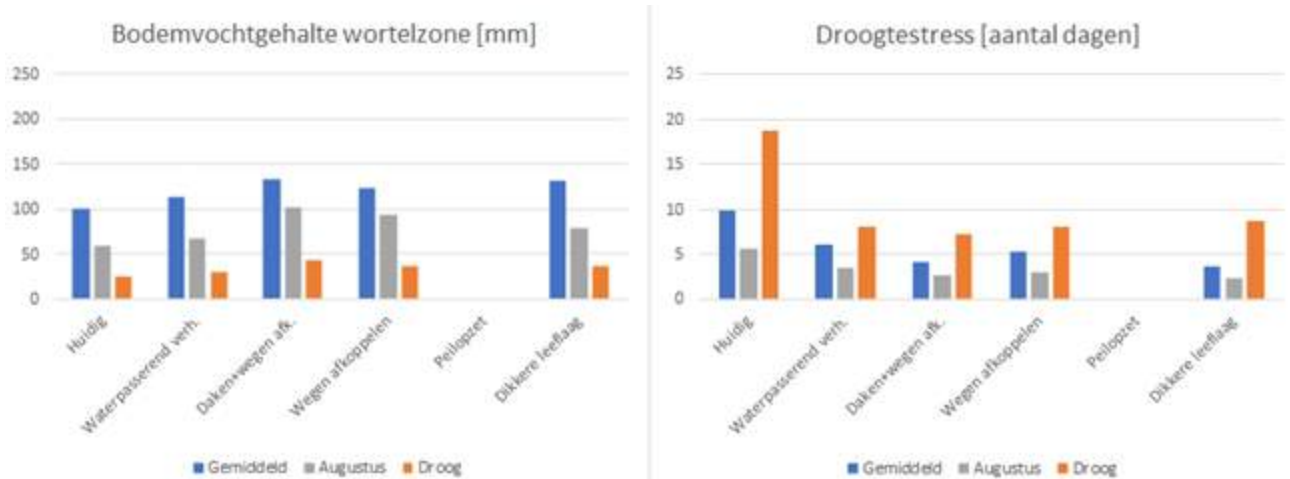
Maatregelen hebben beslist een positief effect. Maar ook maximale inzet van infiltratiemiddelen kan droogtestress in extreem droge jaren niet geheel voorkomen. De doorgerekende maatregelen zijn: toepassen van water-passerende verharding, afkoppelen van wegen naar groen, afkoppelen van wegen en daken naar groen, peilopzet van het oppervlaktewater (en daarmee het grondwater) en aanbrengen van een dikkere leeflaag (oftewel, bodemverbetering). De maatregelen zijn in de berekeningen gemaximaliseerd. Afkoppelen van het hemelwater riool betekent dus bijv. dat alles dat afgekoppeld kan worden ook is afgekoppeld. De resultaten worden getoond in Figuur 0.2 voor laag Nederland en in Figuur 0.3 voor hoog Nederland.

Belangrijk is te vermelden dat een maatregel 'keuze droogtebestendiger soorten' niet is doorgerekend. Wanneer de maatregelen het aantal dagen met droogtestress niet flink beperken, kan soortkeuze dus nog aanvullend profijt opleveren.



Figuur 0.2: effect van maatregelen in een Bloemkoolwijk in laag Nederland waarbij een leeflaag is aangebracht op een zandige ophooglaag, die ligt op een kleiige ondergrond ('huidig' = referentiesituatie).

In laag Nederland heeft het groen in gemiddelde jaren profijt van de maatregelen. Ze zijn dus zeker nuttig. 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. Maar voor deze maatregel is in tijden van schaarste extra wateraanvoer nodig, en dat moet zoveel mogelijk worden voorkomen.

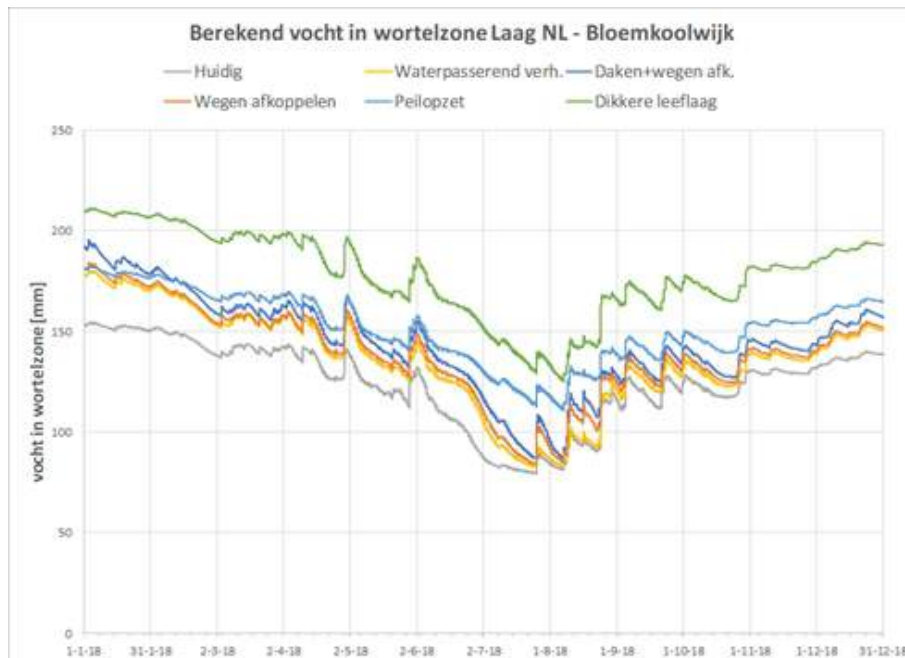


Figuur 0.3: effect van maatregelen in hoog Nederland in de situatie waarbij een leeflaag is aangebracht op zand. In hoog Nederland is geen oppervlaktewater. Daardoor is de maatregel 'peilopzet' niet toepasbaar en is hiervoor geen staafdiagram voor weergegeven (' huidig' = referentiesituatie).

In hoog Nederland zijn de maatregelen daarentegen altijd nuttig. Het aantal droogtestress dagen wordt hier in een extreem droog jaar met circa 50% gereduceerd. Vooral doordat de grondwaterstand via infiltratie van neerslag omhoog wordt gebracht. Door peilbeheer en drainage (om overlast te voorkomen) is dat grondwatereffect in laag Nederland minder prominent.

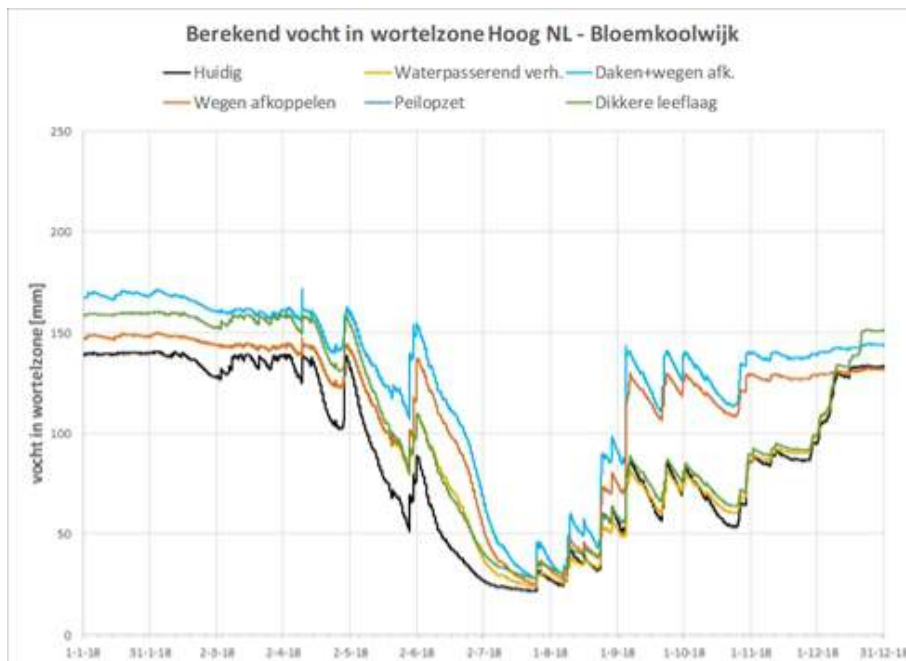
Maximaal infiltreren levert circa maand overbruggingstijd. Dat is niet genoeg in een extreem droog jaar

Een voorname vraag is: hoeveel droge dagen kunnen worden overbrugd met het extra geïnfiltrerde water? Figuur 0.4 en Figuur 0.5 laten dit zien aan de hand van het bodemvochtgehalte in de wortelzone, de toplaag van het bodemprofiel, gedurende 2018.



Figuur 0.4: verloop vochtgehalte in wortelzone bloemkoolwijk laag Nederland, in 2018, zonder (' huidig') en met maatregelen

In de grafiek van laag Nederland komt het positieve effect van verdikking van de leeflaag sterk naar voren. Het vochtgehalte ligt het hele jaar flink hoger. De lijn daaronder toont het effect van peilopzet. Extra infiltratie door het afkoppelen van daken en wegen levert ongeveer voor een maand extra vocht op. Maar dat wordt snel opgebruikt.



Figuur 0.5: verloop vochtgehalte in wortelzone bloemkoolwijk hoog Nederland, in 2018, zonder ('huidig') en met maatregelen

In de grafiek van hoog Nederland is die snelheid duidelijker te zien. Gedurende juni wordt het extra vocht geheel gebruikt en vanaf half juli, op de piek van de droogte, is de situatie met maatregelen nagenoeg gelijk aan die zonder maatregelen. Dit is de periode met de meeste droogtestress dagen, die in 2018 dus niet konden worden voorkomen via inzet van maatregelen.

Nogmaals, dat betekent niet dat maatregelen niet nuttig zijn. Er is beslist een positief effect. Maar in extreem droge jaren is de situatie dermate extreem, dat ondanks de maatregelen toch nog schaderisico's bestaan.

Bodemverbetering is altijd een effectieve maatregel. Door het verdikken van de leeflaag (bodemverbetering) wordt meer bodemvocht vastgehouden en is vanaf het begin van de droge periode meer vocht in de eveneens dikkere wortelzone beschikbaar. Dit is, uitgaande van de waterbalansuitkomsten, voor de vochtvoorziening van groen een effectieve maatregel die in ieder geval geen extra wateraanvoer kost.



Het beste van drie werelden beperkt de watervraag het meest. Het meeste voordeel wordt verkregen door bodemverbetering (groeiplaats) en infiltratie (vochtvoorziening) te combineren. Droogtestress wordt daarmee niet vermeden, zeker niet in extreem droge jaren, maar wel zoveel mogelijk beperkt. Een daarop afgestemde soortkeuze brengt de klimaatbestendigheid nog verder dichterbij.

Tijdens extreem droge jaren is ondanks maatregelen een noodzaak voor irrigatie niet volledig te vermijden. Extra vergroening zal daardoor tot een extra watervraag leiden, maar met bovenstaande aspecten op het netvlies, is deze watervraag wel te verkleinen. Een vereiste is dan samenwerking tussen disciplines. Ga als waterbeheer bijvoorbeeld meepraten over de grondslag (bodemopbouw) in nieuwbouwproject, gezien het belang daarvan voor droogte/nat schade, en daarmee voor de water aan- en afvoer. En ga samen rekenen om verrassingen zoveel mogelijk te voorkomen.

Financiële balans: wat weten we nu over de schade en hoe kunnen we ramingen verbeteren?

Het is zeker dat er schade optreedt, wat het nemen van maatregelen rechtvaardigt. Maar hoeveel kan aan maatregelen worden uitgegeven? Is dat te onderbouwen door een raming van de financiële schade? En hoe voer je zo'n raming uit?

Financiële droogteschade is nog niet betrouwbaar te ramen

Droogteschade uit zich in verschillende vormen. Enerzijds is er de direct zichtbare schade (de zgn. extra inboet) en anderzijds is er indirecte schade (meer uitval in de jaren na een droge periode, minder groei en daardoor minder CO₂-opslag en minder schaduw). Verder is er ook 'ongemerkt verlies', dat zich uit in geleidelijke aanpassingen van het groen door groenbeheerders, en kan het verlies van groen-baten als een schadepost worden beschouwd.

Over deze vormen van schade is zoveel mogelijk data verzameld en geanalyseerd. Daaruit bleek dat de data onvoldoende basis biedt om droogteschade betrouwbaar in te schatten. Het is niet mogelijk om de schade die specifiek door droogte wordt veroorzaakt, uit de cijfers te filteren. Dit komt ten dele doordat aspecten niet bijgehouden worden, zoals de precieze reden van inboet (er wordt soms wel bijgehouden wat is vervangen maar niet waarom dat is vervangen). Op basis van de geanalyseerde data lijkt daarnaast de piek van de ontstane (indirecte) schade nog niet overal te zijn bereikt, en kan die de komende jaren nog tot uiting komen. Droogteschade vormt zich gedurende een langjarig proces.

Er lijken, zoals verwacht, regionale verschillen te zijn in schades

De vergelijking tussen de beschikbare datasets geeft wel een beeld van de variatie in schades tussen gemeenten in Nederland. Er lijkt een verschil tussen de westelijke en oostelijke gemeenten te zijn. De westelijke gemeenten hebben een duidelijke toename in bomen met een (zeer) slechte conditie in de droge jaren (de piek ligt veelal in 2018). In het oosten lijkt de toename geleidelijk en is deze piek in 2020 nog niet bereikt. Dat sluit aan bij eerder beschreven regionale verschillen in kwetsbaarheid. Maar de term 'lijkt' wordt hier bewust gebruikt. De data analyse is te kort na de droge periode uitgevoerd om alle schade inzichtelijk te hebben.

Om schades betrouwbaar te ramen zijn meer en specifiekere data nodig

Uiteindelijk is het nodig om een bredere dataset over de conditie en schade aan groen bij te houden om onderbouwde uitspraken te kunnen doen over het effect van droogte op groen. Belangrijke zaken om te gaan bijhouden door alle drie disciplines: soort en de reden van inboet (veiligheid, zwamaantasting, insectenaantasting, ziekte, etc.), groeiplaats situatie (verharding, gras, beplanting, bosplantsoen), informatie over de (geo)hydrologische condities (bodemvocht, grondwaterstand, wateraanvoer vanuit omliggende ruimte, irrigatie). Door deze informatie systematisch te gaan bijhouden wordt het mogelijk om oorzakelijke verbanden te identificeren en betrouwbare ramingen te doen van de schades die specifiek door droogte zijn veroorzaakt. Maar ook voor andere doelstellingen is deze data erg bruikbaar. Zoals voor het bewaken van de continuïteit van de beoogde baten (ecosysteemdiensten) die het groen levert en voor het rekenen aan hydrologische aspecten (waterbalans).

Alleen door langjarig te monitoren en meten gaan we meer weten

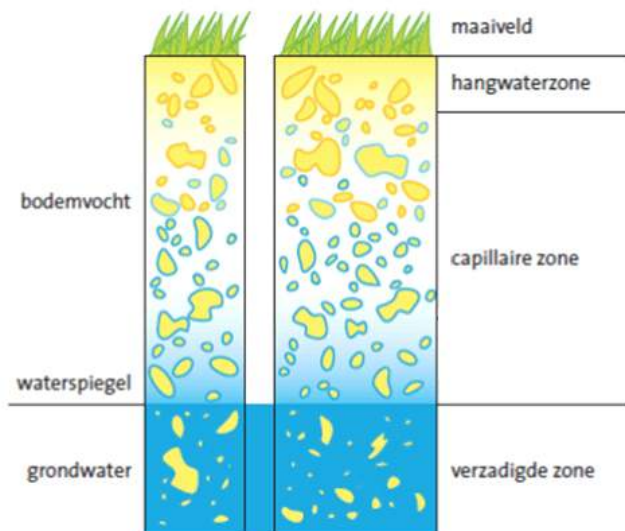
Voor het invullen van data- en kennishiaten is langjarig onderzoek nodig waarin metingen kunnen worden verricht en geanalyseerd. Dat langjarige aspect is essentieel om bruikbare data te verkrijgen. Er zijn momenteel verschillende van deze onderzoeken gaande die nieuwe, bruikbare resultaten zullen opleveren. Zodra deze resultaten beschikbaar zijn, ontstaan mogelijkheden om richtlijnen voor klimaatbestendiger groen aan te scherpen en daarmee schades verder te beperken en baten te maximaliseren.

1 Inleiding droogte en stedelijk groen

De afgelopen jaren is de aandacht voor droogte snel gegroeid. Vooral 2018 deed denken aan het historische droogtejaar 1976, maar daarna volgden nogmaals twee droge jaren. En ook het voorjaar van 2017 was extreem droog. Deze meerjarige droogte maakte duidelijk welke negatieve effecten langdurige droogte kan veroorzaken. Vooral in landbouw en natuurgebieden, maar ook in stedelijk gebied traden schades op. In dit paper wordt stapsgewijs ingegaan op de wijzen waarop droogte leidt tot schades aan stedelijk groen, en op de (on)mogelijkheden om deze schade te beperken. De eerste stap daarin wordt in dit hoofdstuk gemaakt door toe te lichten hoe in stedelijke gebieden het door droogte veroorzaakte watertekort doorwerkt op de vegetatie. In het stedelijk gebied spelen daarbij aspecten een rol die niet aanwezig zijn of anders zijn dan in landbouw- en natuurgebieden.

1.1 Droogte geeft problemen in de bodemvocht huishouding

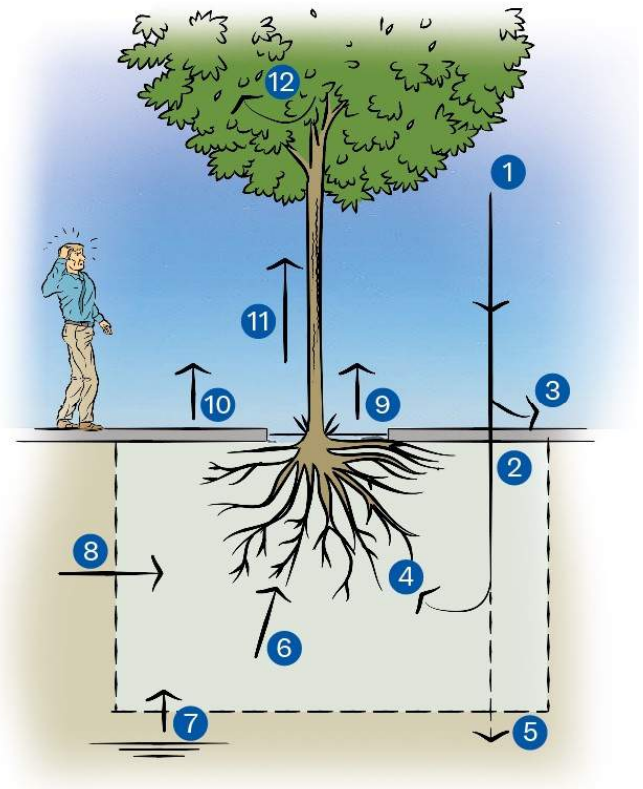
Onder droge omstandigheden vindt er aan het stedelijk oppervlak vooral verdamping (transpiratie) door vegetatie plaats. De hoge luchttemperatuur, zonnestraling en wind zorgen voor een hoge potentiële verdamping. Groen haalt haar water voornamelijk uit de onverzadigde zone van de bodem. Het water in die zone bestaat voornamelijk uit geïnfiltreerd regenwater dat in de bovengrond is achtergebleven ('hangwater') en uit grondwater dat via capillaire opstijging de wortels bereikt. Bij capillaire opstijging zuigen de poriën in de bodem zich vol met grondwater. Het sterkst in de nauwe poriën. In bodems met nauwe poriën (klei, leem) kan het water dan ook hoger stijgen dan in bodems met een grove textuur (zand). Stijging vindt plaats tot de hoogte waarop de zwaartekracht het wint van de capillaire werking. Door de capillaire nalevering daalt de grondwaterstand en daarmee de capillaire zone. Uiteindelijk kan die zone buiten het bereik van wortels komen te liggen. Figuur 1.1 geeft de ligging van de zones weer.



Figuur 1.1: verdeling van waterbronnen voor groen over het bodemprofiel (bron: naar afbeelding uit Kuipers, 1981)

Het grondwater, in de verzadigde zone, kan vanuit drie richtingen worden aangevuld, van bovenaf met (aangevoerd) regenwater, vanaf de zijkant door toestromend grondwater en in sommige gebieden van onderaf door kwel. Figuur 1.2 toont op een wat grotere schaal dan Figuur 1.1 voor een stadsboom de verschillende routes die water naar en vanuit de wortels aflegt. Dit zijn tegelijkertijd de variabelen die de waterbalans van de boom bepalen.

- 1 neerslag
- 2 infiltreert door het wegdek
- 3 stroomt af over de verharding
- 4 toevoeging aan watervoorraad en boomspiegel
- 5 zakt naar het grondwater
- 6 in de bodem gebonden vocht (vochtvoorraad)
- 7 capillaire opstijging uit het grondwater
- 8 zijdelingse aanvoer uit niet doorwortelde grond
- 9 verdamping vanuit de bovenlaag van de bodem
- 10 verdamping van regenwater vanaf (en door) de verharding
- 11 verdamping van opgenomen en getransporteerd water door de bladeren
- 12 verdamping van op de bladeren gevallen neerslag (interceptie)



Figuur 1.2: factoren die op de schaal van een standplaats de waterbalans van een stadsboom bepalen (bron: naar figuur in Cultuur Technisch Vademecum, 1988).

Groen functioneert optimaal wanneer er zoveel vocht in de bodem voorradig is dat het onbepikt kan verdampen. Bij een vochttekort en bij hoge temperaturen sluiten de bladeren als noodmaatregel hun huidmondjes om de verdamping en daarmee het fotosynthese proces te remmen. Maar die verdamping kan niet volledig en zonder consequenties worden gestopt. Wanneer het vochttekort te lang duurt, vermindert de celspanning in de bladeren en verwelken deze. Bij extreme, langdurige droogte kan daardoor blijvende schade en sterfte optreden. Daarin speelt ook de door verdroging vergrote vatbaarheid voor ziektes, plagen en schimmels een rol.

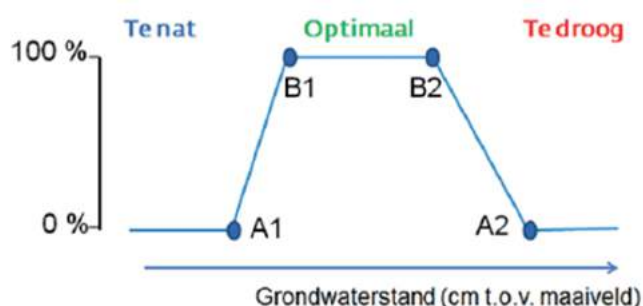
Het vochtgehalte van de onverzadigde zone, het totaal van het aanwezige hangwater en het via capillaire werking opgestegen grondwater, is dus een sleutelfactor in het ontstaan van droogteschade aan groen.



Figuur 1.3: verdorrende bladeren, zomer 2018

Teveel water, door overvloedige infiltratie van neerslag of kwel, in de bodem is overigens ook niet goed. Wortels hebben zuurstof nodig om te functioneren en die zuurstof kan alleen via met lucht gevulde poriën in de bodem de wortels bereiken. Een overmaat aan water verdringt de lucht en belemmert daarmee de zuurstofvoorziening. Wortels groeien daarom niet veel dieper dan tot enkele centimeters in de zone waarin de bodemporiën in de zomer volledig met water zijn gevuld. In de winter zijn wortels nauwelijks actief. Ze kunnen dan enige weken een hoge grondwaterstand verdragen.

Figuur 1.4 geeft schematisch weer hoe de grondwaterstand een voor een groensoort optimale variatie heeft.



Figuur 1.4: zolang de grondwaterstand binnen het optimale bereik varieert, is ook het vochtgehalte in de onverzadigde zone optimaal voor een groensoort. Bereikt de grondwaterstand punt A1, dan is het te nat. Daalt de grondwaterstand voorbij punt A2, dan is het te droog.

De situatie waarin het vochtgehalte van de bodem zo laag is geworden dat groen schade gaat ondervinden noemen we in dit paper 'bodemdroogte' of kortweg 'droogte'. Deze bodemdroogte wordt niet alleen veroorzaakt door de weersomstandigheden (tekort neerslag, veel verdamping), maar ook door verlaging van de grondwaterstand, en bodemdegradatie (afname organische stof, verzuring en eutrofiëring, afname bodemleven). De gevolgen van de atmosferische (klimatologische) droogte zijn groter als de grondwaterstanden gedaald zijn door de toegenomen dichtheid van drainagemiddelen, het verlagen van oppervlaktewaterpeilen, de verharding van het oppervlak en de toename van grondwateronttrekking. In steden is dat vaak het geval.

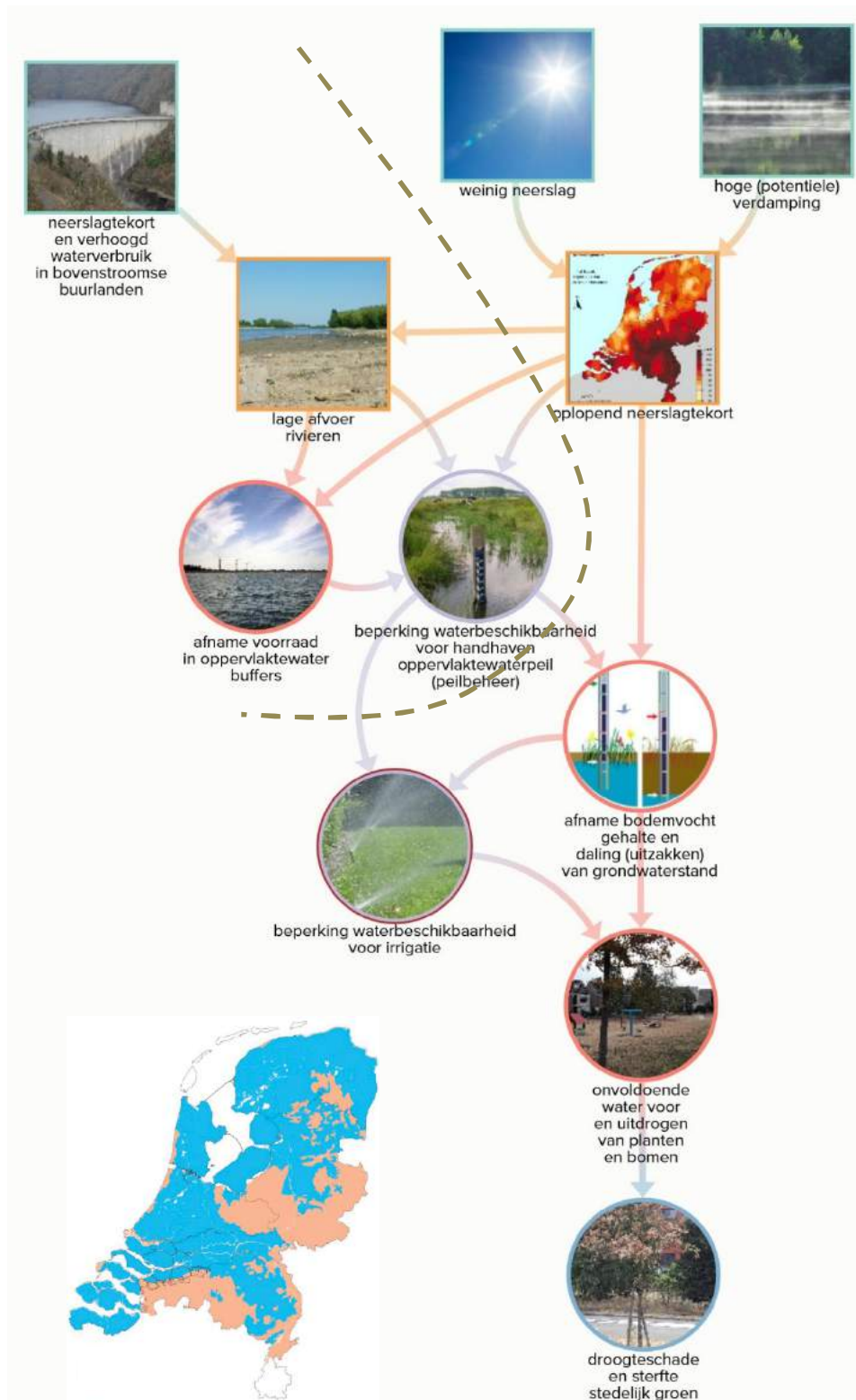
Verschillende definities 'droogte'

Afhankelijk van de sector of functie die er last van heeft, wordt 'droogte' anders gedefinieerd. Bodemdroogte is voor stedelijk groen de voornaamste verschijningsvorm van droogte. Voor bijvoorbeeld de scheepvaart betekent droogte dermate lage rivierwaterstanden dat minder lading kan worden getransporteerd. In de meteorologie (zie bijv. de KNMI droogtemonitor) wordt droogte uitgedrukt in het neerslagtekort (neerslag minus verdamping). In de landbouw is bodemdroogte ook een voorname factor, maar duidt de term droogte tevens op beperkingen in de extra wateraanvoer voor irrigatie.

1.2 Relatie tussen bodemprofiel en benutbare waterbronnen

Hoe bodemdroogte ontstaat en in welke mate groen hieraan wordt blootgesteld, verschilt al naar gelang de ondergrond- en watersysteemkarakteristieken op een locatie. De vochtvoorraad in de onverzadigde zone is vooral afhankelijk van het (regen)watervasthoudend vermogen bovenin het bodemprofiel, het hangwater. De hoger gelegen delen van Nederland zijn hier zelfs volledig van afhankelijk. De grondwaterstand daalt hier in droge zomers dusdanig ver, dat het capillaire water buiten het bereik van wortels ligt. In gebieden met een ondiepe grondwaterstand, in laag Nederland, profiteren bomen en struiken ook in de zomer van opstijgend capillair water.

Figuur 1.5 geeft weer hoe meteorologische droogte en lage rivierafvoeren leiden tot droogteschade aan stedelijk groen. Alleen in laag Nederland kan dit groen profiteren van de aanvoer van rivierwater en water uit grote buffers (zoals het IJsselmeer). Met dit water wordt het oppervlaktewaterpeil gehandhaafd. De grondwaterstand nabij de watergangen zakt daardoor in de zomer ook minder ver uit. Op grotere afstand van het oppervlaktewater daalt de grondwaterstand echter wel verder uit (holle grondwaterstand) en kan deze bij extreme droogte buiten het bereik van het groen komen te liggen.



Figuur 1.5: Oorzaak-gevolg keten op hoofdlijnen, van watertekorten naar droogteschade. Factoren links van de gestippelde lijn zijn alleen van invloed op de waterbeschikbaarheid in laag Nederland, dat in de kaart met blauw is gemarkeerd. Het is mogelijk om naar dit gebied water aan te voeren. Groen in het roze gebied, hoog Nederland (het wit afgebeelde Z-Limburg hoort hier ook bij), is voornamelijk aangewezen op hangwater (neerslag).

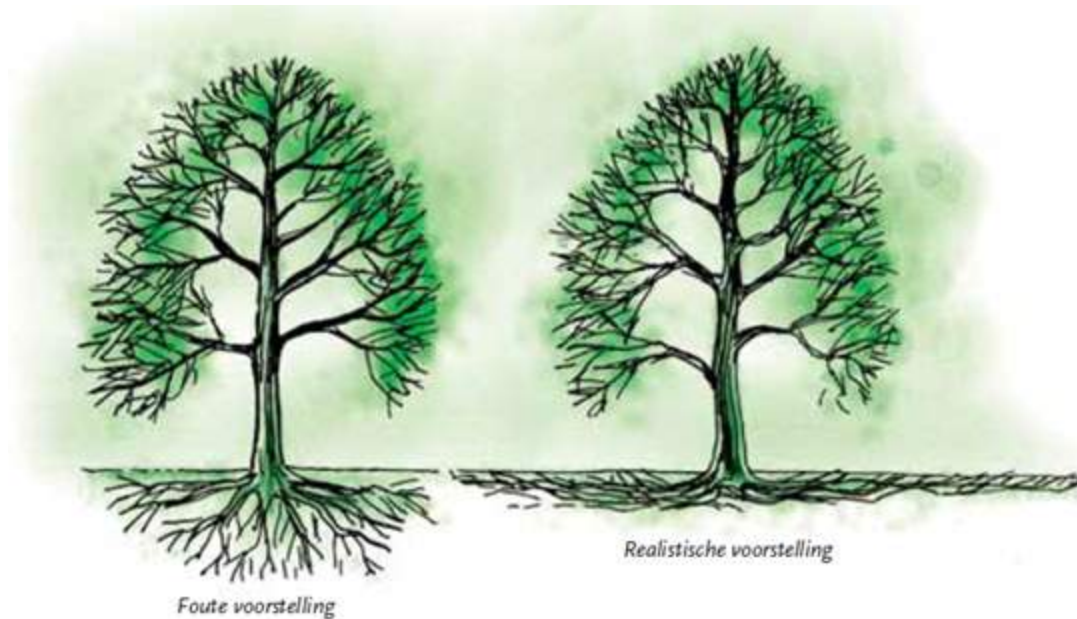
De bodemeigenschappen (korrelgrootteverdeling, lutum-/kleigehalte, gehalte aan organische stof), in combinatie met het bodemleven, helpen infiltrerend regenwater vast te houden, en beïnvloeden de capillaire opstijging. Dit is voor stedelijk gebied een voornaam punt. De bodem in de steden in laag Nederland bestaat zelden nog uit het natuurlijke bodemprofiel. Gebouwen, tuinen en een groot deel van de openbare ruimte zijn gerealiseerd op een aangebrachte, zandige funderingslaag. Op plaatsen waar tuinen en openbaar groen zijn voorzien wordt een 30-50cm dikke leeflaag aangebracht met humusrijkere aarde (zie Figuur 1.6). Dat gebeurt op bouwplaatsen in zowel laag als in hoog Nederland. Alleen grotere groenpartijen, zoals parken en grote plantsoenen, staan soms nog op de oorspronkelijke bodem.



Figuur 1.6: Kunstmatige leeflaag voor groen op zandcunet, nieuwbouwlocatie Zeist. De laagtes vormen ruimte voor funderingen van gebouwen en wegen.

Dit kunstmatige bodemprofiel, met een scherpe overgang van zand naar een humusrijkere, minder zandige leeflaag, heeft consequenties voor de vochtvoorziening. De grondwaterstand zal zich in de zandlaag bevinden. En zoals gezegd, is de capillaire opstijging in zand kleiner, waardoor het moeilijker is om hoog genoeg te komen om de wortels te bereiken. Het groen is in zo'n kunstmatig profiel dus in grotere mate afhankelijk van het hangwater, de neerslag of het irrigatiewater dat achterblijft in de bovengrond. Maar die bovengrond, de leeflaag, is voor die waterbuffering ook geschikt. Afhankelijk van de aandacht die aan de kwaliteit van de leeflaag is besteed, is die geschiktheid groter dan dat van het natuurlijke bodemprofiel. Er zijn dus positieve en negatieve aspecten verbonden aan dit kunstmatige bodemprofiel.

In relatie tot boomwortels moet hierbij worden bedacht dat de bulk van deze wortels zich in de bovengrond bevinden. Figuur 1.7 illustreert dit (en geeft daarmee aan dat de wortels in Figuur 1.2 niet geheel juist zijn gerepresenteerd). De dikke wortels dichtbij de stam zijn belangrijk voor stabiliteit. De dunnere wortels, verder verwijderd van de stam, zorgen voor opname van nutriënten en water.



Figuur 1.7: Voorstelling worteldiepte bomen (bron figuur: Agentschap voor Natuur en Bos (2008))

In gebieden met diepere grondwaterstanden (hoog Nederland) vormen bomen vaak wortels met afzinkers. Dit zijn wortels die zich verticaal naar beneden ontwikkelen vanaf de zijwortels. Hierdoor zorgen bomen voor extra toegang tot waterreserves en voor extra steun. Deze afzinkende wortels blijven groeien tot ze gestopt worden door een dichte laag, lage zuurstofconcentraties of de grondwaterspiegel. Zo komen hier wortels voor tot ongeveer 1 tot 1,5 meter diepte. Daar groeien en vertakken de wortels opnieuw horizontaal, waardoor een tweede laag horizontale wortels wordt gevormd. Meestal is deze tweede horizontale laag niet zo uitgebreid als de eerste die dichter tegen de oppervlakte ligt. Er zijn uitzonderingen, met wortels die tot enkele tientallen meters diep kunnen gaan. Maar dan gaat het meestal om zeer specifieke groeiomstandigheden of gespecialiseerde soorten (Agentschap voor Natuur en Bos, 2008).

Op hoofdlijnen kunnen drie situaties in de afhankelijkheid van de voornaamste waterbronnen, regen- en grondwater, worden onderscheiden:

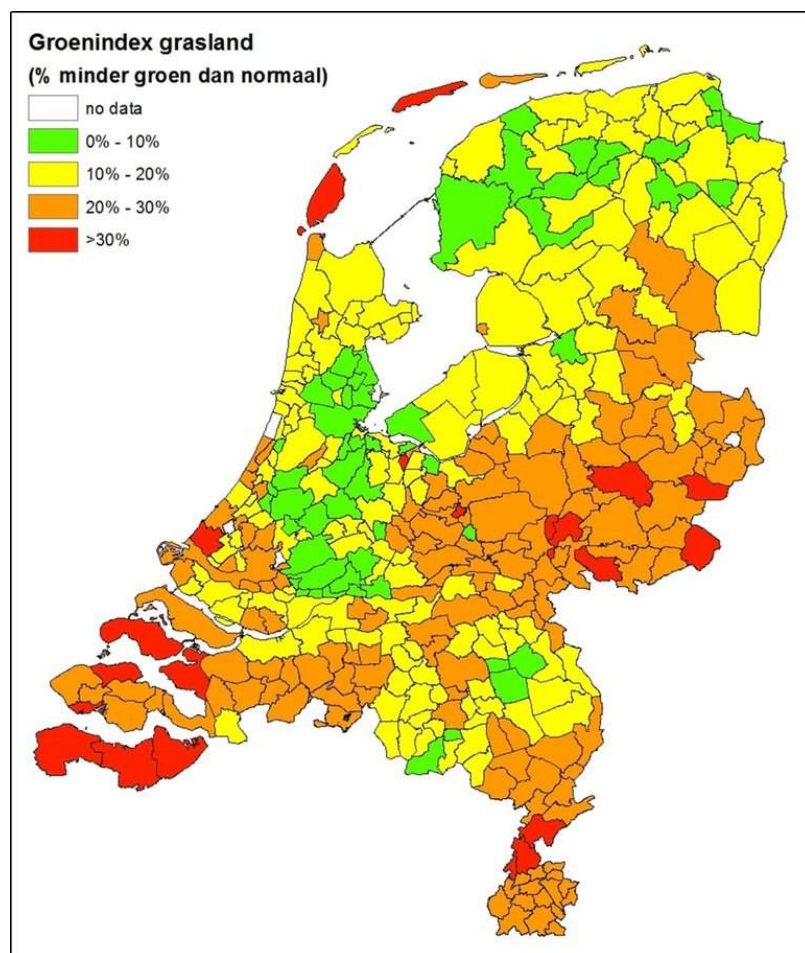
1. Deels regenwaterafhankelijk: Gebieden waar gedurende lange tijd de wortels gevoed worden vanuit het grondwater, maar waar in droge perioden het grondwater dieper kan wegzakken en het niet meer optimaal bereikbaar is voor de wortels. Hierdoor wordt de beplanting meer afhankelijk van de beschikbaarheid van hangwater (afkomstig uit de incidentele regenbuien en uit irrigatie). Voor de meeste bomen is een grondwaterstand van een ruime 1 meter beneden maaiveld, optimaal. In extreme droogtesituaties kan het grondwater zo diep wegzakken, dat de situatie in de winter na het groeiseizoen niet meer herstelt, waardoor de grondwatersituatie verandert naar de toestand beschreven onder 2.
2. Volledig regenwaterafhankelijk: Grondwater is nooit bereikbaar voor de wortels. Beplanting is afhankelijk van de hoeveelheid beschikbaar hangwater en aanvulling daarvan door neerslag. In droge periodes wordt de voorraad hangwater opgebruikt en raakt die geheel uitgeput.
3. Niet regenwaterafhankelijk: Grondwater blijft op geringe diepte beschikbaar, ook in droge tijden. Op plekken in Nederland staat het grondwater zo hoog dat dit niet ver genoeg daalt om voor beplanting niet meer beschikbaar te zijn. Hierdoor ondervindt het groen minder of geen gevolgen van de droogte periodes.

Voor stedelijk groen in hoog Nederland geldt hoofdzakelijk situatie 2. In laag Nederland situatie 1. Maar alleen bomen en diepwortelende struiken kunnen daar van het grondwater profiteren.

Gras en kruiden zijn nagenoeg altijd afhankelijk van het hangwater. Alleen in gebieden waar de grondwaterstand jaarrond erg hoog staat (circa <math>< 30\text{cm}</math> beneden maaiveld), zoals in de veenweidegebieden en Friesland, en er niet is opgehoogd, voedt het grondwater ook het gras en de kruiden, en geldt voor al het groen situatie 3.

Onder natuurlijke omstandigheden is groen in situatie 2 beter ingesteld op droge situaties. Vooral groen in situatie 1 is kwetsbaar voor droogte. 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. Wortels kunnen zich niet snel genoeg aanpassen door achter het grondwater aan te groeien of door zich zo uit te breiden, dat er beter van het hangwater kan worden geprofiteerd.

Figuur 1.8 illustreert waar welke situatie overheerst door middel van de verandering van de groenindex van gras, in stedelijk en landelijk gebied, in 2018. Het onderscheid tussen hoog en laag Nederland (zie kaartje Figuur 1.5) komt hierin naar voren, maar ook regionale verschillen in het neerslagtekort spelen een rol in het kaartbeeld (bv. Zeeuws Vlaanderen en Achterhoek).



Figuur 1.8: de impact van de droogte op de groenindex van grasland per gemeente als procentuele daling tussen 26 mei en 26 juli 2018 (bron: Groenmonitor.nl, Wageningen Environmental Research)

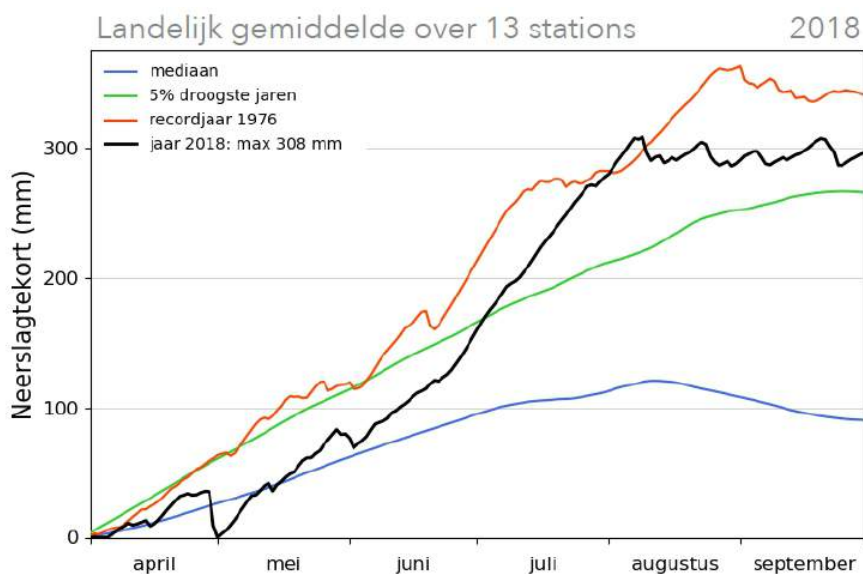
Resumerend is het zaak om het vochtgehalte van de hangwaterzone hoog te houden en de grondwaterstand hoog te houden, zonder dat dit tot te natte situaties leidt. In hoofdstukken 4 t/m 6 wordt beschreven hoe dit kan worden gedaan.

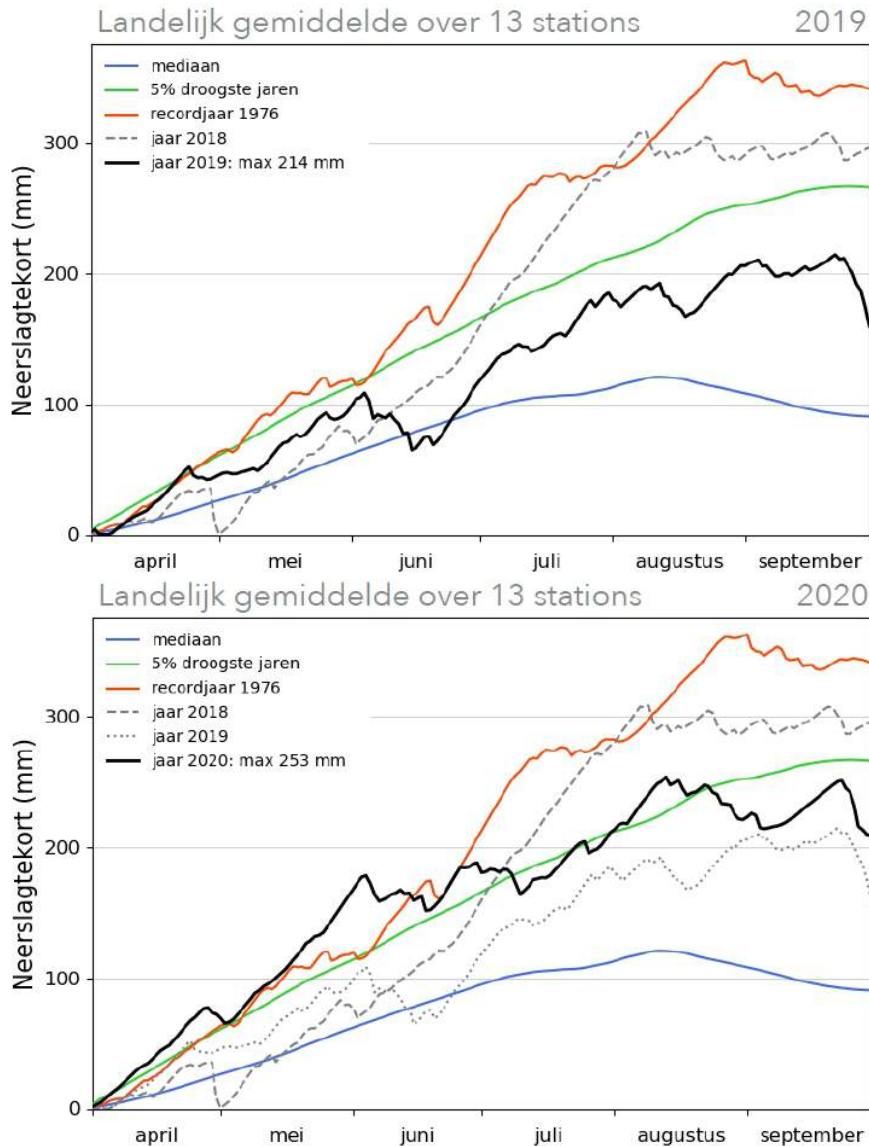
1.3 Droogte nu en in de toekomst

1.3.1 Vers in het geheugen: 2018, 2019 en 2020

De zomer van 2018 werd gekenmerkt door een lange droge periode. Dit werd veroorzaakt door een persistente keten van hogedrukgebieden boven Scandinavië. Dit soort hogedrukgebieden blokkeert de normale (westelijke) luchtstroom over Europa en houdt daarmee depressies (met de bijbehorende neerslaggebieden) op afstand. Het leidde tot grote neerslagtekorten, lage grondwaterstanden, lage waterstanden in de rivieren, meren en sloten, en als een gevolg hiervan, tot een grote bodemdroogte.

Er viel in 2018 gemiddeld over het land 607 mm neerslag. Dat is 240 mm minder dan normaal. Het landelijk gemiddelde neerslagtekort werd maximaal 309 mm. Daarmee komt 2018 op plaats 5 in de ranglijst van historisch droge jaren komt. 1976 staat op de eerste plaats in die ranglijst. De herhalingstijd van een droog jaar als 2018 is door het KNMI bepaald op ongeveer 1/30 jaar. Dit is de gemiddelde herhalingstijd voor geheel Nederland. Niet in het hele land was het maximale neerslagtekort gelijk aan de landsgemiddelde waarde. In delen van Gelderland, Overijssel, Zeeuws-Vlaanderen, Noord-Brabant en Limburg werd een hogere waarde van circa 350-370 millimeter bereikt. In Oost-Nederland was de situatie het ernstigste. De herhalingstijd van de droogte daar is in het huidige klimaat ongeveer 1/100 jaar. In andere woorden, elk jaar is er een kans van 1% dat deze situatie optreedt. Figuur 1.9 toont het neerslagtekort in 2018 en voor de gemiddeld iets minder droge jaren 2019 en 2020 (7^e op de ranglijst droge jaren). Het voorjaar van 2020, de start van het groeiseizoen, was wel extreem droog (Mens et. al., 2019).





Figuur 1.9: Neerslagtekorten in 2018, 2019 en 2020 (bron: KNMI.nl)

Het KNMI heeft over de periode 1965-2020 de volgende trends in het weer t.a.v. droogte waargenomen (KNMI, oktober 2021):

- Zomer: zwakke trend naar hoger maximaal neerslagtekort
- Voorjaar: grotere trend naar hoger neerslagtekort
- Trends zijn sterker in het binnenland dan aan de kust.

Voor het binnenland van Nederland is modelmatig aangetoond dat de toegenomen potentiële verdamping kan worden toegeschreven aan klimaatverandering.

In het Nederlandse klimaatgebied zijn planten aangepast aan droge periodes zonder neerslag die maximaal één maand duren. In 2018 duurde die periode plaatselijk meer dan 2 maanden (KNMI, november 2018).

1.3.2 Waar kan klimaatverandering toe leiden?

Klimaatverandering leidt tot grotere uitersten. Natte perioden worden natter en droge perioden langer en droger, hogere piektemperaturen en een stijgende gemiddelde temperatuur in het voorjaar, bij een nog steeds optredende kans op nachtvorst. Soorten die nu of in het verleden

zijn aangeplant voor de huidige omstandigheden, krijgen daardoor te maken met condities waartegen zij mogelijk niet bestand zijn.

In natuurgebieden zal dit via selectie en aanpassingen tot verandering in natuurlijke begroeiing leiden. Beperking van toekomstige droogteschade in het stedelijk gebied vraagt om ander beheer waarbij winterwater beter wordt vastgehouden, het watervasthoudend vermogen van de bodem wordt verbeterd en tegelijkertijd gebruik wordt gemaakt van groensoorten die minder water nodig hebben in de zomer. Maar er moet ook rekening worden gehouden met momenten of perioden van te veel water, waarbij natschade kan ontstaan. Dit is een precare balans, die vraagt om meer aandacht dan voorheen bij de aanleg en het onderhoud van groen.

De herhalingstijd waarmee een droogte als in 2018 optreedt in 2050, uitgaande van het droge KNMI'14 WH scenario, is 1/15 jaar. Nu is dat nog 1/30 jaar (KNMI, november 2018). De kans op extreme droogte is over 28 jaar dus al twee keer zo groot geworden, maar nog steeds een uitzonderlijke situatie. De toename van de kans op een serie opeenvolgende droge jaren, zoals 2018 t/mo 2020, is nog niet specifiek onderzocht, maar het ligt in de lijn der verwachting dat die kans ook in deze orde van grootte toeneemt.

Met de droogte neemt ook de voor stedelijk groen van belang zijnde hitte toe. Op dit moment zijn er over Nederland gemiddeld 4 tropische dagen (>30 graden) per jaar. In 2050 zijn er gemiddeld 13 tropische dagen, onder het WH scenario.

Gezien de levensverwachting van bomen en de levensduur van de inrichting van de openbare ruimte, moet met deze toekomstige omstandigheden nu al rekening worden gehouden om problemen en schades in de toekomst te voorkomen.

Wanneer uit deze verwachtingen een indicatieve norm wordt afgeleid, zou groen dat nu wordt gerealiseerd (liefst zonder hulp in de vorm van irrigatie) bestand moeten zijn tegen perioden zonder neerslag die langer duren dan 8 weken en waarin een neerslagtekort van circa 350mm optreedt. Dat is vooral voor hoog Nederland, waar het groen hoofdzakelijk afhankelijk is van hangwater, een opgave. Geheel bestand zijn tegen dergelijke omstandigheden lijkt niet haalbaar. Bestendiger worden is dat wel. Het vinden van een optimum tussen soortensamenstelling, inrichting van de groeiplaats en de wijze waarmee het vochtgehalte van de bodem kan worden beheerst, is dan essentieel.

2 Wat kenmerkt droogtebestendiger groen?

Groen in de stad heeft van oudsher als doel het creëren van een gezonde en prettige leefomgeving. Daarnaast biedt het meerdere ecosysteemdiensten. Hier is de laatste jaren steeds meer oog voor, onder meer door de toegenomen aandacht voor klimaatmitigatie, -adaptatie en biodiversiteit en de rol die groen in de stad daarbij kan spelen.

Het (stedelijk) groen komt echter de laatste jaren steeds meer onder druk te staan door de wijzigende klimaatomstandigheden en door de druk op de ruimte, boven- en ondergronds. Stedelijk groen neemt daardoor een bijzondere positie in bij klimaatverandering. Aan de ene kant kan het licht bijdragen aan klimaatmitigatie door het vatleggen van koolstof en bij goed beleid stevig bijdragen aan de klimaatadaptatie; aan de andere kant kan stedelijk groen ook schade ondervinden ten gevolge van de klimaatverandering. In dat laatste geval worden de positieve effecten ook verminderd.

De voor groen relevante wijzigende klimaatomstandigheden kunnen als volgt samengevat worden:

- *meer neerslag die geconcentreerder valt waardoor groen onder water komt te staan*
- *langere droge periodes, in het voorjaar en de zomer*
- *gemiddeld hogere temperaturen in alle seizoenen en een toename van hittegolven met hierdoor een grotere evapotranspiratie.*

Deze combinatie van omstandigheden heeft tot gevolg dat groen op cruciale momenten in het jaar te weinig water beschikbaar heeft wat kan leiden tot schade. Terwijl op andere momenten in het jaar te natte omstandigheden ook kunnen leiden tot schade. Om steden toekomstbestendig te maken en in te richten naar de wijzigende klimaatomstandigheden dient er rekening te worden gehouden met het groen en het effect dat de wijzigende klimaatomstandigheden op het groen hebben.

De belangrijkste eisen van klimaatbestendiger groen zijn dat het groen tegen langduriger droogte bestand is en dat het tevens bestand is tegen langere periodes met veel water waarbij op sommige plekken het groen zelfs onder water komt te staan. Dit kan op vijf manieren worden bereikt:

1. *Klimaatbestendigheid van de individuele boom of plant*
2. *Klimaatbestendigheid van de 'levensgemeenschap'*
3. *Klimaatbestendigheid door de inrichting van het groen i.r.t. de waterhuishouding*
4. *Klimaatbestendigheid door de mogelijkheid van wateraanvoer*
5. *Klimaatbestendigheid door de inrichting van het groen i.r.t. de biodiversiteit.*

Bovenstaande manieren om groen klimaatbestendig en met name droogtebestendig te maken komen neer op de drie sleutelfactoren:

- *soort*
- *groeiplaats*
- *vochtvoorziening.*

Deze drie factoren bepalen in combinatie met elkaar of het groen wel of niet droogtebestendig is. Als één van deze variabelen niet in orde is, lijdt het groen schade bij het optreden van droogte.

Om het voorgaande toe te lichten worden in dit hoofdstuk allereerst de verschillende groentypen die in de stad voorkomen gekarakteriseerd. Daarna wordt een beschrijving gegeven van de effecten van de wijzigende klimaatomstandigheden op het groen in de stad. Vervolgens wordt uiteengezet aan welke eisen groen moet voldoen om droogtebestendiger te zijn en hoe dit bereikt kan worden om zo tot een compleet beeld van droogtebestendiger groen te komen.

2.1 Stedelijke groentypen en groeiomstandigheden

Stedelijk groen bestaat uit veel verschillende soorten en maten groene elementen die vaak worden beschreven als verschillende beheercategorieën of groentypen. Het groen van deze beheercategorieën ondervindt op verschillende manieren de effecten van de wijzigende klimaatomstandigheden. De drie belangrijkste beheercategorieën die in dit rapport onderscheiden worden zijn de gras en kruidlaag, de struiken en de bomen (Benchmark gemeentelijk groen, 2021):

1) Gras en kruid laag

- Gazons: grasoppervlak met kort gras, bijvoorbeeld in gebruik als 'kijk'-gras
- Parken/speelvelden: grasoppervlak dat soms intensief wordt betreden
- Ruw gras: gras en kruiden die hoger uitgroeien; veel wegbermen, maar ook bloemrijke graslanden vallen hieronder
- Oevervegetatie: oevervegetatie groeit op terreindelen die direct verbonden zijn met of grenzen aan open water, of op terreindelen die een gedeelte van het jaar onder water staan, en een daaraan aangepaste vegetatie en beheer hebben.



Figuur 2.1: Bomen en kruidrijk grasland in stadspark, zomer 2020.

2) Struiken

- Beplanting van houtachtige, soms meerstammige planten, doorgaans hooguit enkele meters hoog (<5m)
- Bosplantsoen en opgaande heesters; vakken met opgaande struikbeplantingen.
- Geschoren hagen en heggen; lijnvormige struikelementen die aan een of meer zijden strak worden beheerd
- Sierheesters: houtachtige planten die in de regel niet meer dan manshoog worden waarvan takken niet dikker zijn dan 10 cm. Bijvoorbeeld: conifeerbeplanting. De bodem tussen de sierheesters wordt in de regel zwart gehouden
- Bodembedekkende heesters: Beplanting met een maximale hoogte van 0,60 m die door zijn natuurlijke groeiwijze (horizontaal) de bodem volledig bedekt
- Natuurlijke vegetatie: spontaan ontstane natuurlijke struikgewassen.



Figuur 2.2: verdorde struiken, zomer 2018, Utrecht.

3) Bomen

- Opgaande beplanting, één- of meerstammig die meer dan 5 meter hoog is of kan worden
- Niet vrij uitgroeiende boom, boom gesnoeid waardoor de stam vrij komt van takken
- Vrij uitgroeiende boom, boom die vrijuit mag groeien
- Vormboom, boom met knot, lei of geschoren vorm
- Stads- en parkbos: bomen in bosverband die niet individueel worden beheerd.

De beheercategorie die in dit paper niet is meegenomen zijn de *groene daken en groene gevels*. Het paper richt zich alleen op groen dat geworteld is in de bodem en onderdeel uitmaakt van de openbare ruimte.

Groen in de stad groeit meestal in moeilijkere omstandigheden dan in natuurlijke situaties. De groeiomstandigheden zijn slechter door bijvoorbeeld grondverdichting door verkeer en (bouw)werkzaamheden, verzilting door strooizout en regelmatig openen van de bodem voor werkzaamheden voor kabels en leidingen waarbij wortels worden verstoord/afgesneden. Ook kan in het stedelijk gebied meestal slechts een beperkt deel van de neerslag in de bodem infiltreren door verharding, bebouwing waardoor een hoge run-off optreedt. Bomen zijn 'opportunisten' en ze kunnen hun waterinname concentreren uit bepaalde plekken nabij de boom waar het water nog wel infiltreert (bijv. een nabije groene voortuin) maar in de dynamiek van de stad kan zo'n plek ineens betegeld worden of er wordt een kabel gegraven tussen deze plek en de boom.



Figuur 2.3: jonge, solitaire bomen vertonen eerder tekenen van droogtestress, zomer 2018, Utrecht.

Daarnaast wordt er bij roering in de grond (graafwerkzaamheden) naast het verstoren van de wortels na de werkzaamheden gebruik gemaakt van schrale grond (zand) wat de mogelijkheden om water vast te houden kleiner maakt. In stedelijke gebieden is meestal de precieze bodemsamenstelling op een plek niet bekend. Heel vaak is er door de historie van het menselijk gebruik een grote variatie van bodemeigenschappen over korte afstand, waardoor iedere vierkante meter anders kan zijn. Deze verstoringen en wisselende bodemomstandigheden zorgen ervoor dat groen in stedelijk gebied vaak een ongelukkige groeiplaats heeft met soms ook een gebrek aan (ondergrondse) groeiruimte en daardoor ook aan vochtbeschikbaarheid. Bij een goede aanleg worden de standplaats en beplanting op elkaar afgestemd. De uitdaging in de opvolgende beheerfase is de beplanting zodanig te begeleiden dat deze aanslaat en tot wasdom komt, waarbij daarenboven ook rekening wordt gehouden met deze standplaats bij de planning en uitvoering van civieltechnische werkzaamheden. Gelet op de levensduur van bomen moet hierbij in (vele) decennia 'gedacht' worden.

Door bebouwing en verstening treedt in de stad het "urban heat island" (UHI) effect op waardoor overdag en met name in namiddag, avond en eerste deel van de nacht in steden hogere temperaturen optreden, juist ook in warme periodes en hittegolven (Kluck, J., 2020). Door het UHI effect kan het groeiseizoen van stedelijk groen eerder beginnen en langer duren dan in landelijk gebied (Jochner, S. et al. 2015), waardoor ook de duur van de droogte toeneemt. Jong aangeplante bomen en struiken ondervinden daarnaast moeite met aanslaan als gevolg van hun nog onderontwikkeld (ondiep, niet ver rijkend) wortelstelsel en ondervinden daardoor sneller droogtestress (Smith, IA. et al., 2019).

Indien er met name in het groeiseizoen ook heel natte periodes optreden, dan kan dit de groeiplaats van bomen en groen nog verder onder druk zetten. Met name wanneer de hieruit resulterende waterbewegingen leiden tot meer kwel en daardoor stijging van het grondwater tot hoog in de bewortelde zone.

Al deze omstandigheden hebben tot gevolg dat groen in de stad extra stress ondervindt wat de groei en overlevingskansen van groen niet ten goede komt. Door de moeilijkere groeiomstandigheden en de wijzigende klimaatomstandigheden krijgt het groen in de stad het extra zwaar.

2.2 Wat maakt groen droogtebestendiger?

2.2.1 Aanpassen aan wijzigende klimaatomstandigheden

Als we kijken naar de wijzigende klimaatomstandigheden waar groen mee te maken krijgt zijn er meerdere aanpassingen die planten hebben die er voor kunnen zorgen dat zij klimaatbestendiger en daarmee soms ook droogtebestendiger zijn geworden.

Het watertekort in de bodem en de grotere hoeveelheid neerslag zijn beide randvoorwaardelijk voor klimaatbestendig groen. Klimaatbestendig groen zal aan de ene kant goed bestand moeten zijn tegen droogte. Daarnaast kan het ook zorgen voor de afvlakking van pieken in de afvoer van neerslag door berging en infiltratie in laagtes in het groen, wadi's en glooiende groene oevers. Op deze wijzen kan klimaatbestendig groen de infiltratie van water in de bodem bevorderen (Hiemstra, J., Factsheet groen in de stad 2018). Zo kunnen maatregelen om de droogtegevoeligheid te beperken ook bijdragen aan het beperken van de wateroverlast.

In een natuurlijk systeem is er een proces van natuurlijke selectie bij de (natuurlijke) verjonging van een bos of houtige opstand. Er zitten genetische verschillen tussen de duizenden zaailingen en de zaailingen die het best aangepast zijn aan nieuwe omstandigheden, maken de grootste kans om uit te groeien tot een volwassen boom of struik en zelf weer nakomelingen te verspreiden. In de meeste stedelijke beplantingen is geen ruimte voor natuurlijke of spontane verjonging, behalve in delen van sommige stads- en parkbossen en in bepaalde opgaande heestervakken (bosplantsoen). Bij aanplant van bomen en struiken is er geen sprake van dit natuurlijk selectiemechanisme. Dat zou op de boomkwekerij moeten plaatsvinden.

Een volgend punt waarmee rekening moet worden gehouden is de vorstbestendigheid van het groen en het daarbij in verlengde liggende tolerantie voor (strooi)zout. De vorstbestendigheid is van belang bij toepassing van planten uit meer zuidelijke regio's (bijvoorbeeld uit het Middellandse Zeegebied). Het klimaat verandert, maar het verschil in dag- en nachtlengte tussen Nederland en zuidelijker gelegen herkomstgebieden blijft en dat is de reden dat nachtvorsten in februari en eerste deel van maart minder frequent voorkomen in het zuiden door de geringe nachtlengte. Wanneer het in het voorjaar in Nederland warmer wordt dan kan een zuidelijker plant/boom al uit gaan lopen/in bloei komen, waardoor er bij late nachtvorst, nog steeds en ook de komende decennia normaal in het Nederlandse klimaat tot de IJsheiligen (11-14 mei), grote schade kan optreden aan deze plant/boom.

Zouttolerantie is van belang wanneer er in er in de wintermaanden gestrooid wordt met zout tegen gladde wegen en vooral voor groen dat zich dicht langs wegen bevindt waar gestrooid wordt.

2.2.2 Vereisten die horen bij droogtebestendiger groen

Naast bovenstaande eigenschappen van groen om te kunnen overleven in de wijzigende klimaatomstandigheden zijn er aanvullende vereisten, of randvoorwaarden, te noemen die groen droogtebestendiger maken. Het groen:

- Past bij het water-, bodem- en landschapssysteem ter plaatse. Rekening moet worden gehouden met welk groen er aangeplant wordt kijkend naar de natuurlijke of geconstrueerde landschapseigenschappen. De fysisch-geografische regio is van belang: Soorten die in West Nederland op veen- en kleibodems goed aanslaan kunnen op de hoge zandgronden minder succesvol zijn.
- Past voldoende bij de stedelijke context en de beschikbare boven- en ondergrondse ruimte, ook na uitgroei. Per standplaats verschilt de hoeveelheid beschikbare ruimte. Bij de aanplant van nieuw groen moet rekening gehouden worden met: de behoefte van het groen in de ondergrond, de ruimte bovengronds gelet op de boomgrootte van de boom en de verwachte of gewenste levensduur en groeisnelheid van het groen. Ter plaatse kunnen technische voorzieningen worden aangelegd die de beschikbare ruimte vergroten/verbeteren.
- Draagt bij aan de gewenste functionaliteit van de stad en het stedelijk groen:
 - Vermindert hittestress (verlaagt de gevoels- en/of luchttemperatuur) voor de bewoners en bezoekers van een stad. Groen in de stad kan als gevolg hebben dat de (gevoels)temperatuur daalt. 10% groen toename in de stad heeft gemiddeld een verkoelend effect van 0,5°C op de luchttemperatuur (Steenefeld, G.J., (2011).
 - Versterkt en verhoogt biodiversiteit in de stad. Een goede variatie in groen en toepassing van inheems plantmateriaal brengt zorgt voor meer biodiversiteit en levert daarbovenop een bijdrage als leef-, foerageer- en overwinteringsgebied van andere organismen. Groen in de stad kan leefgebied creëren voor vogels en insecten in de vorm van schuilplaatsen en voedsel. Tevens kunnen verschillende verbonden groengebieden in de stad verbindingroutes zijn voor andere organismen om zich te kunnen verplaatsen. Denk hierbij aan bijvoorbeeld een bij die via verschillende groengebieden in de stad de gewenste bloem kan bereiken. Wellicht ook naar natuurgebieden buiten de stad.
 - Versterkt en verhoogt de leefbaarheid en recreatieve waarde van een stad. Uit onderzoek is bekend dat een groene omgeving bijdraagt aan het geestelijk welbevinden van de burger (Hartig 2015, de Vries 2016). Ook is groen belangrijk voor aantrekkelijke verblijfgebieden.
- Vermindert kans op ziektes, plagen bij bomen en gezondheidsrisico's. Klimaatverandering en mondialisering vergroten de kans op het optreden van ziekten en plagen bij bomen. Om de risico's te beperken kan bij de aanplant van bomen de Santamour strategie 10/20/30 aangehouden worden. Dit houdt in dat in een stedelijke omgeving niet meer dan 10% van één soort, 20% uit één genus en 30% uit dezelfde familie aangeplant mag worden (Santamour, F. 1999). Hoewel tegenwoordig ook de nog voorzichtiger verhouding 5/10/15 in de literatuur wordt aanbevolen om klimaatrisico's te beperken.
- Is een mix van inheemse en uitheemse soorten. Zoals in de eerste twee punten besproken is het van belang rekening te houden met de milieu-omstandigheden waar het groen wordt geplant. Een tweedeling hierbij zou gemaakt kunnen worden voor meer stedelijke condities zoals stadsparken, pleinen, dicht bebouwde woonwijken en bedrijventerreinen versus het meer natuurlijke groen in parkbossen en stadsranden.
 - Bij pleinen, stadsparken, dicht bebouwde woonwijken en bedrijventerreinen is soms gekozen voor meer cultureel groen. Cultureel groen is vooral door de mens aangelegd groen wat niet van nature door natuurlijke successie op deze locatie zou groeien. Hierbij kan gekozen worden voor een selectie van groen die

meer uitheems is vanwege esthetische redenen en wenselijk eigenschappen bezit zoals bestand tegen vaak snoeien i.v.m. voorbij rijdende auto's of een meer zuilvormige kroonvorm in verband met beperkte bovengrondse groeiruimte. Ook de mate waarin soorten opgewassen zijn tegen klimaatopwarming en droge periodes kan bij de selectie worden meegenomen.

- o Bij meer natuurlijk groen kan gekozen worden voor inheemse soorten die beter bij het natuurlijke landschap passen en eventueel andere gunstige eigenschappen hebben. Echter moet, wanneer toegepast als klimaatbestendig groen, rekening worden gehouden met de wijzigende klimaatomstandigheden. Door de wijzigende klimaatomstandigheden kunnen de klimaatomstandigheden minder gunstig worden voor sommige soorten.
- o In meer stedelijke condities kan worden gekozen voor technische oplossingen om groen meer klimaatbestendig te krijgen. Dit speelt in verband met de kosten vooral in de stadscentra en andere hoogintensieve stedelijke gebieden. Hier kunnen bijvoorbeeld boombunkers worden aangelegd, soms zelfs met monitoring van het bodemvochtgehalte, waarbij automatisch ondergrondse watertoevoer wordt geregeld op het moment dat dit gehalte een bepaalde kritische ondergrens nadert. Deze systemen hebben hoge kosten, maar zorgen bij goede aanleg voor klimaatrobuustheid.

2.2.3 Hoe is droogtebestendiger groen te definiëren?

Kenmerken van klimaatbestendiger groen zijn dat het tegen langduriger droogte bestand is en dat het tevens bestand is tegen langere periodes met veel water waarbij op sommige plekken het groen zelfs onder water komt te staan. Daarnaast dient bij de selectie van klimaatbestendiger groen rekening te worden gehouden met de ecosysteemdiensten die men van het groen verlangt. Wanneer en hoe het groen aan deze eisen voldoet verschilt per soort, groeiplaats, vochtvoorziening en gewenste ecosysteemdiensten. Er is dan ook niet één soort groen die voor elk groentype de oplossing biedt.

Een precieze definitie van droogtebestendig groen is ingewikkeld. Dit hangt erg af van de eisen (buiten bovenstaande eisen) die eraan worden gesteld en de beheercategorie. Bijvoorbeeld wanneer een boom zijn bladeren afwerpt als reactie op droogte geeft deze boom nauwelijks schaduw meer, waardoor de hittestress in de stad niet meer wordt verminderd. Er is een verschil tussen wanneer groen goed groeit en wanneer het (nauwelijks) overleeft en erge schade ondervindt van droogtestress.

Per type groen verschilt dit ook. Een grasveld dat geel wordt door de droogte ondervindt minder schade dan een boom die zijn bladeren laat vallen door de droogte. Het gras herstelt namelijk weer snel, maar bomen kunnen blijvende schade ondervinden en/of hebben een sterk vertraagde groei, waardoor het langer duurt voor ze hun functie kunnen vervullen als dit moment al bereikt zou worden in een droger klimaat. Daarnaast kan gras makkelijk opnieuw ingezaaid worden tegen relatief lage kosten maar is de investering die verloren gaat bij een afstervende of kwijnende boom relatief groot door de jarenlange verzorging die erin is gestoken. Bovendien duurt het een flink aantal jaren voordat de ecosysteemdiensten van een verdwenen volwassen boom weer worden geleverd door de vervangende jonge aanplant.

Resumerend kan worden gesteld dat groen droogtebestendig genoeg is als (definitie):

het een periode van droogte goed kan doorstaan, ook als deze periodes in het groeiseizoen of meerdere jaren achtereen herhaald voorkomen. Een tijdelijke groeivertraging is daarbij overkomelijk, mits de beplanting na de droogte de draad weer kan oppakken. Droogtebestendig groen blijft ook in droge periodes zijn ecosysteemdiensten leveren. Alleen in extreme droogteperiodes kunnen sommige ecosysteemdiensten tijdelijk wat achterblijven.

2.3 Invulling eisen droogtebestendiger groen

Groen kan op verschillende manieren voldoen aan bovenstaande eisen om als klimaatbestendig en daarmee ook droogtebestendiger te kunnen worden bestempeld. Er is dus niet één oplossing, maar een combinatie uit een palet aan opties. Er zijn verschillende invalshoeken om de droogtebestendigheid te beoordelen. Er kan gekeken worden naar de bestendigheid van de:

1. individuele boom of plant
2. 'levensgemeenschap' als geheel
3. inrichting van het groen i.r.t de waterhuishouding
4. mogelijkheid van wateraanvoer
5. inrichting van het groen i.r.t. de biodiversiteit.

Het bovenstaande komt neer op het zoeken naar een voor een specifieke situatie optimale instelling van de drie sleutelfactoren: soort, groeiplaats en vochtvoorziening. Deze drie factoren bepalen in combinatie met elkaar of het groen wel of niet gedijt. Als één van deze variabelen niet (meer) aansluit op de anderen, lijdt het groen schade.



Figuur 2.4: Sleutelfactoren in de droogtebestendigheid van stedelijk groen

Bovenstaande vijf invalshoeken worden hieronder nader toegelicht, als voorbeelden van hoe deze in te vullen. Daarmee wordt een theoretische basis gelegd voor de praktische handelingsperspectieven die worden beschreven in hoofdstuk 5.

2.3.1 Individuele boom of plant

Bomen en planten kunnen een 'intrinsieke' weerbaarheid hebben tegen droogte door genetische eigenschappen, bijvoorbeeld doordat ze uit gebieden komen met een droger en warmer klimaat, bijvoorbeeld zuidelijker of zuidoostelijker van ons land. Echter dient hierbij wel rekening gehouden te worden met (nacht)vorstbestendigheid en zouttolerantie. De mate waarmee hier rekening moet worden gehouden verschilt regionaal. Op de boulevard van Vlissingen is zouttolerantie bijvoorbeeld belangrijker dan (nacht)vorstbestendigheid. Bomen en planten kunnen aanpassingen hebben waardoor water wordt bespaard in droogte tijden zoals het sluiten van de huidmondjes op het blad om zo verdamping tegen te gaan. Hierbij kan ook rekening gehouden worden met langdurige natte periode waarbij het groen onder water komt te staan.

Voorbeelden van bomen welke een hoge tolerantie hebben tegen droogte zijn onder andere: Spaanse Aak (*Acer campestre*), Valse christusdoorn (*Gleditsia triacanthos var. Inermis*), Doodsbeenderenboom (*Gymnocladus dioicus*), Ratelpopulier (*Populus tremula*), Sierpeer (*Pyrus calleryana*) en Acacia (*Robinia pseudoacacia*). Matige droogtetolerante bomen zijn onder andere: Noorse esdoorn (*Acer platanoides*), Gewone esdoorn (*Acer pseudoplatanus*), Witte Els (*Alnus incana*), Libanonceder (*Cedrus libani*), Japanse notenboom (*Ginkgo biloba*) en Grove den (*Pinus sylvestris*) (Hiemstra, Jelle 2018a.). Van de laatste soort (*Pinus sylvestris*, Grove den) is het stationsplein in Apeldoorn een mooi voorbeeld (zie Figuur 2.5). Hier is het groen geïntegreerd met het ontwerp in de stad en is het een goede soort die op deze plek wat

schaduw en daarmee verkoeling kan bieden en welke bestand is tegen de droogte maar vooral de relatie legt met Apeldoorn als stad en de omgeving waarin de stad ligt (de Veluwe).



Figuur 2.5: Stationsplein Apeldoorn met Grove den (*Pinus sylvestris*) aanplanting.

Wijzigende omstandigheden kunnen ook leiden tot genetische aanpassingen van soorten in het groen. Dit systeem functioneert behoorlijk goed in een natuurlijk bos, waar slechts enkele zaailingen uitgroeien tot nieuwe bomen. Naast de plek waar de zaailing wortel schiet speelt ook de genetische diversiteit tussen de zaailingen een rol bij de ontwikkeling van het bos. In het stedelijk ecosysteem vindt deze wijze van selectie bij bomen niet plaats. Maar hier kan de boomkweker en de beheerder wel zelf aan werken door gebruik te maken van materiaal van een goede herkomst, zoals beschreven in de Rassenlijst bomen van het Centrum genetische bronnen.

2.3.2 Combinaties van groen

Combinaties van groen kunnen leiden tot veranderde microklimaten wat tot gevolg kan hebben dat groen meer of minder droogte tolerant wordt. De verdamping van een solitaire boom is circa 1,5 maal hoger dan van bomen die in groepen staan en elkaar schaduw bieden (Klaarenbeek, R., et al., 2016). Solitaire bomen zullen daardoor sneller droogtestress ervaren. Onderbegroeiing onder bomen profiteert van het gematigder microklimaat hier en kan tevens bijdragen aan dit gematigde microklimaat, waardoor vocht beter vastgehouden kan worden.

2.3.3 Inrichting van het groen in relatie tot de vochtvoorziening

Planten kunnen zelf droogte tolerant zijn maar daarnaast kunnen de condities waar de plant groeit ook worden aangepast om de voor de plant benodigde groeiomstandigheden ook in droge periodes te kunnen leveren. Aanpassingen aan het milieu om de groeiplaats van de plant heen kunnen ervoor zorgen dat de plant gedurende droge periodes toch toegang heeft tot water. Bijvoorbeeld wanneer bij de inrichting van een groenstrook rekening wordt gehouden dat bij lange periodes van neerslag het water blijft staan zodat het infiltreert in de grond en niet gelijk wegstroomt naar het riool. Of het aanpassen van de bovengrond met doorlatende verharding of minder verharding, waardoor water in de bodem infiltreert en de bodem minder snel uitdroogt. Een aanpassing bij het beheer en onderhoud is bijvoorbeeld de introductie van watergeefrondes in droge tijden. Dit is niet in alle gebieden mogelijk, omdat gebruik van oppervlaktewater of leidingwater in droge tijden in hooggelegen regio's niet toegelaten wordt of niet wenselijk is.

Op grotere schaal kan de privé- en openbare ruimte zo worden ingericht dat er rekening wordt gehouden met het groen en de optimale groeiomstandigheden, inclusief de watervoorziening. Op stadsschaal kunnen wijken ontworpen of heringericht worden waar groene connecties kunnen worden gemaakt door middel van lanen van bijvoorbeeld bomen, grasvelden of rijen struiken gecombineerd met een juiste ondergrond en voldoende mogelijkheden voor waterinfiltratie (natuurlijke en waar nodig aangevuld met kunstmatige). In parken kunnen combinaties gemaakt worden van plant locaties van bomen om zo voldoende schaduw plekken te creëren. Straten kunnen zo ontworpen worden dat er plek (boven- en ondergronds) is voor bomen om op die manier schaduw te creëren voor de omgeving (W Klemm, 2017). Op deze manier kan er vanaf het begin bij het ontwerpen van stedelijk gebied rekening worden gehouden met het klimaatbestendig maken van het groen en de gewenste ecosysteemdiensten.

Naast op grote schaal groen in de stad te incorporeren kunnen met name in dicht verstedelijkte gebieden, zoals stadscentra op individueel boomniveau maatregelen worden getroffen om een boom klimaatbestendig te maken. Voorbeelden hiervan zijn: boombunkers, luchtdoorlatende verhardingstypen en andere bodem verbeterende aanpassingen. Boombunkers kunnen er in de stad voor zorgen dat de wortels van een boom voldoende ruimte hebben in een goede bodem met een goede vochtvoorziening, zodat ze goed kunnen groeien zonder last te hebben van bijvoorbeeld bodemverdichting, graafwerkzaamheden of uitdroging van de bodem.

2.3.4 Mogelijkheid van 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 gezorgd worden 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.

Combinaties van deze oplossing met technische oplossingen is ook mogelijk. In hoogstedelijke condities kan continue vochtmonitoring worden toegepast bij een boom, gekoppeld aan een systeem dat bij een vochttekort automatisch water aanvoert. Dit soort oplossingen brengen echter wel hoge kosten met zich mee en zijn niet op iedere locatie te realiseren.

2.3.5 Inrichting van het groen i.r.t. biodiversiteit

Een natuurlijke vegetatie heeft een groot aanpassingsvermogen. Dit aanpassingsvermogen is gestoeld op de heterogeniteit van de aanwezige plantensoorten en de genetische diversiteit binnen plantensoorten. Als de omstandigheden veranderen, bijvoorbeeld langere droge periodes, dan zal de ene plantensoort daar beter tegen bestand zijn dan andere. De samenstelling van de vegetatie zal geleidelijk veranderen en deze zal zich aanpassen aan de nieuwe omstandigheden. Binnen soorten zullen er genetische verschillen zijn tussen de droogtebestendigheid van de verschillende individuen/zaailingen. De meest droogtebestendige individuen zullen overleven en geleidelijk zal de genetische kwaliteit zich aanpassen.

In het stedelijk groen is er in delen van parkbossen, de ruwere struikbeplantingen en de bloemrijke graslanden sprake van een half-natuurlijk systeem, waar de vegetatie zich min of meer langs deze lijn kan aanpassen. Daar waar het meer cultureel groen overheerst en bij alle bomen/struiken/planten die geplant worden werkt dit anders. Hier kan de beheerder/(boom)kweker klimaatbestendigheid bevorderen door keuze/aanbieden van geschikt plantmateriaal.

Een ander onderdeel van klimaatbestendigheid van het groen is in hoeverre de in het groen aanwezige biodiversiteit (bijv. vogels, reptielen, insecten) kan overleven. Dit is een complexe samenleving van verschillende trofische niveaus, waarbij onder meer van belang is dat er jaarrond voedsel voor deze soorten aanwezig is, water beschikbaar en plaatsen om te nestelen, te overwinteren etc. Bij de boomsoortenkeuze en keuze van bloeiende planten is van groot belang dat deze gespreid door het groeiseizoen het voedsel produceren wat bijv. de wilde bijen en vlinders nodig hebben. Opgekweekte cultivars en uitheems plantmateriaal leveren soms geen of slechts een zeer beperkte bijdrage.

3 Invloed van landschap en stedenbouwkundige inrichting

In hoofdstuk 1 is de basis geschetst van hoe water en bodem functioneren in het aanbod van vocht voor groen. In hoofdstuk 2 is vervolgens ingegaan op het groen zelf, hoe het functioneert of hoe we willen dat het functioneert. Waar hoofdstuk 3 vervolgens ingaat op de schades die worden gezien door droogte bij groen, gaan we in dit hoofdstuk nader in op hoe landschap en stedenbouwkundige inrichting de levensvatbaarheid van groen in droge tijden beïnvloedt.

Bodem en waterkarakteristieken van verschillende landschapstypen zijn te bundelen in twee hoofdtypen: hoog en laag Nederland. Een classificatie naar wijktypen is bruikbaar om de (te verwachten) invloed van stedenbouwkundig inrichting op groen te karakteriseren, en om te bepalen welke maatregelen meer/minder kans op succes hebben.

3.1 Bepalende landschapkenmerken

Ondanks dat Nederland een relatief klein land is, heeft ze door haar ligging en de aanwezige grote wateren een aanzienlijke variatie in landschappen. Figuur 3.1 toont een kaart waarin landschapstypen zijn onderscheiden. Bij soortkeuzes voor beplanting in de stad is het zinnig te kijken naar het landschapstype. Immers op de veengronden doen andere soorten het beter dan op de rivierklei of in het kalkrijke heuvellandschap. En bijvoorbeeld ook het onderscheid tussen de zilte zeewind en het binnenland kan bepalend zijn in soortkeuzes.



Figuur 3.1: landschapstypen indeling volgens de zgn. Basiskaart Natuurlijk Systeem (bron: www.klimaat-effectatlas.nl)

Voor stedelijk groen relevante eigenschappen van de landschapstypen zijn het daarbij behorende reliëf, de bodemopbouw en de waterbronnen. Op basis van die eigenschappen zijn de typen verder te bundelen in twee hoofdtypen (zie hoofdstuk 1): laag Nederland (weinig reliëf, hoge grondwaterstand, klei/veen bodem) en hoog Nederland (meer reliëf, lage grondwaterstand, zandige bodem). Landschapstypen in hoog Nederland zijn de binnenduinrand, het dekzandgebied, de stuwwallen en het Limburgs heuvellandschap. Het groen is hier veelal regenwaterafhankelijk. De landschapstypen waar het groen meer kan profiteren van het grondwater (in andere woorden: niet/deels regenwaterafhankelijk groen), zijn het laagveen, voormalige hoogvenen, zeekeipolders en het rivierengebied. De grondwaterstand is hier hoog en wordt veelal kunstmatig beïnvloed door het oppervlaktwaterpeilbeheer.

Bovenstaande aspecten werken door op groeiplaatsen in de stedelijke omgeving. Maar andere 'natuurlijke' landschapskenmerken zijn niet of slechts van geringe invloed op het stedelijk groen. De groeiplaats is door de vele aanpassingen in de boven- en ondergrondse ruimte als het ware losgeweekt van het landschapstype. Daarom is geanalyseerd hoe een classificatie naar wijktypen onderscheid kan aanbrengen in de mate van te verwachten droogtestress, en leidend kan zijn bij de keuze van maatregelen om droogtestress te verminderen.

3.2 Ruimtelijke inrichting en wijktypen

Om de impact van wijkkarakteristieken goed te kunnen duiden is het belangrijk eerst de kenmerken te (her)kennen die een groeiplaats positief c.q. negatief beïnvloeden. De wijkopbouw verschilt door de jaren heen. De naoorlogse wederopbouw stelde andere eisen aan de woningen en wijken dan de moderne vinexwijken. Ook de inzichten over nut en noodzaak van voldoende (kwalitatief en kwantitatief) groeiplaats zijn bepalend en door de tijd heen veranderd. Hoe deze beide (wijken en groeiplaats) in elkaar haken en daarmee bepalend zijn voor het effect van droogte op groen in de stad wordt beschreven nadat de ontwikkelingen van groeiplaatsomstandigheden en wijkopbouw kort geschetst worden.

3.2.1 Inrichting groeiplaats

De groeiplaatsomstandigheden per boom of beplantingsvak zijn belangrijk voor de groei en levensverwachting van het groen. De kwaliteit van de groeiplaats wordt door verschillende factoren bepaald. Een goede opbouw van de groeiplaats zorgt dat het water beter kan worden vastgehouden dan wel beschikbaar is voor het groen. Daarnaast hebben de verschillende groentypen per standplaats een verschillende vochtbehoefte.

organisch stof percentage

Uit de verschillende interviews en literatuur¹ komt naar voren dat het percentage organisch stof cruciaal is voor de mogelijkheden om vocht in de bodem vast te houden, dat als bodemvocht voor bomen en ander groen beschikbaar is. Ter illustratie, straatzand heeft 70 liter vocht per m³ grond beschikbaar in een hangwaterprofiel. Terwijl een grondmengsel van matig fijn zand met 5% organische stof 150 liter per m³ grond beschikbaar heeft en een grondmengsel van matig fijn zand met 8% organische stof wel 200 liter vocht per m³ grond beschikbaar heeft.

¹ O.a. Stadsbomenvademecum deel 2, groeiplaats en aanplant



Figuur 3.2: Zichtbaar effect van bodemverbetering tijdens droogte. Op de standplaats van de bomen is de bodem verbeterd en is in de hangwaterzone voldoende vocht aanwezig om ook het omliggend gras nog van vocht te voorzien.

Groeiplaats volume

Het percentage organische stof is dus een zeer belangrijk criterium voor het vochtvasthoudend en dus vochtleverend vermogen van de bodem. In een stedelijke omgeving is dit vaak maar beperkt aanwezig. Daarom is een groeiplaats van voldoende omvang erg belangrijk. Als uitgangspunt kan worden genomen dat per veerwacht levensjaar 1m³ groeiplaats toegepast dient te worden.

Qua doorwortelbaar volume wordt rekening gehouden in laag Nederland met een groeiplaatsverbetering tot 70 cm beneden maaiveld. In hoog Nederland wordt 1,00 meter beneden maaiveld aangehouden als gangbare diepte voor bomen om te wortelen, wetende dat er altijd soorten zijn die dieper of ondieper wortelen en locaties die dieper of ondieper wortelen mogelijk maken.

In verschillende handboeken is dit veralgemeniseerd naar omvang van de boom (1^e, 2^e of 3^e grootte boom). Alternatief is om per levensjaar 1m³ groeiplaats per te verwachten levensjaar of om per m² kroonoppervlak bij een volgroeide kroon 1m³ groeiplaats te hanteren. Bij vormbomen (bomen met een gekweekte bijzondere kroonvorm, zoals zuil- of bolvormig, of leibomen) geeft dit echter geen representatieve hoeveelheid en dient een factor x te worden toegepast. Idealiter kunnen onderstaande hoeveelheden worden aangehouden voor hoeveelheid bodemverbetering.

Tabel 4.1 benodigde doorwortelbare ruimte per boom – Handboek bomen

RICHTLIJNEN: MAATVOERING BOMEN EN GROEIPLAATS (LEIDRAAD)				
Volgroeide maatvoering (eindbeeld)	Kroondiameter	Stamdiameter	Doorwortelbare ruimte m ³ (hangwaterprofiel)	Doorwortelbare ruimte m ³ (grondwaterprofiel)
Volwassen boom (beoogd eindbeeld)				
1^e grootte	> 20 m	> 80 cm	80 - 120 m ³	50 - 60 m ³
	15 - 20 m	60 - 80 cm	40 - 70 m ³	25 - 40 m ³
	10 - 15 m	40 - 60 cm	30 - 50 m ³	20 - 30 m ³
1^e of 2^e grootte	8 - 12 m	30 - 40 cm	20 - 35 m ³	15 - 20 m ³
3^e grootte	3 - 5 m	15 - 25 cm	10 - 20 m ³	5 - 10 m ³
vormboom	2 - 4 m	20 - 40 cm	4 - 8 m ³	3 - 5 m ³
<i>Gewenste obstakelvrije zone bovengronds vanuit het hart van de boom = kroondiameter (beoogd eindbeeld) x 0,6</i> <i>Gewenste obstakelvrije zone bovengronds vanuit het hart van de boom = kluitdiameter (beoogd eindbeeld) x 0,6</i>				

Het doorwortelbaar volume met een goed percentage organisch stof is erg belangrijk voor de vochtlevering. Het is algemeen bekend dat een boom een grote aantal m³'s nodig heeft, echter dit is niet altijd in de situatie toepasbaar / betaalbaar.

Een diep wijdvertakt wortelstelsel is het sterkste wapen tegen droogte. Beperking van de wortelgroei door een te klein doorwortelbaar volume of storende bodemlagen dragen bij aan de droogtegevoeligheid.

Net aangeplante bomen hebben een zeer klein wortelstelsel (alleen de kluit) en zijn daarom in hun eerste jaren extra gevoelig. Irrigatie is dan ook in gemiddelde zomers noodzakelijk om hen te laten overleven.



Figuur 3.3: door gebrek aan irrigatie gestorven jonge aanplant, naast sloot met hoog peil, zomer 2018

Aanwezigheid 'buurgroen' (grotere groeneenheden) en verdampingskenmerken

De verschillende soorten groen verdampen verschillende hoeveelheden vocht. Wintergroene beplanting (grassen en naaldbomen bijvoorbeeld) verdampen het hele jaar door. Loofbomen verdampen met name in het groeiseizoen. Hoeveel een boom verdampt is afhankelijk van de soort, maar zeker ook van de standplaats. Waar gesproken wordt over kroonprojectie wordt het volgende gehanteerd: *Kroonprojectie is de oppervlakte van de boomkroon op de breedste plek. Een hele smalle boom zoals een cipres heeft een kroonprojectie van 1 m² terwijl een oude eik wel een kroonprojectie kan hebben van meer dan 200 m².*

Of een boom solitair in bestrating of tussen andere bomen in een parkomgeving staat is mede bepalend voor de verdamping van een boom. In dit onderzoek zijn de volgende uitgangspunten voor verdamping aangenomen.

- Een volwassen boom verdampt gedurende een groeiseizoen (april-oktober) 400 tot 800 liter water per m² kroonprojectie
 - 400 l/m²: voor bomen centraal in bomengroepen, parkhout, beschutte situaties, enz.
 - 600 l/m²: voor laanbomen, bomenrijen, vrijstaande bomen in open veld enz.
 - 800 l/m²: voor solitaire bomen in verharding aan zuidzijde van bebouwing
- een grasmat van 10 cm zonder watertekort verdampt gemiddeld iets meer dan 500 l/m² gedurende een heel jaar
- Voor bomen en bosplantsoen wordt een gelijke uitgangspositie gehanteerd, te weten bomengroepen. *(Vanwege de openbaar beschikbare data worden sierplantsoenen meegenomen in de studie als bosplantsoen. De verwachting is dat het sierplantsoen minder zal verdampen, nadere uitwerking hiervan kan in een vervolgstudie worden onderzocht.)*

- Er is onderscheid in de jaarrond verdampingswaarden van bladverliezend groen en jaarrond groen. Echter omdat droogtestress vooral in het groeiseizoen optreedt wordt dit verder buiten beschouwing gelaten.
- Omdat het met openbare data niet mogelijk is om op soortniveau te analyseren, wordt een algemene verdampingswaarde per boom gehanteerd. Er zijn echter grote verschillen tussen soorten in waterverbruik. Waarbij de *Salix alba* (niet de knotvorm) meer dan 150 liter water per m² blad verbruikt, terwijl de *Acer platanoides* nog geen 60 liter water per m² blad verbruikt (*verbruikte vocht is niet gelijk aan verdamping*). Bij soortkeuzes in nieuwe situaties kan rekening worden gehouden met de hoeveelheid water die een boomsoort nodig heeft.

Reflectie of schaduw van bouwwerken

De standplaats van een boom (of ander groen) ten opzichte van bebouwing kan sterk bepalend zijn voor de droogte- en hittestress die een boom kan ervaren. Door een groot aandeel spiegelen van glas of een licht gekleurde bouwmaterialen kan zonlicht naar de boom weerspiegelen, waardoor er een extra temperatuurstijging en bijbehorende watervraag optreedt.

Beschikbaarheid grondwater

De wortels van bomen en planten kunnen het grondwater niet van onbeperkte diepte aantrekken. De mate waarin verdroging optreedt is hiervan mede afhankelijk, immers bij een diepe grondwaterstand en geen aanvoer van hemelwater, is er voor het groen op gegeven moment geen vocht meer beschikbaar.

De mogelijke levering / aantrekking van grondwater wordt bepaald door de grondsoort en afstand van wortels tot grondwater. Afhankelijk van de grondsoort kan de kritieke stijgafstand worden bepaald.

Aanwezigheid oppervlakte- en hemelwater

Zoals genoemd is het lastig om een uniforme uitspraak te doen over de grondwaterstanden in relatie tot de droogtestress per ruimtelijke standplaats. De aanwezigheid van oppervlaktewater geeft mogelijkheden tot bewatering en daarmee kan dit een oplossingsrichting zijn wanneer er sprake is van verdroging in een gebied.

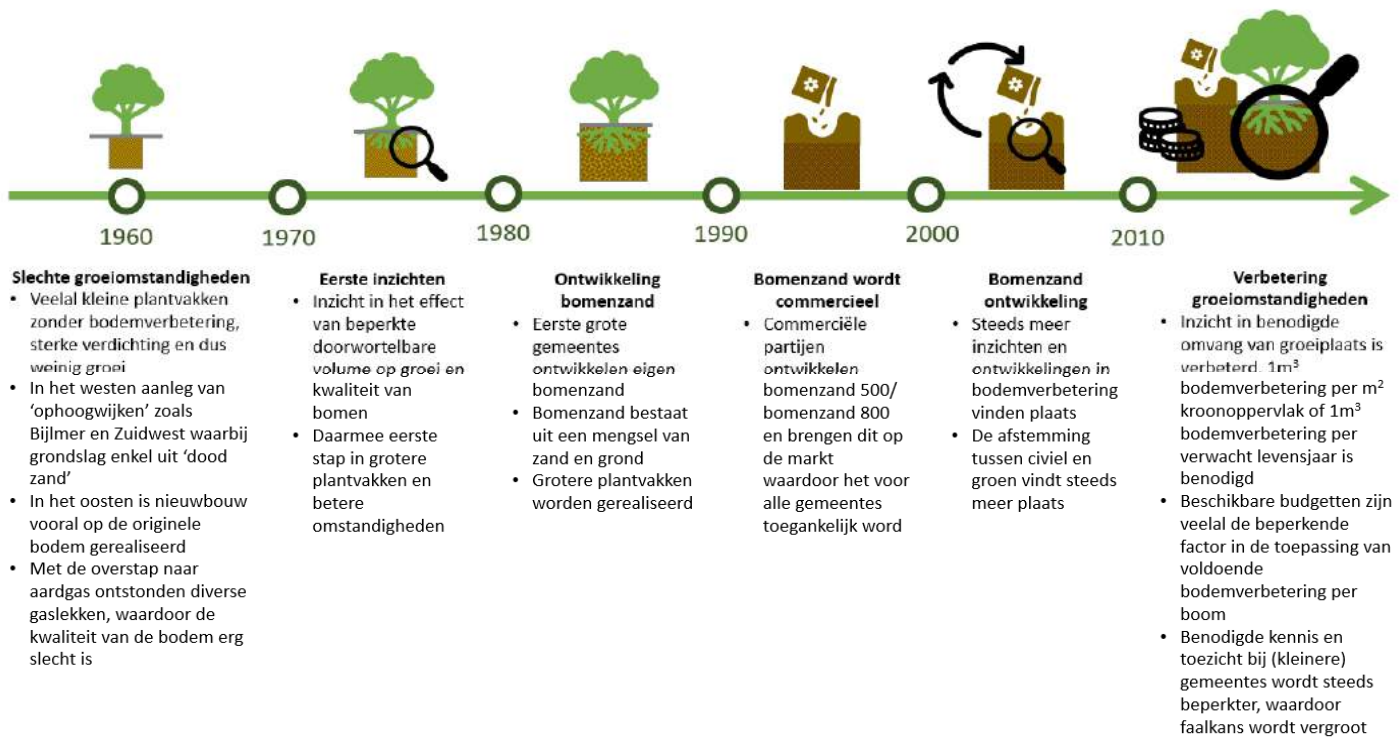
Bij nieuwbouw is afkoppelen van hemelwater een uitgangspunt, waardoor de wateraanwas groter is dan bij oude wijken waar hemelwater allemaal wordt afgevoerd. Het verdient de aanbeveling om in een vervolgstudie te kijken hoe verdroging vermindert met afkoppelen. Dit zelfde geldt voor het bijvoorbeeld aanbrengen van verharding met infiltratiemogelijkheden (halfverharding, waterdoorlatende verharding, e.d.). Door de toepassing hiervan bij bijvoorbeeld trottoirs of parkeervakken wordt er minder hemelwater afgevoerd en is er dus meer aanvoer van water.

Andere bepalende aspecten

In de gebiedsanalyses is onder meer gekeken naar de aanwezigheid van privaat groen. Het verdient nader onderzoek in hoeverre privaat groen kan bijdragen aan een goede groeiplaats van bomen in de verharde openbare ruimte. Onderzoek wijst uit dat veelal straatbomen wortelen in nabije (voor)tuinen.

Bij de stedelijke ontwikkeling is de bodem veelal sterk geroerd en verdicht. Originële grondsoorten zijn vaak niet of nauwelijks meer herkenbaar door ophoging of afgraving. In de afgelopen ruim 50 jaren hebben er verschillende ontwikkelingen plaatsgevonden wat betreft de groeiplaats van bomen in de stad. Figuur 3.4 geeft de ontwikkeling door de tijd op hoofdlijnen weer².

² Interviews gehouden met Hans Kaljee, bomenadviseur gemeente Amsterdam en Ben Bakkenes, bomenadviseur gemeente Hardenberg, zomer 2021



Figuur 3.4: Schematische weergave historische groeiplaatsontwikkeling bomen in de stad

3.2.2 Classificatie van inrichting in karakteristieke wijktypen

De inrichting van een Nederlandse wijk is vaak kenmerkend voor een bepaalde tijd. De typerende eigenschappen van wijken vinden we overal in Nederland terug. We kunnen daarom wijken indelen in een typologie. Voor de Klimateffectatlas is een onderverdeling naar wijktypen gemaakt die gebaseerd is op de classificering van Kleerekoper (2016). Niet alleen de ontwikkelen van de groeiplaatsomstandigheden in de tijd zoals hierboven besproken zijn hiermee kenmerkend per wijktipe, maar ook het percentage groen en water, de opzet van de riolering (en hiermee waterbeschikbaarheid) zijn kenmerkend per wijktipe. We hanteren daarom ook voor deze studie de indeling naar wijktypen. Afhankelijk van de leeftijd van de wijk zijn veelal generieke uitgangspunten te nemen, waarop aanpassing van het groen kan worden gebaseerd.

- Historische Binnensteden <1900: weinig ruimte voor groen maar groen dat er is wordt zuinig mee omgegaan (vaak monumentaal). Ook middelen beschikbaar om groen "technisch" in te passen
- Stedelijk bouwblok > 1900: 4-8 lagen; geen voortuin op straatniveau veel grote bomen, niet in alle steden aanwezig
- Jaren 30: tuindorp en volkswijk: kenmerken zich door veel privaat groen; weinig straatbomen en groenvakken
- Naoorlogse wijken: veelal straten met een zelfde opbouw als de jaren 30 wijken en volkswijk maar veel groen om de wijk heen (parken en verbindingswegen / lanen)
- Tuinsteden (alleen grote steden): open bouwblok structuur met veel groen, aandachtspunt bij verdichting en parkeerdruk maar verder weinig problemen bij groen
- Hoogbouw: niet in alle steden aanwezig.
- Jaren 80: bloemkoolwijken met meer aandacht voor groen, in de straten veelal kleine plantvakken, ruimte voor groen tussen de straten in plantsoenen en groene zomen om de wijk heen gemengd met water

- Vinex: onderscheid tussen oudere en nieuwere wijken, maar in standplaats veel verharding en veelal enkele grotere bredere (ontsluitings)wegen met een hoofdgroenstructuur en kleinere straten met minder groen (dit verschilt per wijk), sommige wijken hebben veel water met oeverbegroeiing.

Op basis van historie en inrichting kunnen binnen Nederland acht wijktypen worden onderscheiden. Een aantal van deze wijktypen hebben vergelijkbare groenkenmerken en zijn daarom gebundeld. Wijktypen die buiten stedelijk gebied vallen zijn buiten beschouwing gelaten. Ook historische binnensteden zijn hier niet verder beschouwd. De omstandigheden daar zijn per stad zeer specifiek, waarvoor gemeentes veelal een eigen visie en aanpak formuleren.

Wijktypenkaart Nederland

Om op stadsniveau inzicht te krijgen in de risico's voor droogtestress en welke handelingsperspectieven toegepast kunnen worden is een soortgelijke methodiek gebruikt als gebruikt door Kleerekoper (2016). Representatieve oppervlakteverhoudingen tussen de landgebruiksvorming binnen de openbare ruimte en privaat terrein zijn voor drie wijktypen onderscheiden. Dit is op basis van heel Nederland gedetermineerd waardoor openbare data aan de orde is. De basiskaarten Wijktypologie, Boom per buurt, Groen per buurt, Grijs per buurt en Water per buurt van de Klimateffectatlas zijn hiervoor gebruikt. De Wijktypologie kaart is aangepast om alleen oudere woonwijken, bloemkoolwijken en vinexwijken te tonen. Deze is vervolgens gebruikt om een uitsnede te maken van de percentage bomen, groen, grijs (verharding) en water per wijktype. Omdat het Nederlandsche landschap grofweg onderverdeeld kan worden in hoog en laag Nederland is deze verdeling ook toegepast op de wijktypologie en kenmerken. Hiervoor is de Landschapstypenkaart van Deltares gebruikt. Aan de hand van de kaartlagen en uitsnede is een overzicht gemaakt van de kenmerken per wijktype in de openbare ruimte en op privaat terrein. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen oudere woonwijken, bloemkoolwijken en vinexwijken in hoog en laag Nederland.

Via analyse van groenkenmerken en selectie zijn er drie wijktypen onderscheiden die landsdekkend vrij algemeen geldende kenmerken bezitten, en waarvoor handelingsperspectieven kunnen worden opgesteld die overal in Nederland, in deze wijktypen, toepasbaar zijn: oudere wijken, bloemkoolwijken en vinexwijken.

Oudere woonwijken

Dit is een samenvoeging van de wijken tuindorp, volkswijk, naoorlogse tuinstad laagbouw, naoorlogse woonwijk. Deze wijken hebben een redelijk uniforme straatopbouw, namelijk een relatief smal straatprofiel met bomen in de verharding en weinig ruimte om aaneengesloten groeiplaatsen voor de bomen te creëren in openbare ruimte. In deze wijken wordt nog veel gebruik gemaakt van een gecombineerd riool en een hoge parkeerdruk in de straten. Naast de sterk verharde omgeving in de straten zijn er bredere lanen en grote groenvakken langs de randen. Deze tweedeling vraagt een eigen aanpak. Mogelijk zijn deze grootschaligere groenvlakken wel geschikt juist om het water op te vangen en zo in de nabije omgeving te houden. De kernvraag bij dit wijktype is hoe er bij de hoge gebruiksdruk boven- en ondergronds ruimte voor een goede groeiplaats kan worden gecreëerd en het hemelwater gebruikt kan worden door het groen in plaats van afgevoerd te worden.

Bloemkoolwijken

Deze wijken hebben een grillige inrichting. Stenige straten zonder rechte lijnen wisselen af met groene tussenruimtes. In het straatbeeld een afwisseling van veel kleine groenvakken en solitaire bomen in het straatbeeld met minimale boomspiegel. Bodemverbetering bij bomen in de vorm van bomenzand of -grond werd in deze periode net ontwikkeld, maar grootschalige toepassing is er nog niet. In de straat heeft het groen moeite om voldoende geschikte bodem te vinden voor haar vocht en voeding. De grotere groenzones geven wel goede mogelijkheden voor het vasthouden / aanbieden van water. Afkoppeling van hemelwater is niet gangbaar. Doordat deze wijken nu zo'n 40 jaar oud zijn, is veel groen aan vervanging toe. Dit biedt kansen om met een goede uitgangspositie nieuw groen aan te brengen. De vraag daarbij is hoe

de groeiplaats van nieuw aan te brengen straatbomen kan worden geoptimaliseerd en hoe de groenzones beter kunnen worden benut voor wateraanvoer of het vasthouden van water.

Vinexwijken

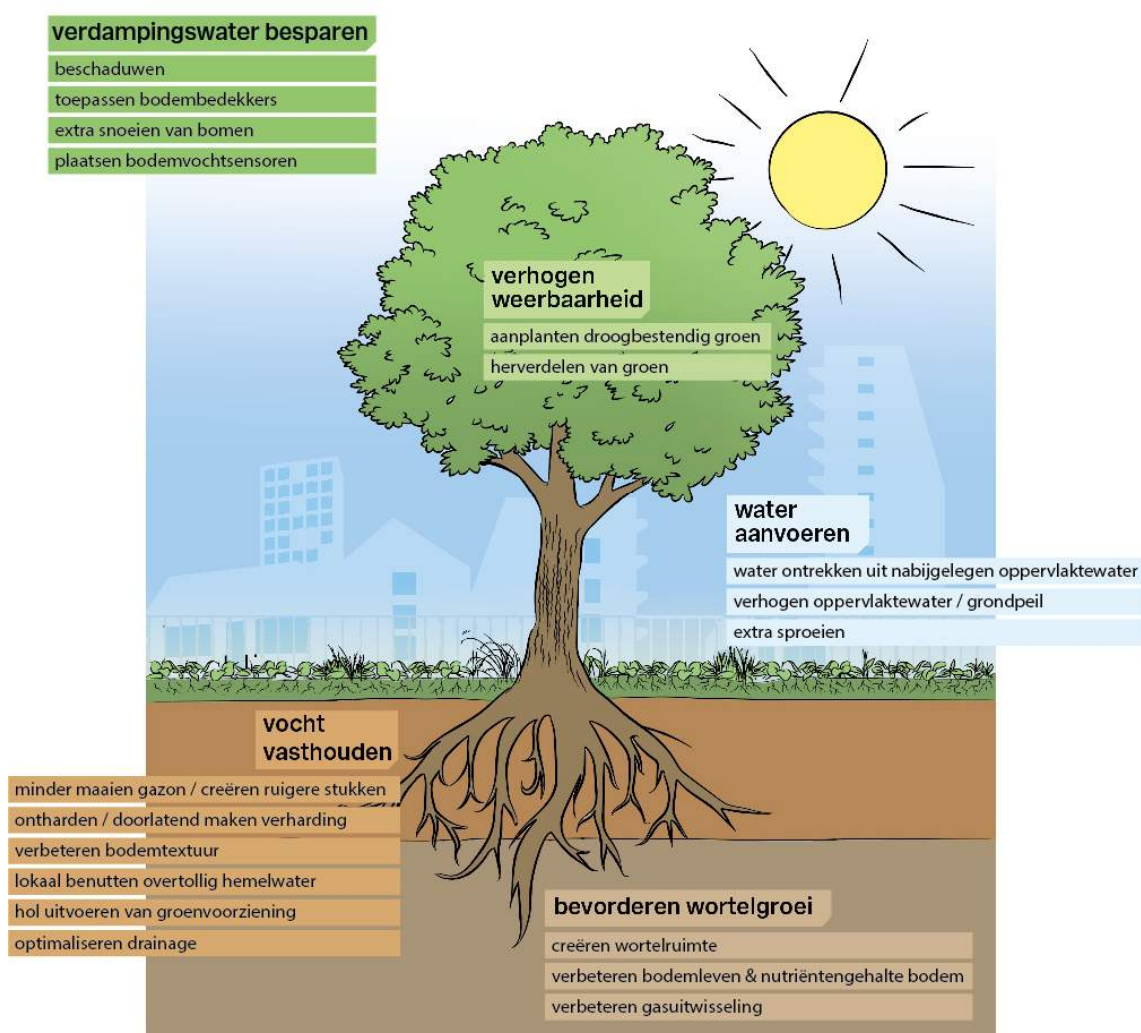
De vinexwijken kennen een grote verscheidenheid in de omvang van het groen. Stenige straten met kleine boomspiegels wisselen af met straten met meer ruimte voor groen en grotere groenoppervlaktes en waterpartijen. Het afkoppelen van hemelwater wordt steeds meer toegepast. Het groen is nog relatief jong en niet aan vervanging toe. De uitdaging bij deze wijken ligt in de leeftijd van het groen. Met de goede omstandigheden kan het groen in deze wijken nog jaren mee en loont het om te investeren in goede groeiplaatsomstandigheden. De kennis over het toepassen van een goede groeiplaats is in deze wijken al aanwezig. De vraag die bij deze wijken centraal staat is dan ook hoe het beheer kan worden geoptimaliseerd en welke maatregelen kunnen worden getroffen om de bomen een goede toekomstverwachting te geven, ook met droge zomers.

4 Haalbare maatregelen, handelingsperspectieven

Dit hoofdstuk beschrijft maatregelen, handelingswijzen en ingrepen (hier verkort tot 'handelingsperspectieven') waarmee groen droogtebestendiger kan worden gemaakt. Figuur 4.1 geeft een overzicht van handelingsperspectieven, gegroepeerd naar de drie sleutelfactoren:

1. *Vochtvoorziening (water besparen, vasthouden en aanvoeren)*
2. *Groeiplaats (bevorderen wortelgroeiruimte)*
3. *Soort (keuze) (verhogen weerbaarheid)*

Een juiste, evenwichtige uitvoering vereist altijd maatwerk en daarom samenwerking tussen de drie disciplines die over de sleutelfactoren gaan, respectievelijk waterbeheerders, stedenbouwkundige en groendeskundigen.



Figuur 4.1: Overzicht van mogelijke inrichtings- of verbetermaatregelen

4.1 Optimaliseren vochtvoorziening

De vochtvoorziening van stedelijk groen kan worden verbeterd via de volgende algemene principes (Stuurman & Mens, 2021):

1. Zorg voor een goede balans tussen een minimale ontwatering en beperking van het risico op grondwateroverlast. Door winterwater vast te houden wordt de bodem- en grondwatervoorraad structureel vergroot.
2. Verdeel het neerslagoverschot (neerslag min verdamping) eerlijker tussen de verschillende gebruikers. Verplaats of vervang groen dat veel water vraagt of voorzie deze op een innovatieve manier van water, bijvoorbeeld met de inzet van gezuiverd stedelijk afvalwater.
3. Verbeter de bodemvitaliteit waardoor het organisch stofgehalte en het bodemleven wordt hersteld. Door deze bodemverbetering blijft er meer water hangen in de bovenlaag (hangwater) ten gunste van de vochtopname. Ook in gebieden met een ondiepe grondwaterstand kan een dergelijke bodemverbetering de beschikbaarheid van bodemwater verhogen.
4. Berg overtollig water van intensieve buien daar waar het valt en infiltreer het in de bodem. Dit kan zowel op kleine schaal als grote schaal. Bijvoorbeeld via regentonnen en groene daken (huis), waterpleinen en speeltuinen die onder kunnen lopen (buurt), afkoppelen daken in combinatie met waterdoorlatende verharding (wijk) en/of waterbufferparken (stad).

Bij het kiezen van maatregelen die hieraan voldoen dient, net als bij de trits vertragen-bergen-afvoeren, deze volgorde moeten worden aangehouden: allereerst inzetten op besparen, vervolgens vasthouden en pas als laatste optie aanvoeren van water vanuit duurzame bronnen. Dit zijn bronnen, waterbuffers die hernieuwbaar zijn en waarvan het gebruik tijdens droogte niet ten nadele is van andere functies, zoals natuur.

4.1.1 Water besparen

Water besparen begint bij de soortkeuze. Maar bij het verminderen van de watervraag voor groen speelt naast bladverdamping ook de verdampingssnelheid van de bodem een grote rol. Deze verdampingssnelheid kan worden verminderd door het uitvoeren van o.a. de volgende maatregelen:

Beschaduwen

Een enkel gepositioneerde boom zal meer verdampen, doordat zijn kroon blootgesteld wordt aan de UV-straling. Als er twee bomen naast elkaar gepositioneerd worden zal de boom die in de schaduw staat van de andere boom minder verdampen dan de boom die wel volledig in de zon staat. Hetzelfde geldt voor een cluster bomen. De boom die met zijn kroon voor een deel of geheel in de schaduw staat, zal minder verdampen dan de boom die vol in de zon staat.

Toepassen bodembedekkers

Deze maatregel vermindert de verdamping van vocht uit de bodem. Een voorbeeld van een bodembedekker is sedum/vetkruid. Deze beschermt de bodem eveneens tegen ongewenste planten. Andere droogtebestendige planten zijn ook geschikt, zolang de bodem maar zoveel mogelijk bedekt is. Mulchen is het bedekken van de grond met bodembedekkers zoals boomschors, houtsnippers of cacaodoppen, versnipperd tuinafval en andere organische materialen. Mulch is meestal klein gesnipperd zodat het binnen afzienbare tijd op de natuurlijke manier vergaat. Een mulchlaag heeft een isolerende werking. Hoe dikker de laag, hoe beter de bescherming. Ter illustratie: de temperatuur van de bodem zonder mulchlaag kan tijdens een hittegolf, met een luchttemperatuur van 30 graden, oplopen tot 50 graden. Met een mulchlaag

van 2 cm blijft de bodemtemperatuur gelijk aan de lucht en met een laag van 10 cm blijft de bodem zelfs (ruim) onder de luchttemperatuur. Hierdoor zal er minder bodemvocht verdampen.

Extra snoeien van bomen

Door bomen of andere typen groen extra te snoeien heeft het groen minder bladeren met als gevolg ook minder verdamping. Nadeel van snoeien is de verminderde schaduwwerking, waardoor er weer meer verdamping van de groeiplaats optreedt.

Inzet van een vochtmonitoringssysteem

Door vochtsensoren te plaatsen bij de aanplant of bij het onderhoud van groen in de bodem kan het vochtgehalte van de bodem constant in de gaten gehouden worden. De verzamelde data van een vochtsensor wordt vertaald naar een overzichtelijk dashboard, waarmee inzichtelijk wordt wanneer groen water nodig heeft.

4.1.2 Water vasthouden

Water vasthouden draagt bij aan het op peil houden van de zoetwatervoorraad. Hierdoor kunnen langdurig droge perioden beter worden overbrugd. Maatregelen om water vast te houden zijn:

Ontharden of doorlatend maken van verharding

Door aanwezige of nabijgelegen verharding bij een groenvoorziening te verwijderen of doorlatende verharding aan te brengen kan meer water in de bodem infiltreren ten gunste van de zoetwatervoorraad.



Figuur 4.2: Ontharden

Minder maaien van gazon/creëren van ruigere stukken

Een kort gemaaid gazon droogt in de zomer sneller uit. Door minder te maaien (bijvoorbeeld tweemaal per jaar) neemt de biodiversiteit toe. De maatregel verhoogt de bodemkwaliteit en het watervasthoudend vermogen. Een andere mogelijkheid is om het gazon om te vormen naar een ruig grasland met dieper wortelende soorten. Ook door meer inheemse bloemen in te zaaien kan de biodiversiteit en daarmee de bewortelingsdiepte worden vergroot.

Verbeteren bodemtextuur

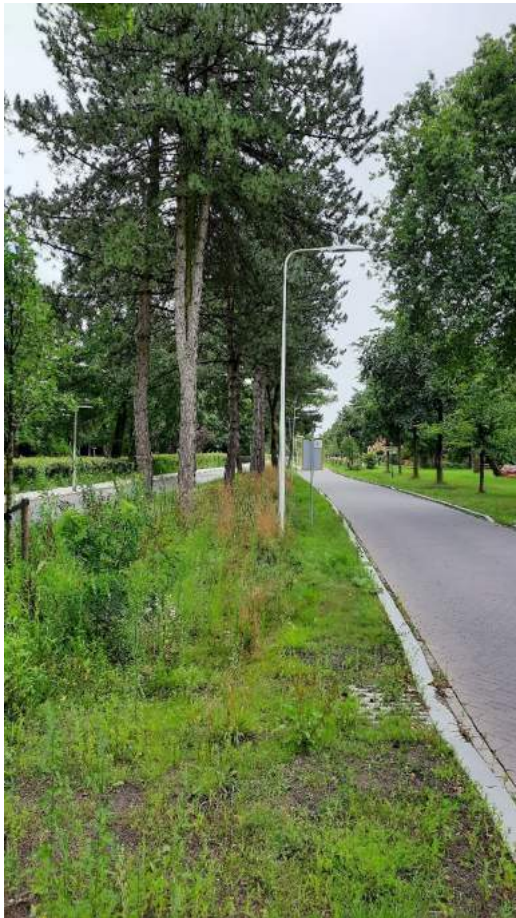
Door organisch materiaal, zoals verteerde plantenresten, compost of een bodemverbeteraar toe te voegen aan de bodem wordt deze humusrijk. Humus is in staat om vele malen zijn gewicht aan water vast te houden en brengt voedingsstoffen in de grond. Plantenwortels zoeken de voedingsstoffen op en maken hiermee luchtkanalen in de grond. Dit verbetert het vermogen om water vast te houden en vergroot het infiltrerend vermogen.

Lokaal benutten overtollig hemelwater

Maatregelen om overtollig hemelwater vast te houden hebben ook tijdens langdurige droogte een functie mits de voorziening een infiltrerende werking heeft. Voorbeelden van bovengrondse infiltrerende voorzieningen zijn groene bergingen of wadi's. Voorbeelden van ondergrondse voorzieningen zijn infiltratiekratten, infiltratieriolen en infiltratiekolken- of putten. Ook het plantvak kan zodanig worden (her)ingericht dat het langs de stam lopende water en de regendoorval optimaal kan worden geïnfiltereerd.



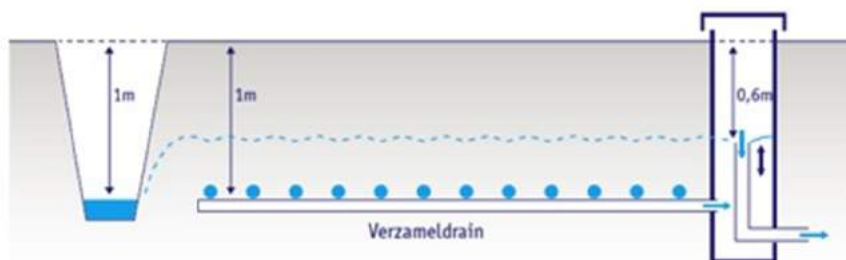
Figuur 4.3: Bevorderen opvang afstromend en doorvallend hemelwater



Figuur 4.4: in kader van waterbeheer afgekoppeld wegdek met overloop naar verdiepte, soortenrijke groenstrook. Naaldbomen waren al aanwezig voor herinrichting, Zeist.

Onderhoud van riool en peilregelaars

Het herstellen en vervangen van lekke en/of drainerende riolering of cunetten vermindert de overtollige afvoer van grondwater. Door onderhoud van drainageputten kunnen ook peilregelaars afbreken of scheef komen te staan. Herstel van deze regelaars draagt bij aan een betere peilbeheersing.



Figuur 4.5: Peilregelaar drainageput

Hol uitvoeren van groenvoorzieningen

Door bermen en andersoortige groenvoorzieningen hol uit te voeren wordt afstromend regenwater tijdelijk geborgen om vervolgens weg te zakken in de bodem. Aandachtspunt is de ledigingstijd, het water moet weer op tijd zijn weggezakt zodat de boomwortels weer op tijd zuurstof krijgen.



Figuur 4.6: Lokaal benutten van afstromend wegwater (foto: Arcadis)

4.1.3 Water aanvoeren uit duurzame bronnen

Water aanvoeren vanuit duurzame bronnen is afhankelijk van de nabijheid van waterbuffers die hernieuwbaar zijn en waarvan het gebruik tijdens droogte niet ten nadele is van andere functies, zoals natuur. Grondwateronttrekking t.b.v. irrigatie is vrijwel nooit een duurzame bron, tenzij dit een doelbewust t.b.v. irrigatie gecreëerde buffer is (het zgn. Managed Aquifer Recharge & Recovery). Onttrekking vanuit oppervlaktewater is als duurzaam te bestempelen indien dit niet leidt tot onomkeerbare schade aan andere functies, en dit water bij neerslag en/of herstelde rivierwaterafvoer weer volledig wordt aangevuld.

Water onttrekken uit nabijgelegen oppervlaktewater

Het verpompen van oppervlakte- of vijverwater en ter plaatse infiltreren in de bodem of via een wadi is een mogelijke maatregel. Kanttekening hierbij is dat het een minder preferente oplossing kan zijn vanwege de benodigde energie en onderhoudskosten van de pomp, hoewel er ook met duurzame energie aangedreven alternatieven zijn voor het oppompen van water (windmolen, zonnepanelen).

Verhogen oppervlaktewaterpeil / grondwaterpeil

Door het verhogen van het grondwaterpeil kunnen de wortels van het betreffende groen eenvoudiger water opnemen. Het verhogen van het grondwaterpeil is geen eenvoudige maatregel en is ook niet altijd mogelijk. Verhogen van het oppervlaktewaterpeil van een nabijgelegen waterpartij is een mogelijkheid of aanvoer en infiltratie vanuit oppervlaktewater of afkoppelgebieden. Beide maatregelen vergen afstemming met de waterbeheerder.

Extra sproeien/bewateren

Bij net geplante of verplante bomen of struiken is de kans op uitdroging het grootst. Doordat zij nog te weinig wortels hebben is de opnamecapaciteit klein. Bij gebrek aan water gaat een jonge boom direct in ruststand. Daarom is het nodig om nieuw aangeplante bomen of struiken regelmatig extra water te geven. Vaker dan de bomen die er al vele jaren staan.

Verdringingsreeks bij watertekort

<https://www.infomil.nl/onderwerpen/lucht-water/handboek-water/themas/watertekort/verdringingsreeks/>

Tijdens extreme droogte kunnen beperkingen worden opgelegd aan het waterverbruik via de verdringingsreeks. Stedelijk groen heeft hierin positie en dan ook geen prioriteit. Er kan op regionaal niveau een meer specifieke invulling worden gegeven aan de reeks, waarbij sommige onderdelen van het stedelijk groen hoger in de reeks kunnen worden geplaatst. Denk daarbij aan monumentale bomen die van zeer grote waarde zijn voor de leefomgeving. Het is dan noodzakelijk dat groenbeheerders een stem krijgen in deze regionale invulling. En ook in het groenbeheer zelf kan een 'verdringingsreeks' van irrigatieprioriteiten worden gehanteerd.

Extra sproeien dient bij voorkeur in de avond te gebeuren om te voorkomen dat bladeren verbranden in de hete middagzon of onnodig veel water verdampt. Door buizen te plaatsen naast bomen kan gedurende de hele dag water worden gegeven.

In een onderzoek naar droogte en waterschaarste in Antwerpen 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.

4.2 Optimaliseren groeiplaats

Op basis van voorgaande hoofdstukken kan worden gesteld dat een goede groeiplaats wordt bepaald door o.a. de volgende kenmerken:

- Wortelruimte (beschikbare ondergrondse ruimte = doorwortelbaar volume)
- Bodemleven en nutriëntengehalte (organische stofgehalte)
- Bodemtextuur (klei, veen, zand)
- Beschikbare bovengrondse onverharde ruimte

Het bevorderen van de wortelgroei en hiermee het vermogen om water van een grotere diepte te onttrekken is mogelijk door de groeiruimte te optimaliseren. In praktijk is er vaak competitie voor de beschikbare ruimte en is ook de budgetruimte beperkt. Het op korte termijn besparen op kosten kan op de lange(re) termijn tot extra kosten leiden. Het is daarom raadzaam om al in de aanlegfase inzicht te geven in de benodigde extra onderhoudsinspanningen bij een minder gunstige uitgangspositie van de boom, gerekend over een levensduur van 30 jaar. Dit is naar verwachting de minimale levensduur van nieuw aan te planten bomen in een stedelijke omgeving. Met dit inzicht kan een meer duurzame (financiële) afweging worden gemaakt.

Creëren wortelruimte

De allerbeste standplaats voor bomen is en blijft in het groen. Ze hebben ruimte voor hun wortels, worden gevoed met regen- en grondwater en kunnen hun voeding uit de grond halen. Ze hebben de optimale plek om uit te groeien tot een volwaardig, volwassen exemplaar.

Bij de aanplant van nieuwe bomen is het raadzaam om voldoende wortelruimte te creëren en gebruik te maken van bomenzand. Het zand heeft voldoende organische stof voor de ontwikkeling van de bomen, heeft een waterbufferend vermogen en een hoge draagkracht.

Een boom verbruikt tussen de 0,5 (kleine boom) en 1m³ (grote boom) doorwortelbare ruimte per jaar. Het absolute minimum aan wortelruimte is 10m³. Denk hierbij aan bomen met een hoogte van 5-8 meter. Voor bomen met een hoogte van 8-15 meter, moet er een absoluut minimum van 15m³ wortelruimte aanwezig zijn. Voor bomen met een hoogte van 15 meter of meer, moet een absoluut minimum van 25m³ wortelruimte aanwezig zijn.

Verbeteren bodemleven en nutriëntengehalte bodem

Met voldoende bodemleven is de ecologische kringloop gesloten en dit zorgt voor een continue beschikbaarheid van voedingsstoffen voor de boom. Daarom zijn de gehalten nutriënten in de bodem ontzettend belangrijk.

Door de groeiplaats bovengronds zodanig in te richten dat het blad kan blijven liggen wordt uitputting van de bodem voorkomen. Dit kost bovengronds mogelijk extra ruimte maar verlaagt de investering om voedingsstoffen mee te geven voor het behalen van de gewenste levensduur van de boom.

Schimmels, ook wel mycorrhiza-schimmels genoemd, zijn belangrijke schimmels voor bomen. De schimmels werken nauw samen met de plantenwortels. In ruil voor voedingsstoffen die de schimmel met zijn netwerk van schimmeldraden uit de bodem haalt en beschikbaar stelt aan de boom, levert de boom de schimmel brandstof in de vorm van suikers. Door de fijne schimmeldraden kunnen ze voedingsstoffen en water op nemen. Door het breed uitwaaiende mycelium wordt en kan het wortelsysteem van een boom 60 tot 100 keer worden vergroot. Daarnaast kan de schimmel organische zuren produceren. Hierdoor worden fosfaat, stikstof, kalium, magnesium, ijzer en overige belangrijke voedingselementen beter opgenomen door de boom.



Figuur 4.7: mycelium vergroot het wortelsysteem aanzienlijk

Ook wormen zijn belangrijk voor een gezonde bodem. In de bodem leven veelal drie soorten wormen. De eerste soort, de *epigeïsche*, leeft in de strooisellaag van de bodem. Deze worm graaft geen tunnels, maar verkleint het bladafval op de bodem. De tweede soort worm, de *endogeïsche*, leeft in de toplaag van de bodem en graaft horizontale tunnels net onder de oppervlakte. Deze wormensoort breekt afval af en zorgt voor een optimale beluchting van de toplaag. De derde soort, de *anekïsche*, graaft diepe verticale tunnels. Bijvoorbeeld pendelaars. Door de tunnels wordt de diepere bodem beter belucht en kan water beter infiltreren.

Tabel 4.1: Indicatie van dosering wormen voor een goed bodemleven

Aanplant nieuw bomen		Bestaande bomen	
Stamomvang cm	Dosering wormen	Stamomvang cm	Dosering wormen
12 – 16	100 gram	20 – 25	500 gram
16 – 20	200 gram	25 – 50	1000 gram

20 – 25	300 gram		50 – 75	1500 gram
25 – 30	400 gram		75 – 100	2000 gram
30 – 40	500 gram		100 - >	2500 gram
40 - 60	1000 gram			
60 – 80	1500 gram			
80 - >	2000 gram			

De uitscheiding van wormen is belangrijk voor een gezonde bodem. De poep bevat organische stoffen waar voedingsstoffen aan gebonden zijn.

Verbeteren gasuitwisseling

Per standplaats heeft een boom meer of minder zorg nodig. Bomen in verharding hebben extra zorg nodig. Het bemesten en bewateren van bomen in verharding is belangrijk. De wortels hebben zuurstof nodig om te functioneren. De bodem moet dusdanig open van structuur zijn dat er voldoende gasuitwisseling tussen bodem- en buitenlucht kan optreden. Als de bestrating vrijwel ondoorlatend is, is dit niet mogelijk, zal er een slechte gasuitwisseling zijn en is dit te zien aan de boom. Om een boom te helpen met de gasuitwisseling is het aanbrengen van een beluchtingsysteem bij bomen in bestrating aan te raden.

Een eenvoudigere en meer duurzame oplossing om bomen de ruimte te geven en ze niet de mogelijkheid te geven om bestrating omhoog te stuwen, is halfverharding. De bomen krijgen meer zuurstof en de halfverharding is waterdoorlatend.

4.3 Optimaliseren soortkeuze

In hoofdstuk 2 is beschreven dat klimaatbestendig groen o.a. de volgende kenmerken heeft:

- bestand tegen hitte/zonlicht, vorst, droogte, nattigheid, verzilting en storm
- draagt bij aan vertraging van piekneerslag en verkoeling door verdamping
- vermindert hittestress
- versterkt en verhoogt biodiversiteit
- heeft veerkracht bij ziektes en plagen
- levert een bijdrage aan betere luchtkwaliteit
- verhoogt de leefbaarheid en recreatieve waarde

Het moment van aanleg is uiteraard het meest kansrijke moment om problemen te voorkomen. Ditzelfde geldt voor aanpassing van groen, alleen is het moment daarvan vaak afhankelijk van de noodzaak tot vervanging of herinrichting van de openbare ruimte. Mediterrane beplanting is doorgaans goed bestand tegen langdurige droogte, maar in Nederland bestaat er, ondanks klimaatverandering, nog steeds kans op vorst, wat de mogelijkheden beperkt. Verder is het uit het oogpunt van biodiversiteit beter om inheemse soorten aan te planten. Uitheemse beplanting is voor insecten namelijk niet wenselijk.

Op grond- en regenwaterafhankelijke locaties is het logisch om te kiezen voor groen met een lage verdampingsgraad, vetachtige planten of planten met een lichte bladkleur of een relatief diepe worteldiepte. Op grond- en regenwateronafhankelijke locaties valt de keuze wellicht op vegetatie met een hoge verdampingsgraad vanwege het verkoelende effect. Verder is in grote lijnen uit metingen buiten de stad bekend dat lage vegetatie zoals gras vooral in het begin van een hittegolf meer verkoeling kan leveren dan bomen, maar dat bomen dankzij hun diepe wortels de transpiratie langer volhouden en gedurende een langere hittegolf juist meer verkoeling blijven leveren (Teuling et al., 2010).

De website <http://righttrees4cc.org.uk/> bevat een database met bomen die kunnen worden geselecteerd op basis van geschiktheid van klimaatfactoren.

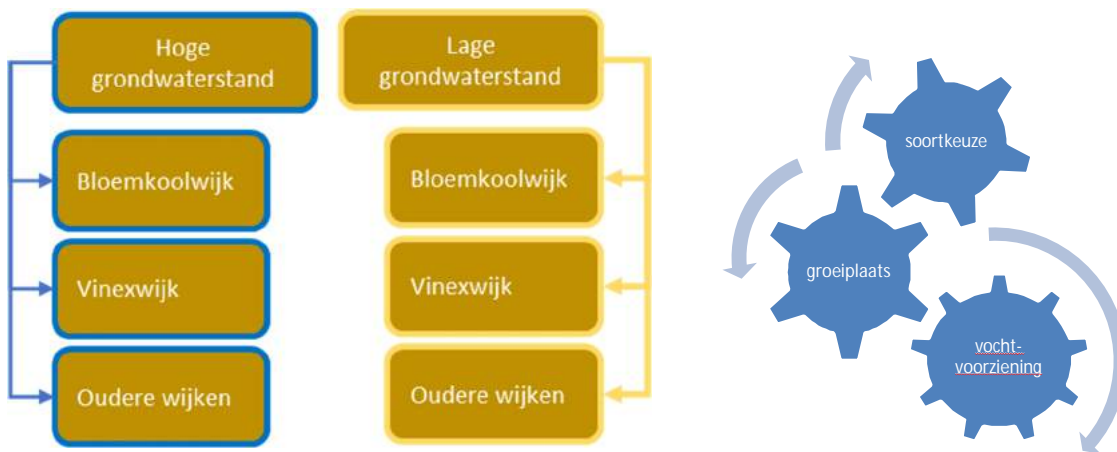
Deze publicaties bieden houvast bij het kiezen van soorten:

- Hiemstra, Jelle 2018a. Soortentabel bomen. Algemene kenmerken (w.o. droogtetolerantie, bijdrage aan ecosysteemdiensten en nadelige eigenschappen: <https://edepot.wur.nl/460540>
- Hiemstra, Jelle 2018b. Groen in de stad, klimaat en temperatuur. Ecosysteemdiensten van groen. Opwarming van de stad en invloed van groen op stadsklimaat: <https://edepot.wur.nl/460543> Invloed van groen op waterhuishouding stad: <https://edepot.wur.nl/460541>




5 Factsheets wijktypen en daarbij passende maatregelen

Om de uitkomsten van de analyse van de invloed van wijkinrichting en daarbij passende handelingsperspectieven samen te vatten zijn factsheets samengesteld. De factsheets benoemen de kenmerken van wijktypen die bepalend zijn voor de groeiomstandigheden van het groen en bij de wijk passende maatregelen (handelingsperspectieven) om droogteschade te verminderen.

De factsheets zijn opgesteld voor drie wijktypen die representatief zijn voor een groot deel van het Nederlandse stedelijke gebied: oudere woonwijken, bloemkoolwijken en vinexwijken. Er is vanwege het belang voor de vochtvoorziening, daarbinnen een nader onderscheid gemaakt tussen wijken met een hoge grondwaterstanden (laag Nederland) en de gebieden met lage grondwaterstanden (hoog Nederland). Per wijk is daarnaast beschreven welke eigenschappen beïnvloed kunnen worden, gezien vanuit de drie knoppen om aan te draaien, vochtvoorziening, groeiplaats en soort(keuze).















































































































De haalbaarheid om maatregelen toe te passen is ingeschat met behulp van de kenmerken factoren voor groen per wijktype en voor gebieden met een hoge (laag-Nederland) en lage grondwaterstand (hoog-Nederland). Tabel 5.1 geeft een overzicht van de haalbaarheid van toe te passen maatregelen in de drie wijktypen. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen de gebieden met hoge grondwaterstanden (laag Nederland) en de gebieden met lage grondwaterstanden (hoog Nederland). De haalbaarheid is daarin als volgt uitgedrukt:

-  - Zeer haalbaar handelingsperspectief / maatregel
-  - Gemiddeld haalbaar handelingsperspectief / maatregel
-  - Minder haalbaar handelingsperspectief maatregel

De haalbaarheid is toegekend op basis van de mix van landschap, wijk en groenkenmerken, en op basis van de ervaringen van het projectconsortium. De in de tabel samengevatte opties zijn terug te vinden in de factsheets.

Tabel 5.1: Haalbaarheid toepassen maatregelen per wijktype en landschapstype (laag-NL / hoog-NL).

Maatregel			Oudere woonwijk (laag-NL / hoog-NL)	Bloem Koolwijk (laag-NL / hoog-NL)	Vinex Wijk (laag-NL / hoog-NL)	
Optimaliseren vochtvoorziening						
Beschaduwten	Optie 1: Verdampingswater besparen	Bovengrondse maatregelen	 / 	 / 	 / 	
Toepassen bodembedekkers			 / 	 / 	 / 	
Extra snoeien van bomen			 / 	 / 	 / 	
Plaatsen bodemvochtsensoren			 / 	 / 	 / 	
Minder maaien gazon/creëren ruigere stukken	Optie 2: Vocht vasthouden		Systeemgerichte maatregelen	 / 	 / 	 / 
Ontharden/doorlatend maken verharding				 / 	 / 	 / 
Verbeteren bodemtextuur				 / 	 / 	 / 
Hol uitvoeren van groenvoorziening				 / 	 / 	 / 
Optimalisatie drainerende werking				 / 	 / 	 / 
Lokaal benutten overtollig hemelwater	Optie 3: Water Aanvoeren vanuit duurzame bron			 / 	 / 	 / 
Water onttrekken uit nabijgelegen oppervlaktewater		 / 		 / 	 / 	
Verhogen oppervlaktewater-/grondwaterpeil		 / 		 / 	 / 	
Extra sproeien		 / 		 / 	 / 	
Optimaliseren groeiplaats						
Creëren wortelruimte	Bevorderen wortelgroei	Ondergrondse maatregelen	 / 	 / 	 / 	
Verbeteren bodemleven & nutriëntengehalte bodem			 / 	 / 	 / 	
Verbeteren gasuitwisseling			 / 	 / 	 / 	
Optimaliseren soort(keuze)						
Aanplanten droogtebestendig groen	Verhogen weerbaarheid		 / 	 / 	 / 	
Herverdelen van groen		 / 	 / 	 / 		

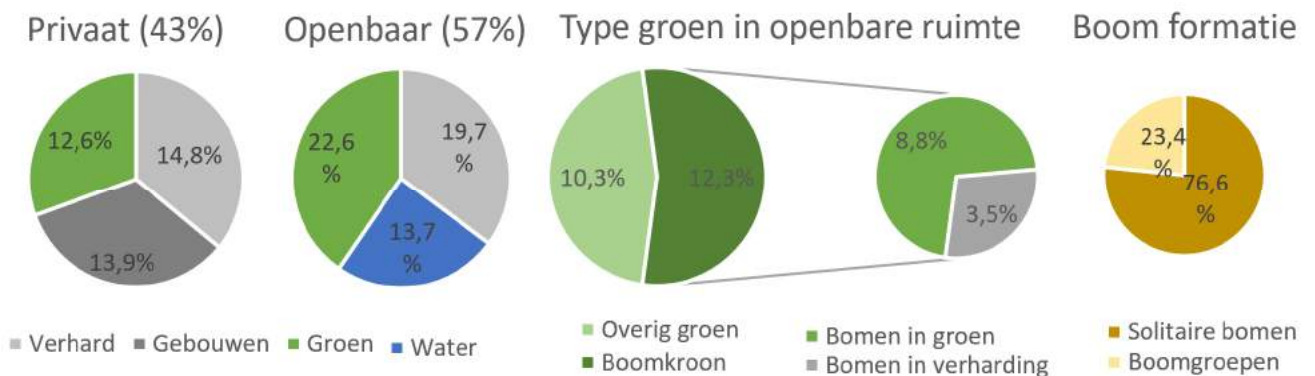


Figuur: H. Pötz, Atelier GroenBlauw

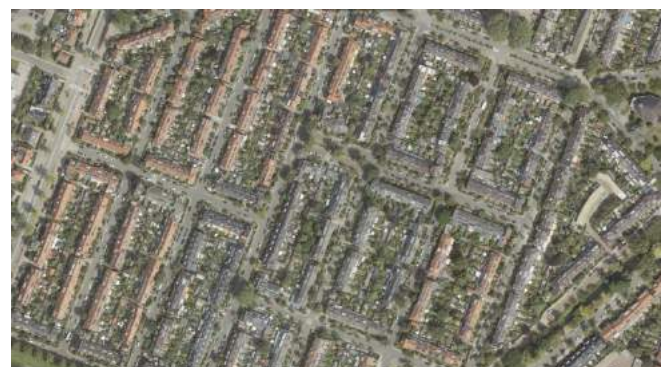
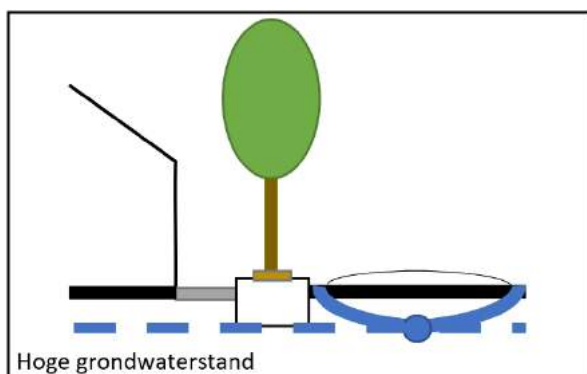
Analyse

- Geen bodemverbetering aanwezig
- Kleine plantvakken voor straatbomen (ca 1,5x1,5m)
- In verdichte omgeving (tussen rijbaan, trottoir en parkeervakken)
- Ondergrondse druk met kabels en leidingen en riolering
- Afkoppeling van hemelwater niet gangbaar. Weinig infiltratie(mogelijkheden)
- De straten met particuliere (voor)tuinen geven mogelijk meer ruimte voor doorworteling waar de boom bij particulier groen kan komen

Karakteristieken per wijk



Karakteristieken op straatniveau





Figuur: H. Pötz, Atelier GroenBlauw

Zeer haalbare maatregelen

- Extra snoeien van bomen
- Ontharden/doorlatend maken verharding
- Verhogen oppervlaktewater-/grondwaterpeil
- Extra sproeien

Gemiddeld haalbare maatregelen

- Toepassen bodembedekkers
- Verbeteren bodemtextuur
- Optimalisatie drainerende werking
- Water onttrekken uit nabijgelegen oppervlaktewater
- Verbeteren bodemleven & nutriëntengehalte bodem
- Aanplanten droogtebestendig groen

Minder haalbare maatregelen

- Beschaduwen
- Plaatsen bodemvochtsensoren
- Minder maaien gazon/creëren ruigere stukken
- Hol uitvoeren van groenvoorziening
- Lokaal benutten overtollig hemelwater
- Creëren wortelruimte
- Verbeteren gasuitwisseling
- Herverdelen van groen

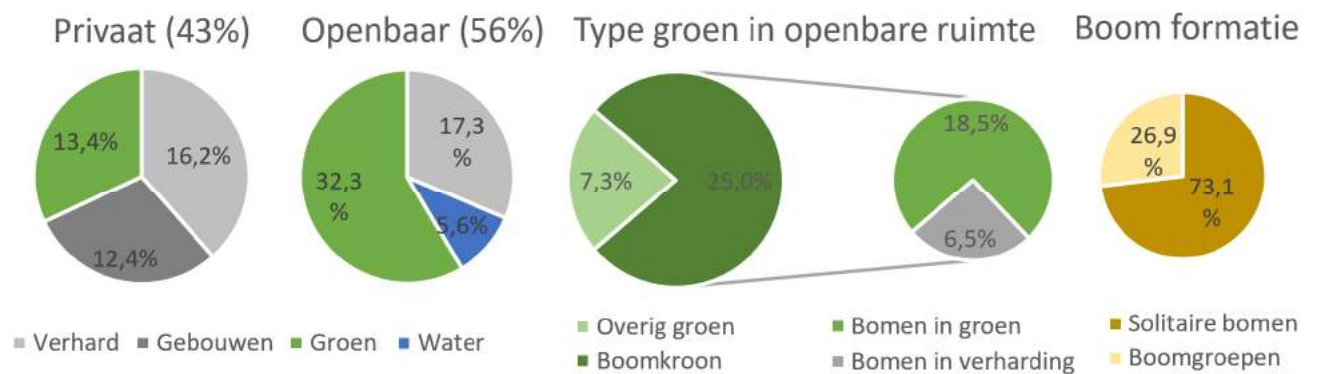


Figuur: H. Pötz, Atelier GroenBlauw

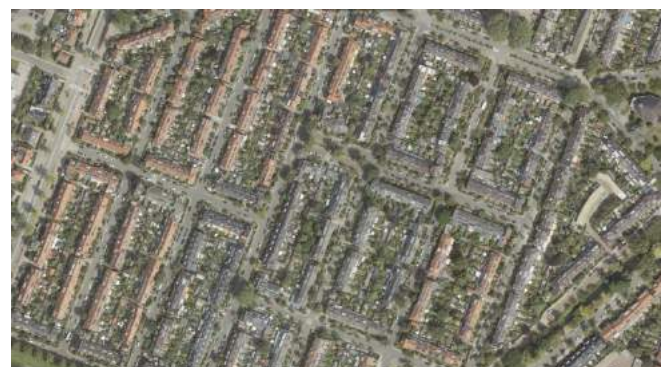
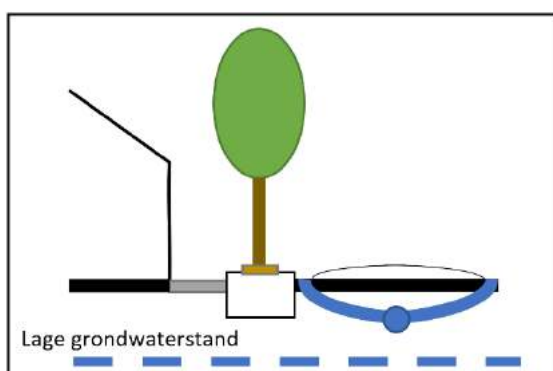
Analyse

- Geen bodemverbetering aanwezig
- Kleine plantvakken voor straatbomen (ca 1,5x1,5m)
- In verdichte omgeving (tussen rijbaan, trottoir en parkeervakken)
- Ondergrondse druk met kabels en leidingen en riolering
- Afkoppeling van hemelwater niet gangbaar. Weinig infiltratie(mogelijkheden)
- De straten met particuliere (voor)tuinen geven mogelijk meer ruimte voor doorworteling waar de boom bij particulier groen kan komen

Karakteristieken per wijk



Karakteristieken op straatniveau





Figuur: H. Pötz, Atelier GroenBlauw

Zeer haalbare maatregelen

- Extra snoeien van bomen
- Ontharden/doorlatend maken verharding
- Extra sproeien
- Herverdelen van groen

Gemiddeld haalbare maatregelen

- Toepassen bodembedekkers
- Verbeteren bodemtextuur
- Lokaal benutten overtollig hemelwater
- Verbeteren bodemleven & nutriëntengehalte bodem
- Aanplanten droogtebestendig groen

Minder haalbare maatregelen

- Beschaduwen
- Plaatsen bodemvochtsensoren
- Minder maaien gazon/creëren ruigere stukken
- Hol uitvoeren van groenvoorziening
- Optimalisatie drainerende werking
- Water onttrekken uit nabijgelegen oppervlaktewater
- Verhogen oppervlaktewater-/grondwaterpeil
- Creëren wortelruimte
- Verbeteren gasuitwisseling

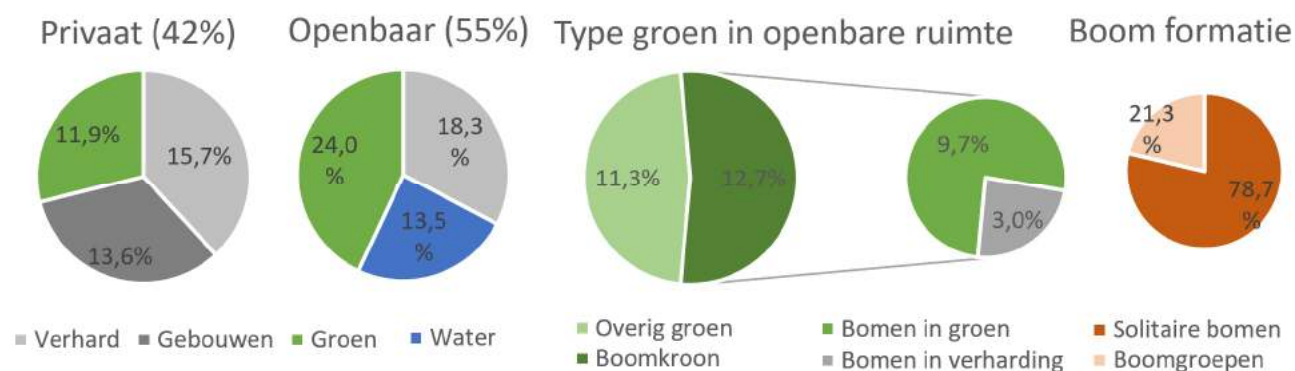


Figuur: H. Pötz, Atelier GroenBlauw

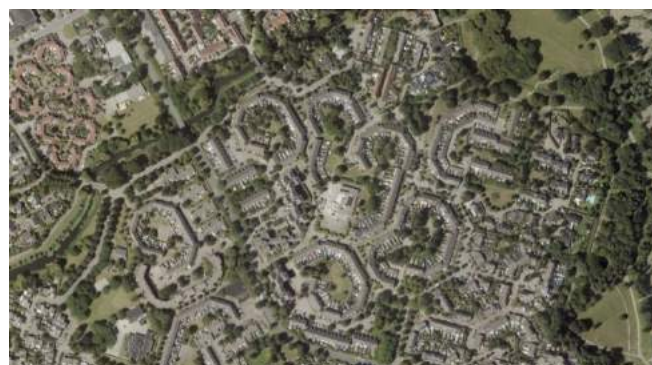
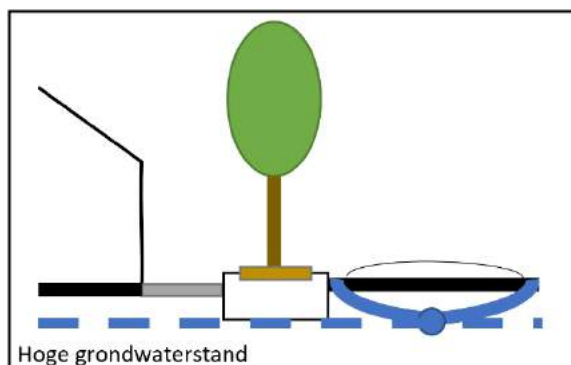
Analyse

- Voor de solitaire bomen zeer kleine boomplantvakken, met naar verwachting beperkte bodemverbetering met bomenzand (vakken van ca. 2x2x0,80m)
- Relatief veel groenvakken in de straten
- Verdichte omgeving in de straten
- Ondergrondse druk met kabels en leidingen en riolering
- Afkoppeling van hemelwater / infiltratie niet gangbaar, echter via de groenvakken toch redelijk oppervlak infiltratie
- Tussen de straten en rond de wijk een groot aandeel gesloten groenoppervlak. Hier is naar verwachting geen bodemverbetering per boom toegepast, maar wel grote aaneengesloten ruimte onverdichte grond. Hier wellicht ook goede mogelijkheden om water 'op te vangen' en lokaal beschikbaar te houden door infiltratie.

Karakteristieken per wijk



Karakteristieken op straatniveau





Zeer haalbare maatregelen

- Toepassen bodembedekkers
- Extra snoeien van bomen
- Verhogen oppervlaktewater-/grondwaterpeil
- Extra sproeien

Gemiddeld haalbare maatregelen

- Beschaduwen
- Plaatsen bodemvochtsensoren
- Minder maaien gazon/creëren ruigere stukken
- Ontharden/doorlatend maken verharding
- Verbeteren bodemtextuur
- Hol uitvoeren van groenvoorziening
- Optimalisatie drainerende werking
- Lokaal benutten overtollig hemelwater
- Water onttrekken uit nabijgelegen oppervlaktewater
- Creëren wortelruimte
- Verbeteren bodemleven & nutriëntengehalte bodem
- Verbeteren gasuitwisseling
- Aanplanten droogtebestendig groen

Minder haalbare maatregelen

Herverdelen van groen

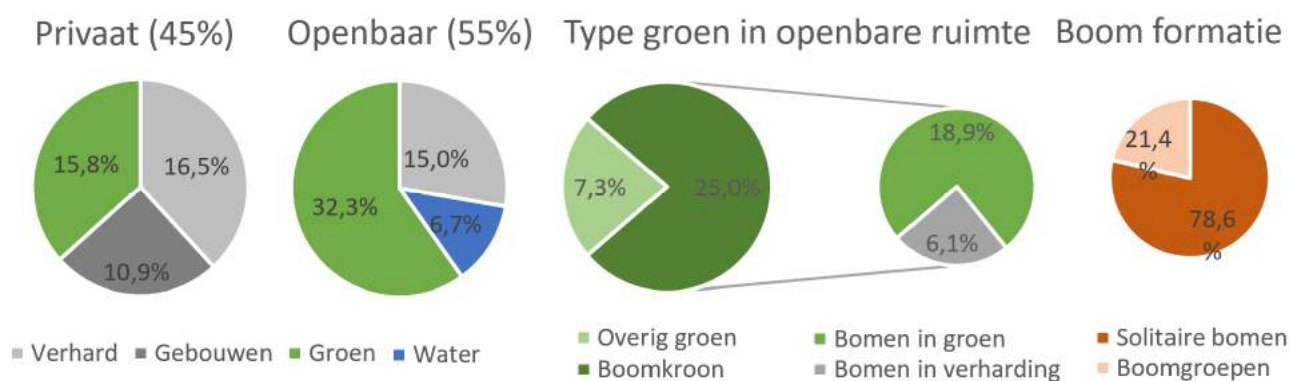


Figuur: H. Pötz, Atelier GroenBlauw

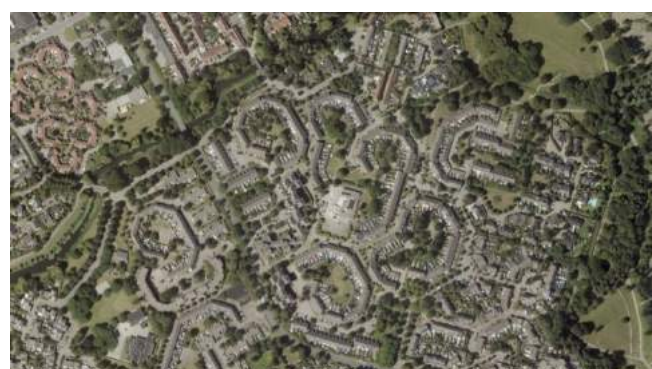
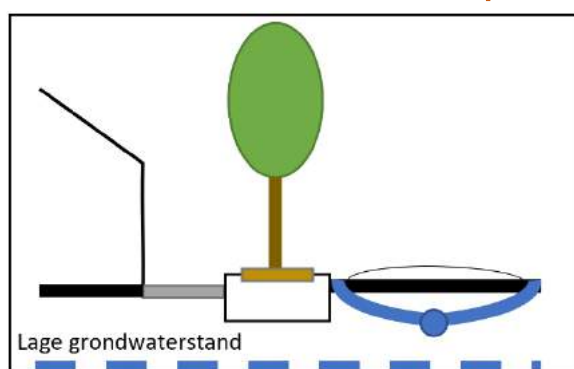
Analyse

- Voor de solitaire bomen zeer kleine boomplantvakken, met naar verwachting beperkte bodemverbetering met bomenzand (vakken van ca. 2x2x0,80m)
- Relatief veel groenvakken in de straten
- Verdichte omgeving in de straten
- Ondergrondse druk met kabels en leidingen en riolering
- Afkoppeling van hemelwater / infiltratie niet gangbaar, echter via de groenvakken toch redelijk oppervlak infiltratie
- Tussen de straten en rond de wijk een groot aandeel gesloten groenoppervlak. Hier is naar verwachting geen bodemverbetering per boom toegepast, maar wel grote aaneengesloten ruimte onverdichte grond. Hier wellicht ook goede mogelijkheden om water 'op te vangen' en lokaal beschikbaar te houden door infiltratie.

Karakteristieken per wijk



Karakteristieken op straatniveau





Figuur: H. Pötz, Atelier GroenBlauw

Zeer haalbare maatregelen

- Toepassen bodembedekkers
- Extra snoeien van bomen
- Lokaal benutten overtollig hemelwater
- Extra sproeien
- Herverdelen van groen

Gemiddeld haalbare maatregelen

- Beschaduwen
- Plaatsen bodemvochtsensoren
- Minder maaien gazon/creëren ruigere stukken
- Ontharden/doorlatend maken verharding
- Verbeteren bodemtextuur
- Hol uitvoeren van groenvoorziening
- Creëren wortelruimte
- Verbeteren bodemleven & nutriëntengehalte bodem
- Verbeteren gasuitwisseling
- Aanplanten droogtebestendig groen

Minder haalbare maatregelen

- Optimalisatie drainerende werking
- Water onttrekken uit nabijgelegen oppervlaktewater
- Verhogen oppervlaktewater-/grondwaterpeil

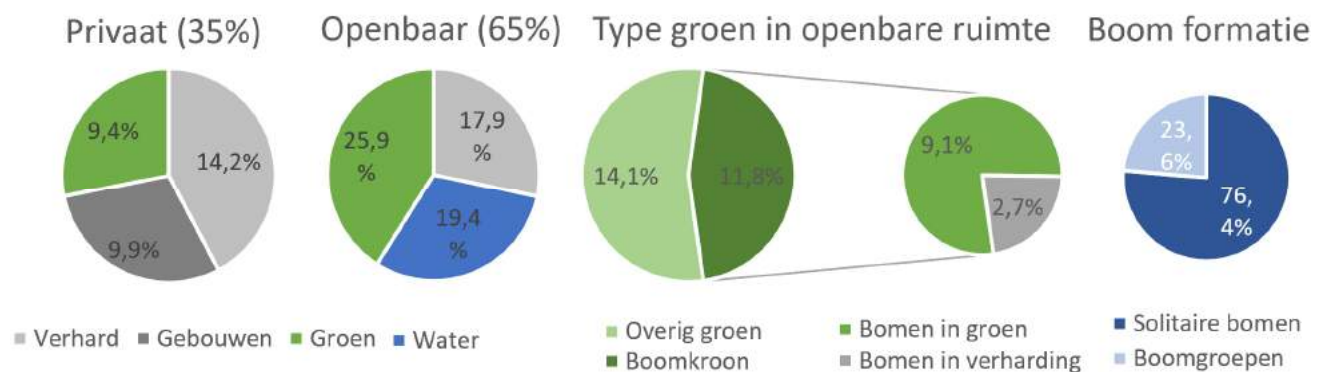


Figuur: H. Pötz, Atelier GroenBlauw

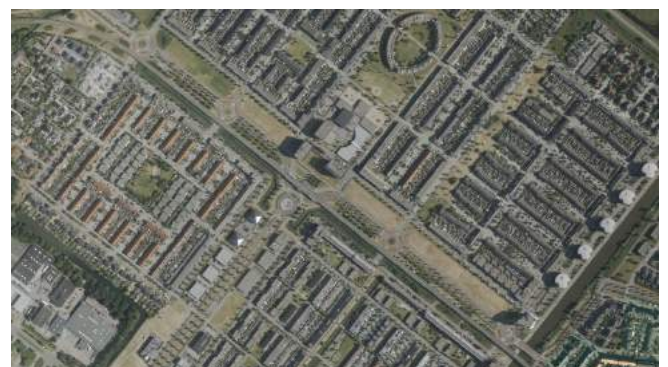
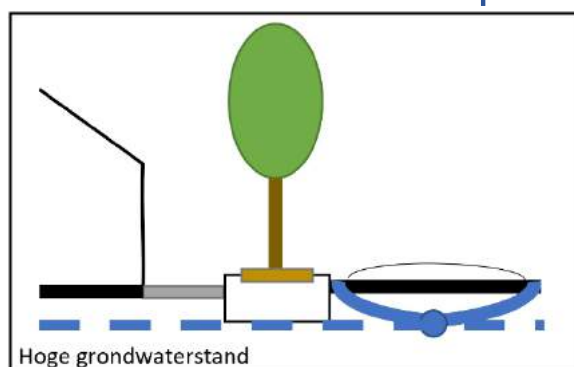
Analyse

- Voordelen en beschikbaarheid van bodemverbetering groeiplaats zijn algemeen bekend
- Omvang van ondergrondse groeiplaats is sterk bepaald door budgetten bij aanleg (4m² – 20m²)
- Grote variatie aan oorspronkelijke bodemopbouw en grondwaterstanden
- Daardoor ook grote variatie in aanbod openbaar groen/water
- Levensduur van aangebrachte bomen loopt nog, dus aandacht voor standplaatsverbetering tijdens de beheerfase

Karakteristieken per wijk



Karakteristieken op straatniveau





Figuur: H. Pötz, Atelier GroenBlauw

Zeer haalbare maatregelen

- Beschaduwen
- Toepassen bodembedekkers
- Extra snoeien van bomen
- Plaatsen bodemvochtsensoren
- Minder maaien gazon/creëren ruigere stukken
- Hol uitvoeren van groenvoorziening
- Verhogen oppervlaktewater-/grondwaterpeil
- Extra sproeien
- Creëren wortelruimte
- Verbeteren gasuitwisseling

Gemiddeld haalbare maatregelen

- Verbeteren bodemtextuur
- Optimalisatie drainerende werking
- Water onttrekken uit nabijgelegen oppervlaktewater
- Verbeteren bodemleven & nutriëntengehalte bodem

Minder haalbare maatregelen

- Ontharden/doorlatend maken verharding
- Aanplanten droogtebestendig groen
- Herverdelen van groen



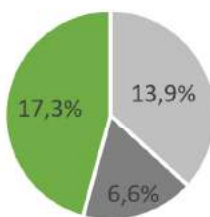
Figuur: H. Pötz, Atelier GroenBlauw

Analyse

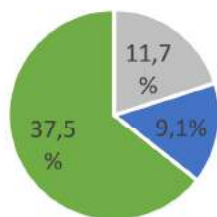
- Voordelen en beschikbaarheid van bodemverbetering groeiplaats zijn algemeen bekend
- Omvang van ondergrondse groeiplaats is sterk bepaald door budgetten bij aanleg (4m² – 20m²)
- Grote variatie aan oorspronkelijke bodemopbouw en grondwaterstanden
- Daardoor ook grote variatie in aanbod openbaar groen/water
- Levensduur van aangebrachte bomen loopt nog, dus aandacht voor standplaatsverbetering tijdens de beheerfase

Karakteristieken per wijk

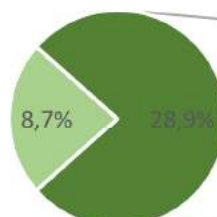
Privaat (40%)



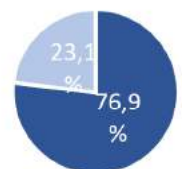
Openbaar (60%)



Type groen in openbare ruimte



Boom formatie



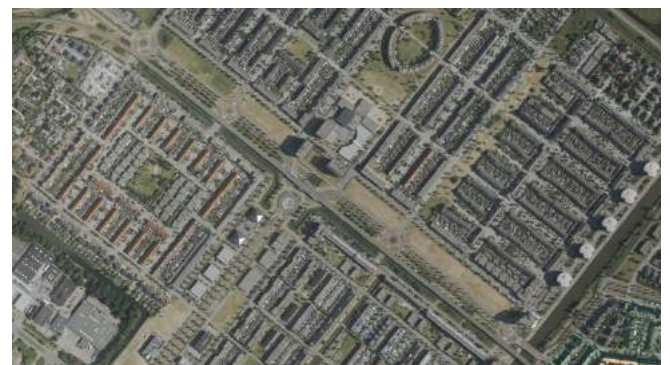
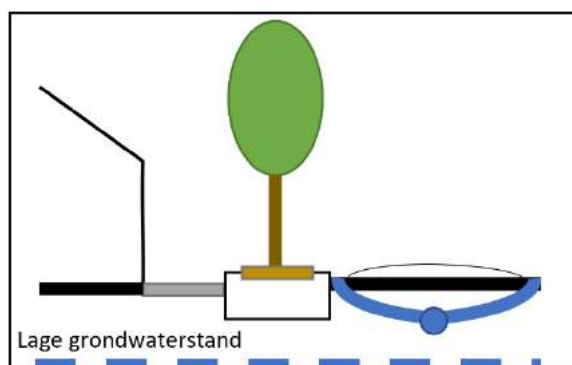
■ Verhard ■ Gebouwen ■ Groen ■ Water

■ Overig groen ■ Boomkroon

■ Bomen in groen ■ Bomen in verharding

■ Solitaire bomen ■ Boomgroepen

Karakteristieken op straatniveau





Figuur: H. Pötz, Atelier GroenBlauw

Zeer haalbare maatregelen

- Beschaduwen
- Toepassen bodembedekkers
- Extra snoeien van bomen
- Plaatsen bodemvochtsensoren
- Minder maaien gazon/creëren ruigere stukken
- Hol uitvoeren van groenvoorziening
- Lokaal benutten overtollig hemelwater
- Extra sproeien
- Creëren wortelruimte
- Verbeteren gasuitwisseling
- Herverdelen van groen

Gemiddeld haalbare maatregelen

- Verbeteren bodemtextuur
- Lokaal benutten overtollig hemelwater
- Verbeteren bodemleven & nutriëntengehalte bodem

Minder haalbare maatregelen

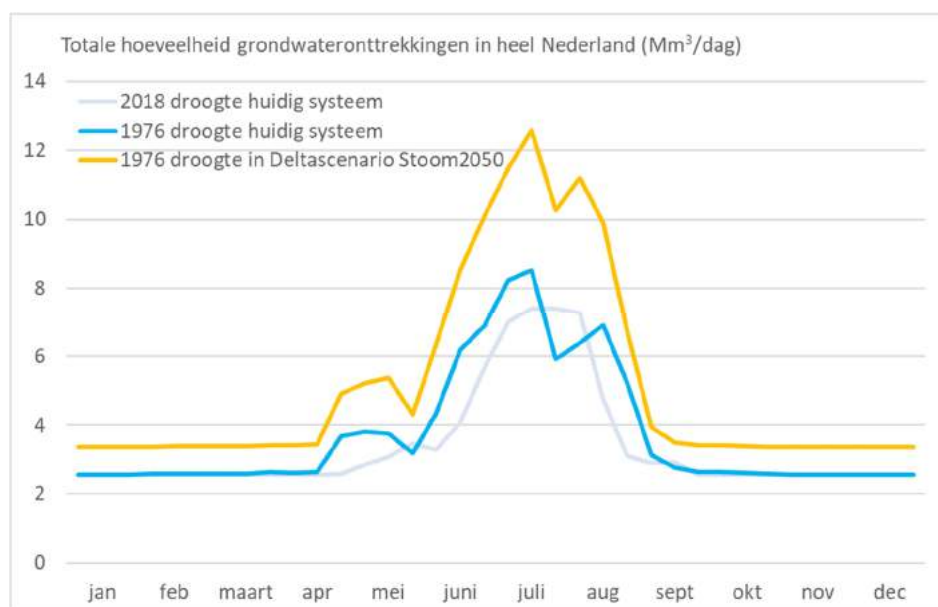
- Ontharden/doorlatend maken verharding
- Optimalisatie drainerende werking
- Water onttrekken uit nabijgelegen oppervlaktewater
- Verhogen oppervlaktewater-/grondwaterpeil
- Aanplanten droogtebestendig groen

6 Effect van droogte en maatregelen op waterbalans

Dit hoofdstuk beschrijft de uitkomsten van waterbalansberekeningen die op het schaalniveau van een wijk laten zien hoe balanstermen (zoals verdamping, vochtgehalte en grondwaterstand) wijzigen onder droge omstandigheden, en welk effect maatregelen hebben op die balanstermen. Het is een vrij complexe puzzel van variabelen die elkaar onderling beïnvloeden.

Uitgangspunt in de uitgevoerde analyse is dat voorkomen moet worden dat de stedelijke vergroening gaat bijdragen aan de onbalans tussen waterbehoefte en waterbeschikbaarheid die momenteel al bestaat. Er moet zoveel mogelijk gebruik worden gemaakt van in een wijk gevallen neerslag. Afwenteling van problemen door aanvoer van niet gebiedseigen water, moet worden voorkomen.

Afwenteling is al jaren duidelijk zichtbaar in hoog Nederland. Hier veroorzaakt grondwateronttrekking voor beregening, industrie en drinkwater in de zomer een toenemende onbalans. Juist in een kwetsbare periode, als al het groen in de natuur de grootste waterbehoefte heeft. Figuur 6.1 illustreert dit.



Figuur 6.1: De horizontale lijnen in het winterhalfjaar tonen de berekende landelijke grondwateronttrekking voor drinkwater en industrie. Tussen april en september neemt de totale grondwateronttrekking in een droog jaar sterk toe door onttrekking voor beregening in de landbouw. De gele lijn geeft een prognose voor een droog jaar in toekomstig klimaat en bij toename van watervraag voor drinkwater, industrie en beregening (bewerkte data van het Nationaal Water Model, Mens et al, 2020)

Vermindering van irrigatiebehoefte van stedelijk groen, door soortkeuze, optimalisatie van de groeiplaats en vochtvoorziening vanuit binnenstedelijk gevallen neerslag, is dus van belang.

Vanuit dit doel rijst dan de vraag of en hoe openbaar groen droogtebestendiger kan worden gemaakt, zonder dat de wateraanvoerbehoefte van een straat/wijk toeneemt? Dit is de primaire vraag die de modellering beantwoordt: maatregelen blijken zeker zinvol om droogte effecten te bestrijden. Maar zelfs een met maximale inzet van infiltratiemiddelen aangelegde watervoorraad kan droogtestress in extreem droge jaren niet voorkomen.

6.1 Het waterbalansmodel

De simulaties zijn uitgevoerd met het stedelijk waterbalansmodel van Deltares (Zhang, 2019, <https://publicwiki.deltares.nl/display/AST/Urban+Water+balance+model>). Dit is een multi-reservoir model waarin de belangrijkste componenten van de stedelijke waterbalans worden gesimuleerd als reservoirs en fluxen daartussen. De belangrijkste landgebruik typen (gebouwen, verhard oppervlak, open-verhard oppervlak, onverhard (groen) en water) worden gepresenteerd door aparte reservoirs. Neerslag dat op deze oppervlakken valt zal deels verdampen als interceptie of infiltreert in het geval van onverhard oppervlak naar de onverzadigde zone. In het geval dat neerslag valt op open-verhard oppervlak infiltreert het naar het grondwater en bij gebouwen en verharde oppervlakken infiltreert het water naar het water afvoersysteem. Van daaruit wordt het water afgevoerd naar de afvalwater zuivering of naar het oppervlakte water. Het water dat infiltreert in de onverzadigde zone zal direct verdampen, door plantenwortels worden opgenomen en transpireren via de vegetatie of wanneer de bodem nat wordt percoleren naar het grondwater.

Het water dat in het grondwater terechtkomt kan vervolgens in droge perioden alsnog via capillaire nalevering naar de onverzadigde zone stromen, draineren naar het oppervlaktewater, of percoleren naar het diepere grondwater. Wanneer het oppervlaktewaterpeil boven streefpeil komt wordt het afgevoerd naar het regionale oppervlaktewater en verdwijnt daarmee uit het systeem.

De simulaties zijn uitgevoerd met een meetreeksen van neerslag en verdamping van 30 jaar (1990-2020). Deze tijdreeks bevat ook de drie relatief droge jaren 2018, 2019 en 2020.

Bijlage 1, die is geschreven voor modellers, gaat dieper in op de werking van het model, de gebruikte instellingen en kentallen.

6.2 Balanstermen, indicatoren

De resultaten van de simulaties komen tot uiting in veranderingen van waterbalanstermen, of indicatoren, die iets zeggen over de waterbeschikbaarheid voor groen voor de verschillende situaties en het effect van maatregelen. De onderstaande indicatoren zijn gebruikt voor het weergeven van de waterbeschikbaarheid, waarbij de belangrijkste aannames zijn toegelicht:

- Bodemvocht in wortelzone [mm] – De hoeveelheid vocht in de wortelzone bepaalt de hoeveelheid water die beschikbaar is voor wortelopname door vegetatie. Voor de simulaties is de wortelzone gelijk gesteld aan de dikte van de leeflaag. De capaciteit van sommige soorten om ook direct uit het grondwater water op te nemen is niet meegenomen. Wortels zijn in het model dus afhankelijk van het bodemvochtgehalte.
- Actuele verdamping [mm/maand] – Wanneer er minder water beschikbaar is voor vegetatie om op te nemen met de wortels, neemt de verdamping af. In dit geval is de som van interceptie verdamping door vegetatie en transpiratie getoond. Verdamping is berekend op basis van een potentiële verdamping volgens Makkink en een verdampingsreductie door te veel of te weinig bodemvocht op basis van Feddes (1987).
- Droogtestress [dagen] – De stress die door vegetatie wordt ervaren wordt niet alleen bepaald door de mate van watertekort maar ook door de duur ervan. Voor stedelijke vegetatie zijn hier geen duidelijke criteria voor. In deze studie is aangenomen dat wanneer de verdamping door vochttekort in de bodem tot onder de 10% van de potentiële verdamping daalt, droogtestress door het groen wordt ervaren. De duur van deze stress is berekend.
- Grondwaterstand [m-MV] – De diepte van grondwater heeft een grote invloed op de capillaire nalevering naar de wortelzone en daarmee op de waterbeschikbaarheid voor vegetatie. Hoe dieper het grondwater onder het maaiveld staat hoe moeilijker de vegetatie hier gebruik van kan maken.

- Capillaire opstijging [mm/maand] – De capillaire nalevering is het water dat via zgn. capillaire actie vanuit het grondwater opstijgt naar de onverzadigde zone. Hoe groter deze capillaire opstijging naar de wortelzone, hoe meer water er in droge perioden beschikbaar is voor vegetatie.
- Grondwater aanvulling [mm/maand] – De grondwater aanvulling is het water dat vanuit de onverzadigde zone uitzakt naar het grondwater. Dit wordt bepaald door het neerslag overschot en het vochtvasthoudend vermogen van de bodem. Zo zal een kleiige of humusrijke bodem meer vocht in de top van het bodemprofiel vast kunnen houden dan een zandige bodem. In een zandige bodem percoleert het regenwater dus gemakkelijker door naar het grondwater.

6.3 Gesimuleerde varianten

Met het waterbalansmodel zijn een aantal representatieve situaties gesimuleerd die uiting geven aan verschillende instellingen van de drie sleutelfactoren:

- Soort (tot uiting gebracht in de mix gras/kruiden-struiken-bomen)
- Groeiplaats (tot uiting gebracht in de landgebruikskennmerken van wijktypen en bodemopbouw)
- Vochtvoorziening (tot uiting gebracht in watersysteemkennmerken zoals grondwaterstand, peilbeheer, drainagevoorzieningen).

6.3.1 Referentie situaties

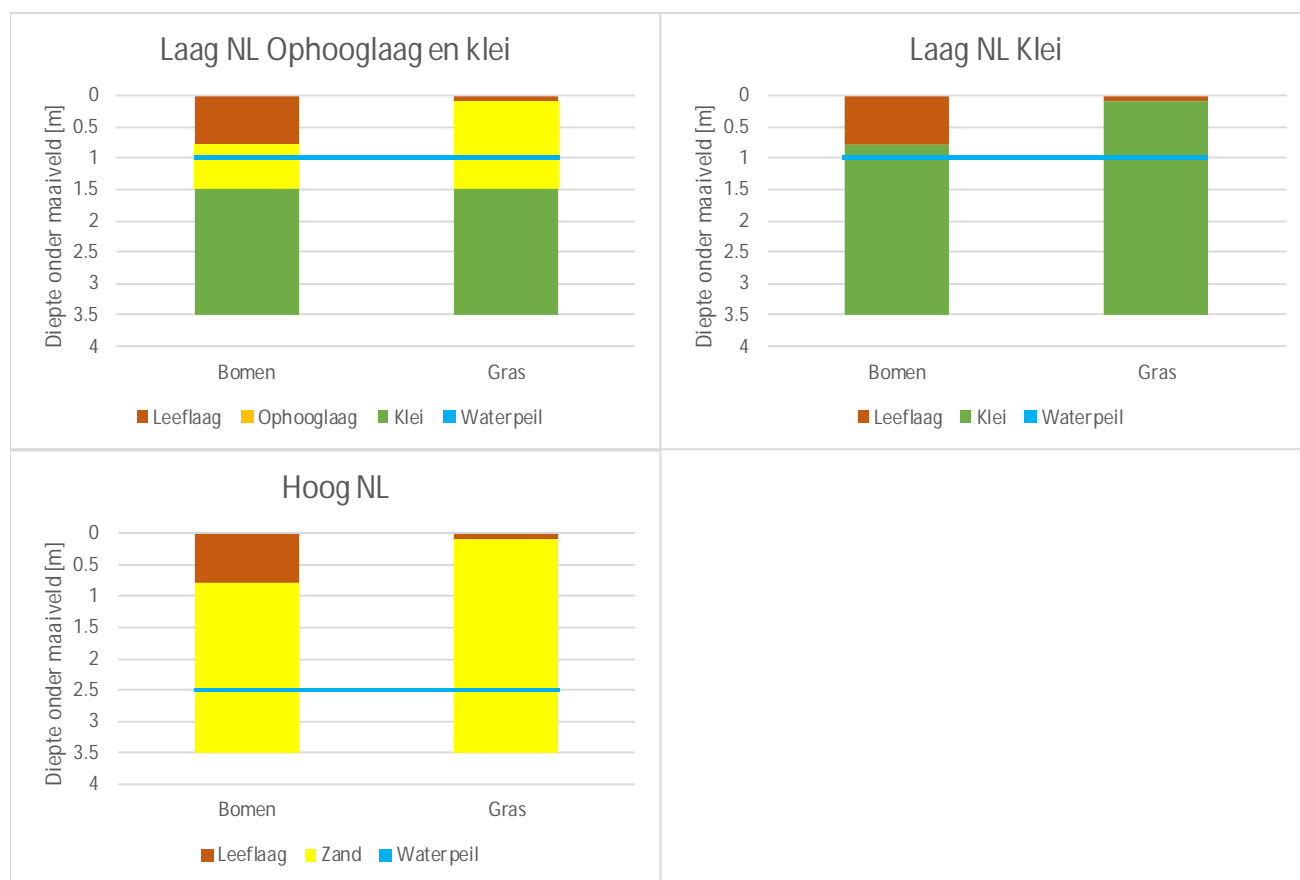
Alle drie wijktypen die in hoofdstuk 3 zijn beschreven, zijn gesimuleerd. Daarnaast zijn voor deze drie wijktypen drie combinaties van ondergrondopbouw en daarmee samenhangend verschillende grondwater situaties doorgerekend. Eén ondergrond situatie gebaseerd op hoog Nederland met diep grondwater en twee voor laag Nederland met ondiep grondwater met een verschillende wijze van bouwrijp maken (wel/niet gebruik van een zandige ophooglaag voor funderingen).

Het onderscheid naar wijktypen is gemaakt omdat de verschillende wijken variëren in verhouding private en openbare ruimte en in verhouding oppervlak gebouwen, wegen, groen en water. Figuur 6.2 geeft de opbouw van de ondergrond weer. Deze verschillen resulteren in verschillen in waterbalans en daarmee in waterbeschikbaarheid en de mogelijkheden voor maatregelen om deze te vergroten.

Het oppervlaktewaterpeil kan niet uitzakken onder het streefpeil. Voor laag Nederland is dit 1.0 m onder maaiveld en voor hoog Nederland 2.5 m onder maaiveld. Voor laag Nederland wordt er daarmee vanuit gegaan dat er voldoende water kan worden aangevoerd. Voor hoog Nederland zal dat niet mogelijk zijn en zal de grondwaterstand in de zomer overschat worden. Door de diepte onder maaiveld zal de invloed op de waterbeschikbaarheid voor groen beperkt zijn.

Tabel 6.1: Varianten in bodemopbouw, grondwatersituatie en wijktype, die zijn gesimuleerd met het waterbalansmodel

Situering	Type ondergrondsysteem: Bodemopbouw en diepte grondwater	Wijktype
Hoog NL	leeflaag op zand; diep grondwater	- Bloemkoolwijk/Oudere woonwijken - Vinexwijk
Laag NL	leeflaag op klei; ondiep grondwater	- Bloemkoolwijk/Oudere woonwijken - Vinexwijk
Laag NL	leeflaag op ophoogzand op klei; ondiep grondwater	- Bloemkoolwijk/Oudere woonwijken - Vinexwijk



Figuur 6.2: Opbouw van ondergrond voor de verschillende doorgerekende varianten. Waterpeil duidt op het oppervlaktewaterpeil.

6.3.2 Toegepaste maatregelen

Met maatregelen kan de waterbeschikbaarheid voor groen worden vergroot. Er zijn zeer veel maatregelen die kunnen bijdragen aan het vergroten van de beschikbaarheid van water voor vegetatie. Er is een selectie van maatregelen doorgerekend die qua wijze van effect op de waterbalans een groot deel van het spectrum van maatregelen afdekken. Deze maatregelen zorgen direct of indirect voor een grotere waterbeschikbaarheid in de wortelzone van de vegetatie middels vergroting van de infiltratie van regenwater, jaarrond. De volgende maatregelenvarianten zijn doorgerekend:

1. Waterdoorlatende verhardingen. Alle verharding wordt vervangen door waterdoorlatende of waterpasserende verharding. Neerslag infiltreert in de verharding en percoleert naar het grondwater.
2. Verhardingen worden afgekoppeld en neerslag stroomt af naar het groen waar het infiltreert. Hierdoor neemt het bodemvocht gehalte toe en zal het grondwaterpeil stijgen.
3. Gebouwen én verhardingen worden afgekoppeld en neerslag stroomt af naar het groen waar het infiltreert. Hierdoor neemt het bodemvocht gehalte toe en zal het grondwaterpeil stijgen.
4. Grondwaterspiegel verhogen verkleinen (1.0m drooglegging naar 0.7m). Door het oppervlaktewaterpeil te verhogen stijgt het grondwaterpeil.
5. Dikte leeflaag vergroten, en daarmee de beschikbare en door het groen benutte wortelzone vergroten.

De maatregelen zijn in de berekeningen gemaximaliseerd. Afkoppelen betekent dus bijv. dat alles dat afgekoppeld kan worden ook is afgekoppeld. Dit is een belangrijk gegeven voor de interpretatie van de resultaten. De varianten weerspiegelen wat maximaal haalbaar is. Als de uitkomst daarvan geen soelaas biedt, zal een minder extreme variant dat zeker niet doen.

Om het aantal model simulaties te beperken is het effect van deze maatregelen alleen bepaald voor het wijktype bloemkoolwijk. Dit type is geselecteerd omdat wordt verwacht dat veel van deze wijken de komende jaren worden aangepakt en omdat deze wijk qua landgebruik verhoudingen vergelijkbaar is met de oudere wijk.

Er is gerekend aan bloemkoolwijken in hoog Nederland, met het bodemprofiel 'leeflaag op zand' en aan bloemkoolwijken in laag Nederland met het bodemprofiel 'leeflaag op zandige ophooglaag op klei'. In de laatstgenoemde situatie worden in laag Nederland de grootste droogte effecten verwacht, en bestaat dus de grootste behoefte aan maatregelen.

6.3.3 Klimaat- en weersomstandigheden

Voor alle varianten en maatregelen zijn de waterbalansen berekend met de meteo data van de afgelopen 30 jaar (1991 t/m 2020). Vervolgens zijn uit de resultaten de waarden van de verschillende indicatoren geselecteerd die de waterbalans representeren:

- Over een geheel klimatologisch gemiddeld jaar ('gemiddeld')
- In een gemiddelde maand augustus, vaak de maand waarin de bodemdroogte piekt ('augustus')
- In de maand juli van het extreem droge jaar 2018, in deze maand piekte de bodemdroogte van 2018 ('droog').

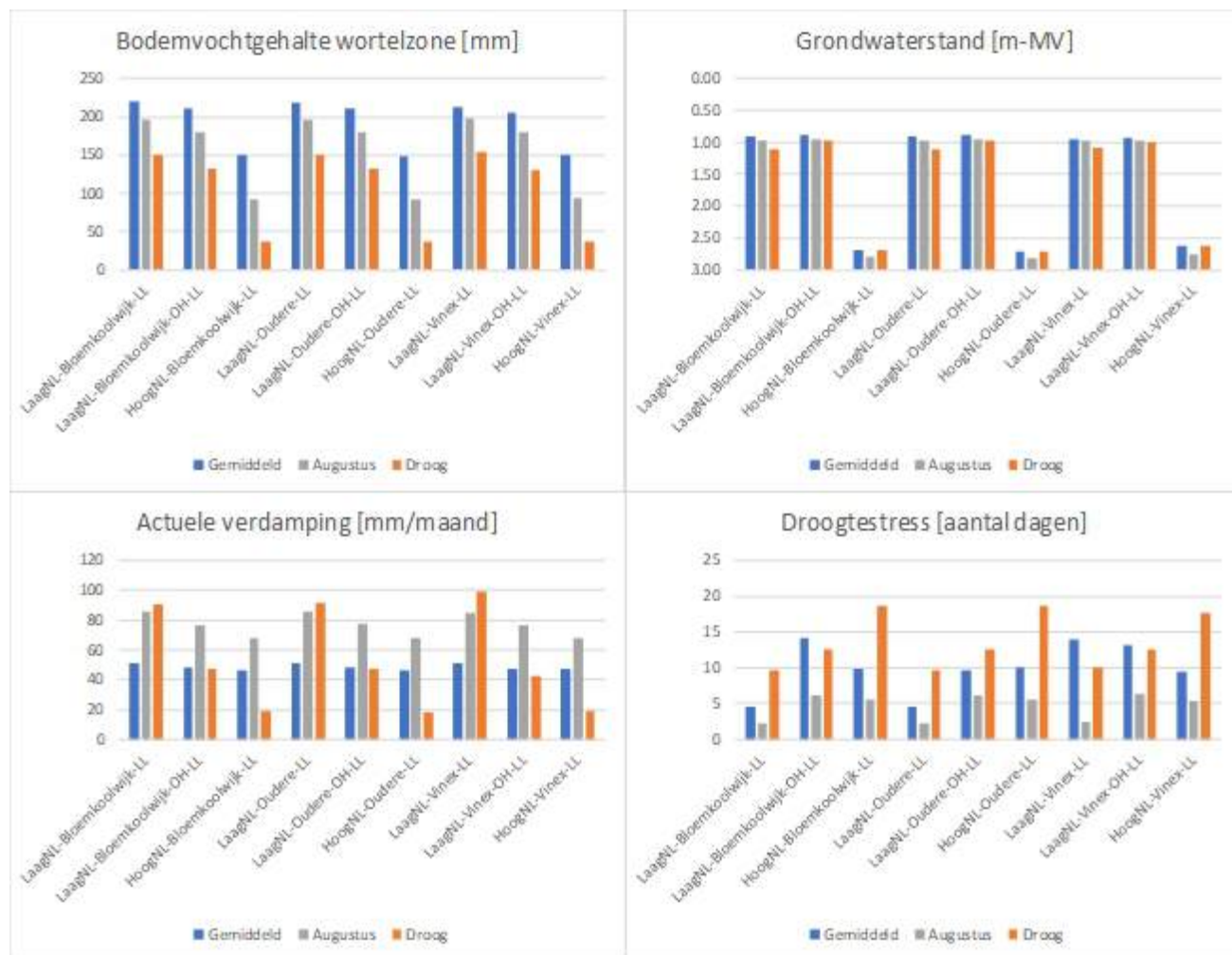
Een vergelijk tussen deze situaties brengt op compacte wijze de voornaamste verschillen in de waterbalansen naar voren. Duidelijk wordt hoe de omstandigheden verschillen in een gemiddelde maand augustus t.o.v. de gemiddelde omstandigheden in een jaar, en hoeveel erger de piekdroogte was in 2018 t.o.v. de piekdroogte in een gemiddelde augustusmaand. En vervolgens hoeveel adaptief effect het toepassen van maatregelen in deze situaties heeft.

6.4 Modelresultaten

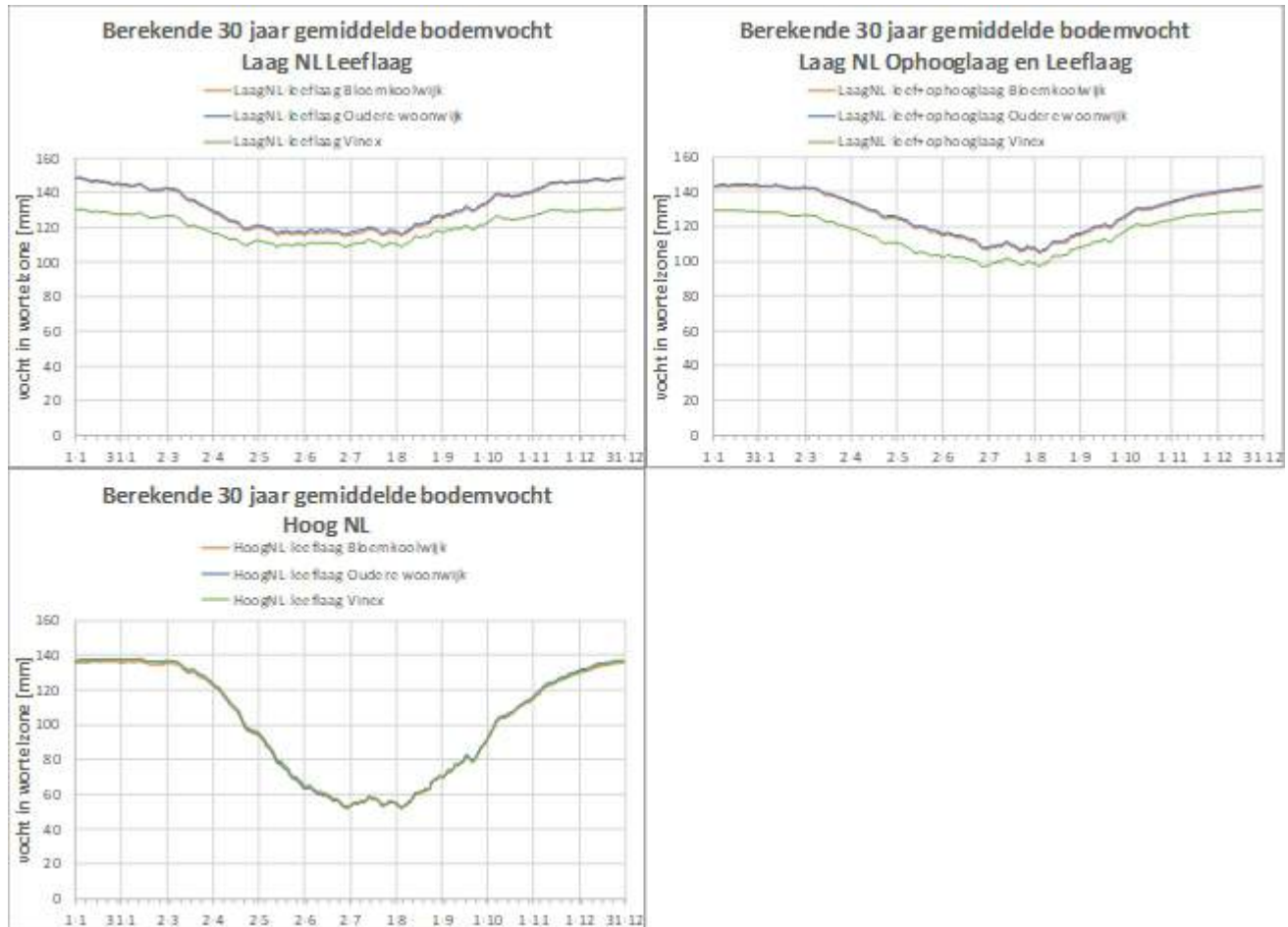
6.4.1 Waterbalans in referentie situaties

De resultaten in de vorm van droogte indicatoren die de waterbeschikbaarheid voor groen weergegeven worden getoond in Figuur 6.3. Het vochtgehalte van de wortelzone bepaalt voor het belangrijkste deel de waterbeschikbaarheid voor vegetatie. Het verloop van het bodemvocht wordt daarom eerst in meer detail toegelicht aan de hand van het 30-jaar gemiddeld verloop van het bodemvocht over een jaar (Figuur 6.4).

In alle combinaties van wijkentypen en ondergrondsituaties daalt in een gemiddeld jaar vanaf april het bodemvocht tot het einde van de zomer (Figuur 6.4). In deze periode is de actuele verdamping groter dan de neerslag. Daarna neemt aan het einde van de droge periode in de herfst het bodemvochtgehalte weer toe tot het niveau aan het begin van het jaar.



Figuur 6.3: Variabelen die waterbeschikbaarheid en -verbruik illustreren voor de wijktypen in hoog Nederland (HoogNL) met een leeflaag op de zandige ondergrond, en in laag Nederland (LaagNL) met een leeflaag op kleiige ondergrond (LL) en met een leeflaag op een zandige ophooglaag op klei (OH-LL).



Figuur 6.4: Jaarlijks verloop van het bodemvocht voor de drie wijktypen in hoog en laag Nederland en daarbij behorende ondergrond situaties.

Verskil in waterbalans tussen wijktypen is beperkt

Het verschil tussen de wijktypen komt in de berekeningen voornamelijk tot uiting via de kenmerkende oppervlaktes die per wijktipe in gebruik zijn voor bebouwing, verharding, groen en water.

De verschillen in waterschikbaarheid voor groen tussen de wijktypen zijn klein. Dit blijkt zowel uit de droogte indicatoren (Figuur 6.3) en uit het verloop van het bodemvocht (Figuur 6.4). De waterbalansverschillen van de oudere wijk en bloemkoolwijk zijn gering doordat de oppervlaktes van de landgebruiksklassen in deze wijken vrijwel identiek zijn. De ruimtelijke verdeling hiervan is wel anders, maar dit kan niet in het balansmodel worden verdisconteerd. De vinexwijk vertoont een iets sterker afwijkende waterbalans in met name laag Nederland. Het landgebruik in de vinexwijk wijkt iets meer af, maar het grootste verschil wordt veroorzaakt door een grotere dichtheid van watergangen. Dit resulteert in een lagere drainage weerstand van het grondwater, waardoor het grondwater sneller wordt afgevoerd naar het oppervlaktewater en daardoor minder fluctueert.

Het bodemvocht gehalte het hoogst in laag Nederland en het laagst in hoog Nederland

De ondergrondssituatie heeft een grote invloed op de waterbalans en waterbeschikbaarheid voor groen. Het bodemvochtgehalte is het hoogst in laag Nederland waarbij een leeflaag direct op klei is aangebracht. Hierdoor blijft de grondwaterstand hoger waardoor er ook meer capillaire nalevering plaatsvindt. Het grondwaterpeil varieert hier tussen de 0.77 m en 1.04 m onder maaiveld en staat daarmee dichtbij de onderkant van de wortelzone.

In de situatie in laag Nederland met een zandige ophooglaag onder de leeflaag is het bodemvochtgehalte lager. Dit wordt veroorzaakt door de beperkte capillaire opstijging door het zandige materiaal van het ophoogzand. Het grondwaterpeil verschilt beperkt ten opzichte van de situatie met een leeflaag direct op klei en heeft daardoor een verwaarloosbare invloed op het lagere vochtgehalte.

Het laagst is het vochtgehalte van de wortelzone in hoog Nederland. In hoog Nederland is uitgegaan van een oppervlaktewaterpeil van 2.5 m onder maaiveld wat er voor zorgt dat het grondwaterpeil fluctueert tussen 2,3 m en 2,8 m onder maaiveld. De diepe grondwaterstand en de zandige ondergrond resulteren in een beperkte capillaire opstijging en daardoor laag bodemvochtgehalte.

Droogtestress het hoogst in hoog Nederland en het laagst in laag Nederland

Het lage vochtgehalte van de wortelzone leidt tot droogtestress (aantal dagen dat de verdamping < 10% potentiële verdamping) en is hierdoor het hoogst in hoog Nederland en het laagst in laag Nederland waar de leeflaag direct op klei is aangebracht. In een gemiddeld jaar valt de helft van het aantal droogtestress dagen in augustus. In het droge jaar 2018 is het aantal dagen met droogtestress in juli in alle situaties ongeveer twee keer zo hoog als het aantal dagen met droogtestress in een gemiddeld jaar.

De verdamping is relatief hoog in juli van het droge jaar 2018 in laag Nederland voor de situatie met een leeflaag direct op klei. Dit komt door de hoge potentiële verdamping in combinatie met de hoge grondwaterstand die bij bomen zorgt voor een grote capillaire nalevering. In hoog Nederland en in laag Nederland met een zandige ophooglaag onder de leeflaag is de actuele verdamping lager dan het jaar gemiddelde en een gemiddelde augustus maand.

In het model vindt wateropname door de wortels alleen plaats in de leeflaag die in het balansmodel maatgevend is voor de dikte van de wortelzone. In de praktijk zullen veel soorten dieper wortelen dan de leeflaag richting de capillaire of verzadigde zone. Dit zal de droogtestress doen verlagen.

Tijdens extreme droogte in hoog Nederland grootste daling bodemvocht en het grootste stijging droogtestress

In hoog Nederland is het bodemvochtgehalte in de zomer lager dan in laag Nederland en daalt die bij extreme droogte het sterkst. In hoog Nederland daalt het bodemvocht in een gemiddelde augustus maand tot 92 mm maar in juli van het droge jaar 2018 daalde het bodemvocht in juli al tot 36mm. Het aantal dagen met droogtestress komt in juli 2018 daarmee op 18. In een gemiddelde augustus maand (maand met het meeste droogtestress dagen) zijn dit er slechts 5.5.

In Laag Nederland daalt het bodemvocht in een gemiddelde augustus maand tot 192 mm in de situatie met alleen een leeflaag en tot 180 mm in de situatie met een zandige ophooglaag onder de leeflaag. In juli van het droge jaar 2018 daalde het bodemvocht in juli tot respectievelijk 150 mm en 133 mm. Het aantal dagen met droogtestress resulteert in laag Nederland in juli 2018 in 10 dagen met droogtestress in de situatie met alleen een leeflaag en 13 dagen in de situatie met een zandige ophooglaag onder de leeflaag. In een gemiddelde augustus maand zijn dit respectievelijk slechts 2 en 6 dagen.

6.4.2 Effect van maatregelen op de waterbalans

Ook het effect van maatregelen die de waterbeschikbaarheid voor vegetatie zouden moeten vergroten is onderzocht met het waterbalansmodel. Het effect van de maatregelen wordt eerst besproken voor hoog Nederland en daarna voor laag Nederland.

Maatregelen in hoog Nederland

Voor hoog Nederland is het effect van de volgende maatregelen op de waterbeschikbaarheid doorgerekend: water passerende verharding, daken en wegen afkoppelen, wegen afkoppelen en dikkere leeflaag aanbrengen. Peilopzet is niet als maatregel doorgerekend omdat deze maatregel in hoog Nederland doorgaans niet mogelijk is.

Figuur 6.5 toont een samenvatting van het effect van de maatregelen op de waterbeschikbaarheid. Daarnaast tonen Figuur 6.6 en Figuur 6.7 respectievelijk het verloop van het bodemvocht en het grondwaterpeil in het droge jaar 2018.

In hoog Nederland daalt bodemvocht het meest en het grondwater traag

In het droge jaar 2018 daalt het bodemvocht vanaf ongeveer half april tot de tweede helft van juli, waarbij er nog twee nattere perioden zijn eind april en eind mei. In de referentiesituatie en bij alle maatregelen stijgt het vochtgehalte in de wortelzone aan het einde van het jaar weer naar eenzelfde niveau als aan het begin van het jaar.

Het grondwatersysteem reageert in hoog Nederland traag en het grondwaterniveau daalt tot eind november. Aan het einde van het jaar is de grondwaterstand dan ook nog niet op het niveau van 1 januari.

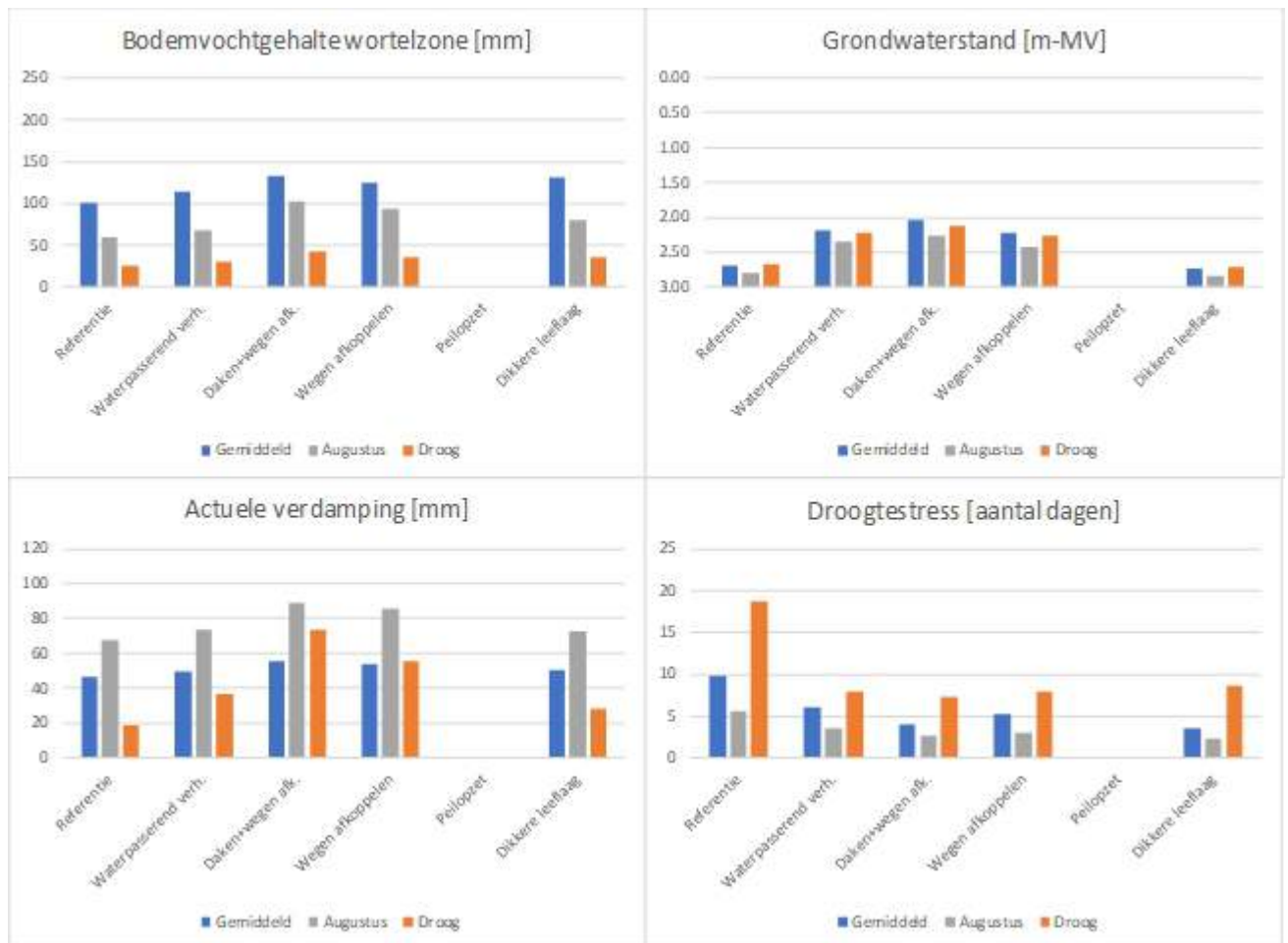
Afkoppelen en verdikken leeflaag meest effectief voor vergroten waterbeschikbaarheid

Op basis van de berekeningen blijken het afkoppelen van daken en wegen naar het onverharde gebied het meest effectief voor het verhogen van het bodemvochtgehalte en daarmee het verhogen van de verdamping. Dit geldt voor de verdamping per jaar, in een gemiddelde augustus maand en in juli van het droge jaar 2018. Deze maatregelen zijn vooral effectief voor het weer aanvullen van het bodemvocht in de wortelzone in perioden van regen. Hierdoor stijgt het bodemvocht bij toepassen van deze maatregel het snelst.

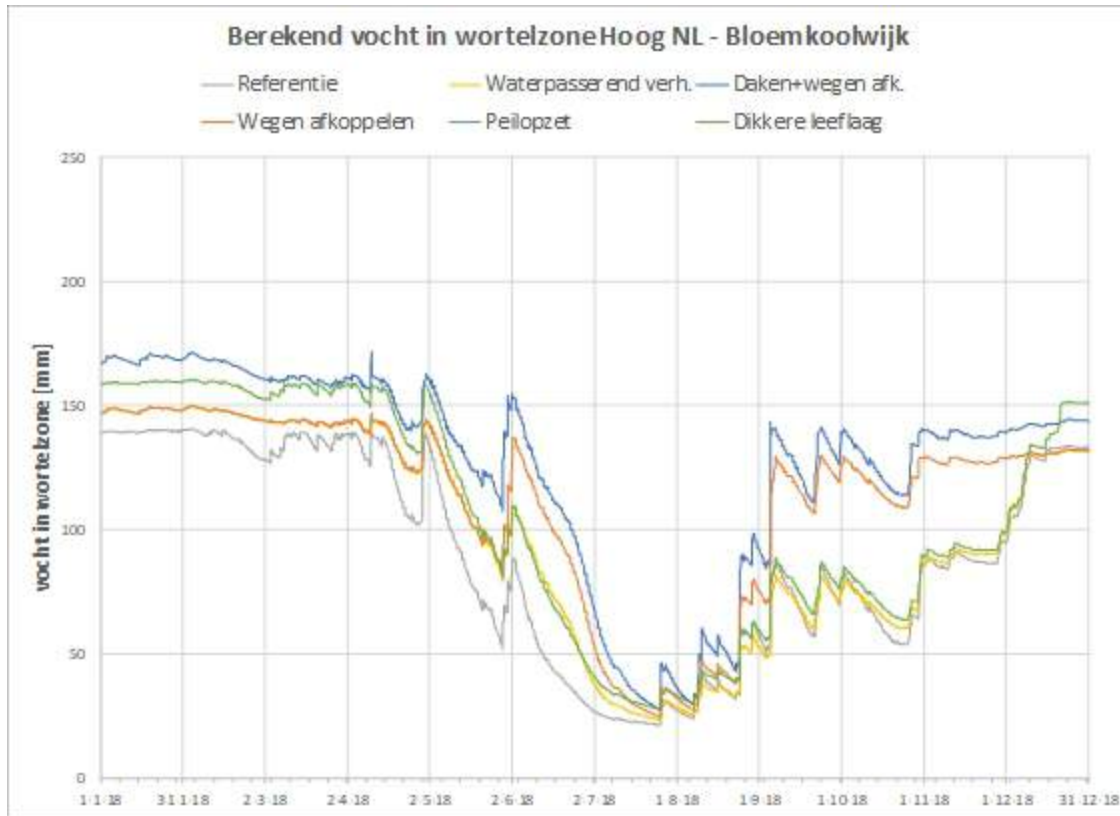
Het afkoppelen van wegen en daken en alleen wegen zijn effectief in het verhogen van de grondwaterstand (tot 0,6m). Dit komt doordat meer water infiltreert en daarna percoleert naar het grondwater. Het grondwaterpeil stijgt daardoor ook weer sneller aan het einde van de droge periode.

Het toepassen van een dikkere leeflaag zorgt voor een hoger bodemvochtgehalte, doordat er langer vocht beschikbaar is voor groen. De aanvulling van het bodemvocht duurt wel langer dan bij het afkoppelen van daken en wegen. Het verdikken van de leeflaag zorgt daarnaast voor een verlaging van de grondwaterstand. Dit komt doordat er meer vocht wordt vastgehouden in de leeflaag waarvan een deel door de vegetatie wordt opgenomen en verdampt. Ook het verdikken van de leeflaag zorgt ervoor dat het aantal droogtestress dagen meer dan gehalveerd wordt.

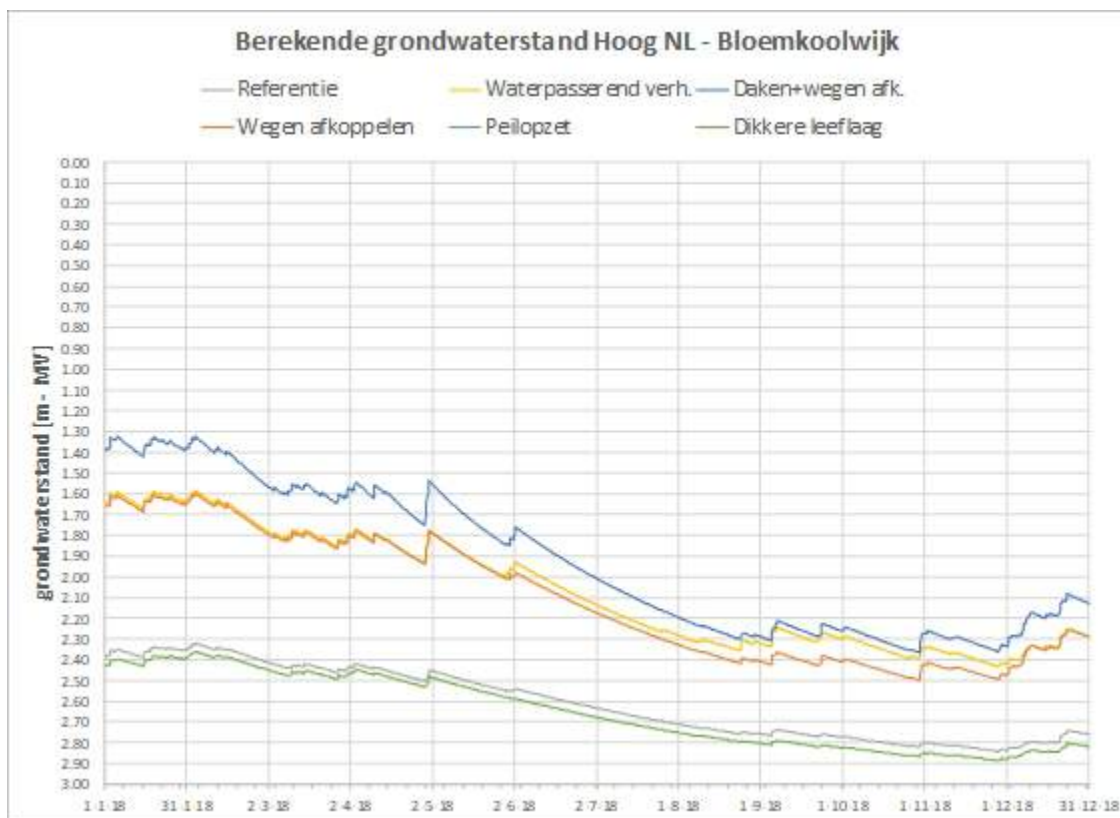
Het toepassen van waterpasserende verharding is het minst effectief voor het verhogen van het bodemvochtgehalte doordat het water dat door de verharding infiltreert maar beperkt beschikbaar komt voor de vegetatie. Hierdoor neemt de verdamping maar heel beperkt toe en het aantal droge dagen nauwelijks af. Het toepassen van waterpasserende verharding zorgt wel voor een verhoging van de grondwaterstand die vergelijkbaar is met het afkoppelen van de wegen. Door de grote diepte van het grondwater blijft het effect op de capillaire nalevering en het vochtgehalte van de wortelzone beperkt.



Figuur 6.5: Effect van maatregelen op waterbalanstermen in een Bloemkoolwijk in hoog Nederland in de situatie waarbij een leeflaag is aangebracht op zand. In hoog Nederland is geen oppervlaktewater. Daardoor is de maatregel 'peilopzet' niet toepasbaar en is hiervoor geen staafdiagram voor weergegeven. Gemiddeld: gemiddelde (30 jaar) waarde voor bodemvocht, grondwaterstand en verdamping en som van aantal droge dagen per jaar. Augustus: gemiddelde waarde voor augustus (30 jaar). Droog: gemiddelde waarde voor juli 2018.



Figuur 6.6 Effect van maatregelen op het bodemvochtgehalte van de wortelzone voor een bloemkoolwijk in hoog Nederland voor het droge jaar 2018.



Figuur 6.7 Effect van maatregelen op de grondwaterstand voor een bloemkoolwijk in hoog Nederland.

Maatregelen in Laag Nederland

Voor laag Nederland zijn de volgende maatregelen doorgerekend: water passerende verharding, daken en wegen afkoppelen, wegen afkoppelen, peilopzet en dikkere leeflaag aanbrengen.

Figuur 6.8 toont een samenvatting van het effect van de maatregelen op de waterbeschikbaarheid. Daarnaast tonen

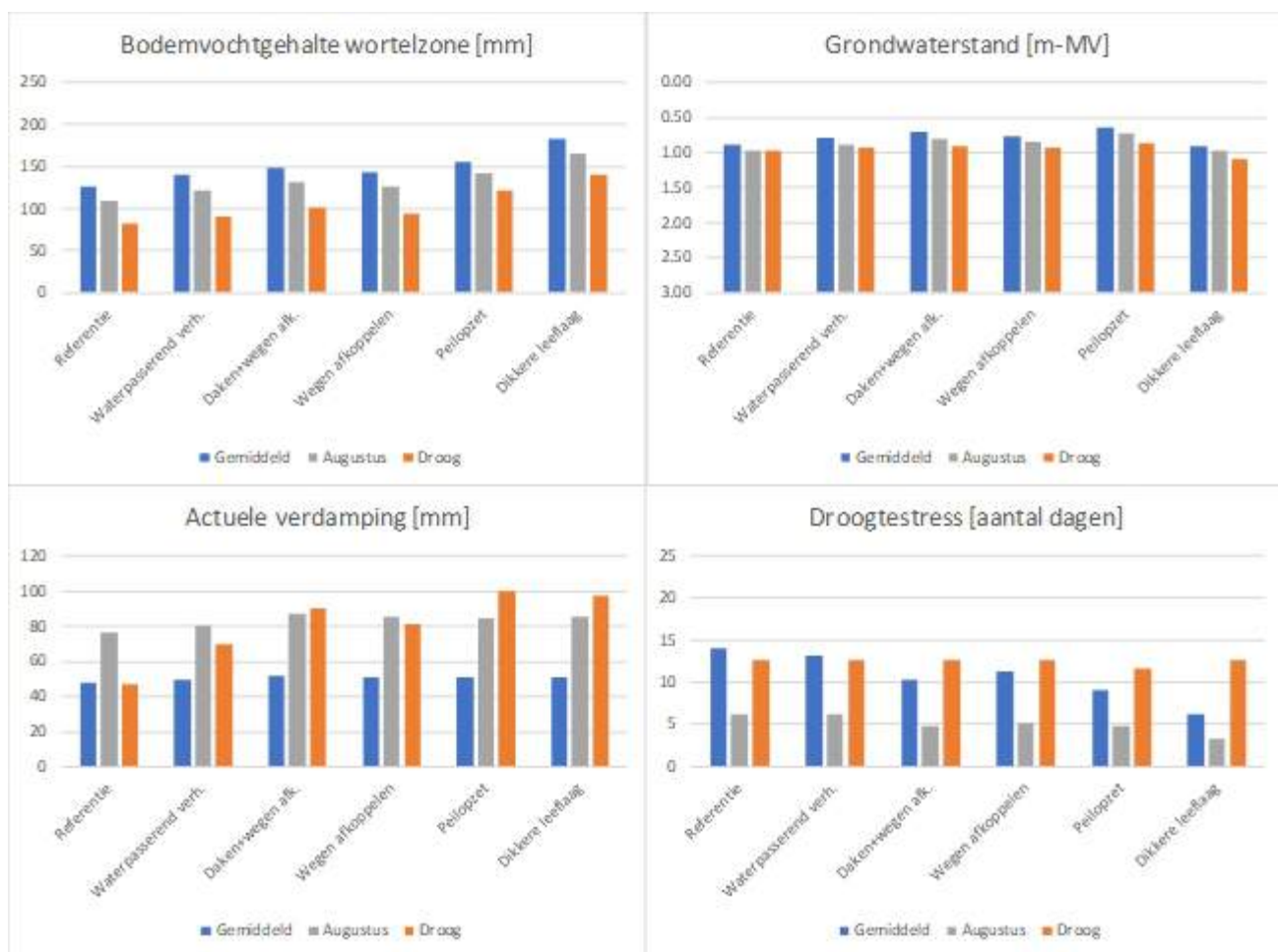
Figuur 6.9 en

Figuur 6.10 respectievelijk het verloop van het bodemvocht en de grondwaterstand in het droge jaar 2018.

Bodemvochtgehalte blijft in laag Nederland relatief hoog en grondwater reageert snel

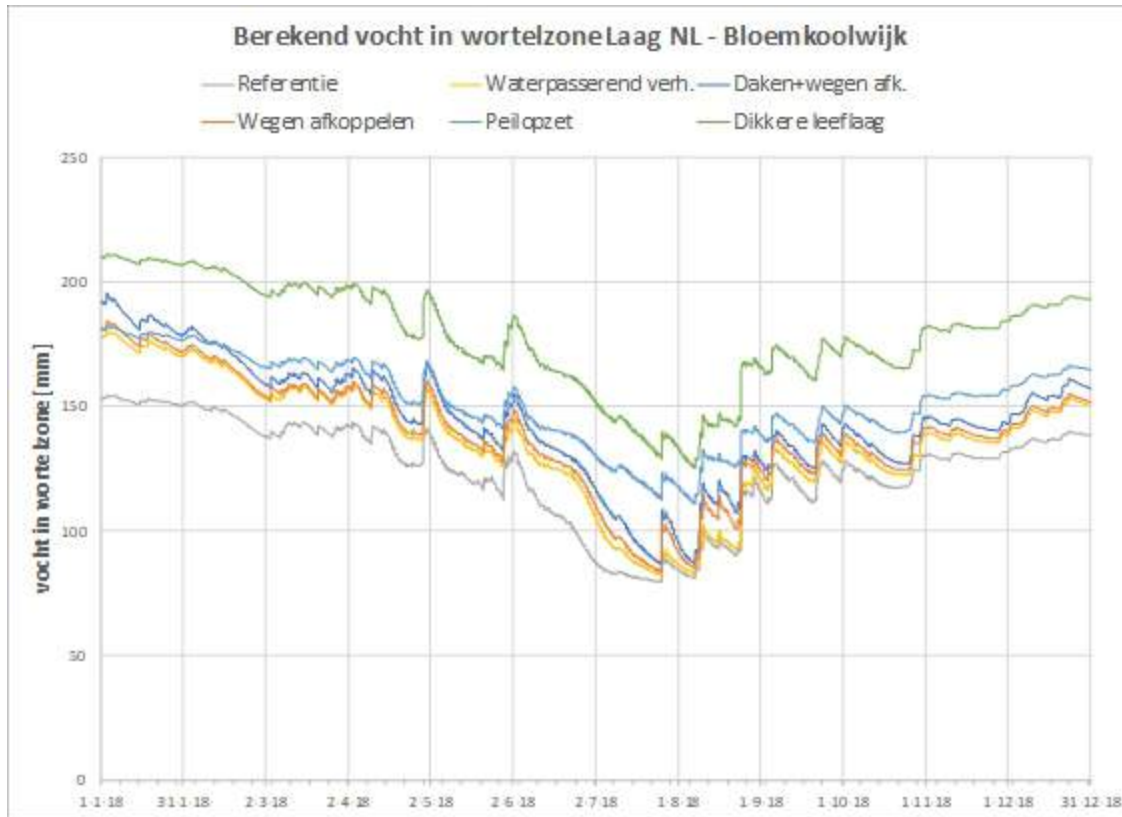
Het vochtgehalte van de wortelzone is in laag Nederland gedurende het hele jaar hoger dan in hoog Nederland. Het hogere vochtgehalte in de wortelzone komt door de grotere capillaire nalevering die het gevolg is van het ondiepere grondwater. Ook in laag Nederland daalt in het droge jaar 2018 het bodemvocht vanaf ongeveer half april tot de tweede helft van juli. Alle gesimuleerde maatregelen zorgen voor een hoger vochtgehalte in de wortelzone gedurende de droogte. Na de droogte stijgt bij de referentie situatie en bij alle maatregelen het vochtgehalte van de wortelzone aan het einde van het jaar weer naar eenzelfde niveau als op 1 januari.

Het grondwatersysteem reageert in laag Nederland sneller dan in hoog Nederland en het grondwaterniveau daalt tot 'slechts' eind augustus. Hoewel het grondwaterniveau daarna sterker stijgt dan in hoog Nederland, komt het grondwater niet meer op hetzelfde niveau als aan het begin van het jaar (Figuur 6.10).



Figuur 6.8: Effect van maatregelen op waterbalanst termen in een Bloemkoolwijk in laag Nederland waarbij een leeflaag is aangebracht op een zandige ophooglaag, die ligt op een kleiige ondergrond. Gemiddeld: gemiddelde (30 jaar) waarde voor bodemvocht, grondwaterstand en verdamping en som van

aantal droge dagen per jaar. Augustus: gemiddelde waarde voor augustus (30 jaar). Droog: gemiddelde waarde voor juli 2018.



Figuur 6.9 Effect van maatregelen op het bodemvochtgehalte van de wortelzone voor een bloemkoolwijk in laag Nederland in de situatie waarbij een leeflaag is aangebracht op een ophooglaag op klei.



Figuur 6.10 Effect van maatregelen op de grondwaterstand voor een bloemkoolwijk in laag Nederland in de situatie waarbij een leeflaag is aangebracht op een ophooglaag op klei.

Afkoppelen en verdikken leeflaag sowieso effectief voor vergroten waterbeschikbaarheid

Het verdikken van de leeflaag zorgt voor een toename van de hoeveelheid vocht in de wortelzone doordat meer vocht opgeslagen kan worden in de dikkere leeflaag. Gedurende droge perioden is daardoor langer vocht beschikbaar voor groen. De dikte van de leeflaag voor gras is vergroot van 0.1 m naar 0.2 m en voor bomen van 0.8 m naar 1.0 m waardoor het effect op de hoeveelheid vocht in de wortelzone beperkt is. De aanvulling duurt bij deze maatregel langer dan bij het afkoppelen van daken en wegen. Hoewel de toename in vochtgehalte in de wortelzone beperkt is, halveert het aantal dagen met droogtestress op jaarbasis en in de maand augustus. In het extreem droge jaar 2018 is het effect beperkt doordat deze maand werd voorafgegaan door een langdurige droogte waardoor ook de dikkere leeflaag al zeer droog was. De regen van half augustus 2018 heeft op deze maatregel een beperkt effect. Door de dikkere leeflaag neemt ook de verdamping door vegetatie, die deels gevoed wordt door een grotere capillaire nalevering, toe.

Ook het afkoppelen van daken en wegen en alleen wegen naar het onverhard gebied zijn effectief om de waterschikbaarheid te verhogen. Het vochtgehalte van de wortelzone neemt door deze maatregel sterk toe. Deze maatregel is vooral effectief in het aanvullen van het vocht in de wortelzone in perioden van regen. Hierdoor stijgt het vochtgehalte bij toepassen van deze maatregel het snelst. Wanneer het droog is neemt het vochtgehalte van de wortelzone daar ook weer snel af.

Het afkoppelen van wegen en van daken en wegen zijn effectief in het verhogen van de grondwaterstand. Dit komt doordat in natte perioden meer water infiltreert en daarna percoleert naar het grondwater. In het droge jaar 2018 stijgt het grondwater aan het einde van de droge periode daardoor sneller.

Ook peilopzet in laag Nederland effectief voor vergroten waterbeschikbaarheid

Voor laag Nederland is ook het effect van peilopzet bepaald. Door peilopzet stijgt het grondwater tot dicht bij de wortelzone en voor bomen zelfs tot in de wortelzone. Peilopzet zorgt daardoor voor een sterke toename capillaire nalevering naar de wortelzone waardoor er meer water beschikbaar is voor groen. In een gemiddelde augustus maand blijven het bodemvochtgehalte en de verdamping hoog, en neemt de droogte stress af. In de extreem droge juli maand van 2018 is de maatregel zelfs het meest effectief. De droogtestress is door deze maatregel dan ook het laagst. Uiteraard stijgt ook de grondwaterstand door deze maatregel. Peilopzet kan ook tot te hoge grondwaterstanden leiden waardoor wortels kunnen afsterven door zuurstofgebrek.

Waterpasserende verharding minst effectief

Het toepassen van waterpasserende verharding is het minst effectief doordat het water dat door de verharding infiltreert niet direct beschikbaar komt voor de vegetatie. De effectiviteit van deze maatregel kan voor straatbomen in praktijk groter zijn wanneer waterpasserende verharding specifiek rond de straatbomen wordt aangebracht. Hierdoor komt de infiltrerende neerslag direct bij de boomwortels uit. Dit is met het huidige modelopzet niet onderzocht.

7 Raming van opgetreden en te verwachten schades

Dit hoofdstuk gaat in op de raming van de kosten van droogte. Welke schade aan groen valt te verwachten door droogte, zowel financieel als functioneel? Onder functionele schade verstaan we situaties waarin groen niet meer de baten kan leveren die er zonder droogte wel waren.

Dit project onderdeel onderzocht de mogelijkheden om te komen tot een methode voor raming of schatting van toekomstige schades en verlies van baten door droogte. Deze schattingen moeten bruikbaar zijn in de afweging van investeringen in aanleg en onderhoud van klimaatbestendig groen.

Om zo'n methode op te zetten zijn de volgende stappen doorlopen:

1. *Definiëren van typen schades; Vanuit deze definities zijn vervolgens verschillende methoden om schades te berekenen bepaald.*
2. *Analyse droogteperiode 2018-2020; Voor het bepalen van de grootte van schade is het belangrijk deze te kunnen kwantificeren. In deze stap is onderzoek gedaan naar de laatste droogteperiode en wat zichtbaar is in data die gemeenten verzamelen ten aanzien van hun groenbeheer. Valt iets te zeggen over de omvang van uitval of slechtere groei in de afgelopen droogteperiode?*
3. *Bepalen omvang droogteschade aan groen; Als een droogteperiode optreedt en over een aantal jaar neemt de uitval van bomen toe, valt dan te berekenen wat het effect hiervan is op het bomenbestand over 30, 60 en 90 jaar?*
4. *Beoordelen beschikbare methoden om baten van groen te bepalen; Vervolgens is gekeken naar welke beschikbare methoden er bestaan om de baten van groen uit te rekenen. In binnen- en buitenland bestaan verschillende methoden om de baten van het groen te kwantificeren in euro's. Deze methoden kunnen ook gebruikt worden om afwezigheid van groen te kunnen bepalen door de effecten van uitval door te rekenen.*
5. *Beschrijven methode bepalen van droogteschade aan groen: De laatste stap is het beschrijven van de methode voor het bepalen van schade aan groen door droogte. Dit is vooralsnog een globale methode en een voorstel voor het ontwikkelen van modellen. Het vullen van leemten in kennis draagt bij aan het verbeteren van de effecten van het voorspellen van schade door droogte.*

Eén van de conclusies van dit projectonderdeel is dat de grootste schade plaatsvindt aan groen met een lange levensduur. Het betreft hierbij vooral de bomen. Het accent in dit hoofdstuk ligt dan ook op bomen en in mindere mate op struiken, gras en kruiden.

7.1 Typen schades

Droogte kan op verschillende manier leiden tot schade aan het groen en verlies van baten die het groen kan leveren:

- De schade kan direct tijdens een periode met droogte optreden. Denk hierbij aan de sterfte van bomen en groen tijdens of direct na de opgetreden droogte.
- De schade kan ook na meerdere jaren nog invloed hebben, bijvoorbeeld doordat het groen door droogte is verzwakt is aantasting door ziekte, zwammen of insecten ontstaan.

Welk schade-effect droogte heeft op groen is beperkt bekend, minder bekend zijn de kosten die aan deze (in)directe schades gekoppeld zijn. Toch zijn juist deze kosten medebepalend bij de keuze voor nieuw groen. Het beperken van deze kosten vormt immers een belangrijk aspect voor het opstellen van richtlijnen voor de realisatie van klimaatbestendig groen.

Er zijn drie typen schade te onderscheiden die gebruikt kunnen worden in een methode om schades te ramen:

1) *Schade aan het huidige bestand*

Droogte heeft effect op het bestaande groen. Onduidelijk is welk effect dit precies is. Hierdoor is het lastig te bepalen wat de toekomstperspectieven zijn van bestaand groen. Een boom die nu geplant wordt heeft een verwachte levensduur van 30 tot 120 jaar. Gaat deze boom het redden met het oog op de klimaatverandering? Voortijdige uitval van bomen is een vorm van kapitaalvernietiging. Gaat de boom dood door droogte of hoort de sterfte bij normale uitval, zoals in de jaren dat geen sprake was van extra droogte?

2) *Ongemerkt verlies*

Daarnaast bestaat er een ongemerkt verlies. Groenbeheerders passen zich (ongemerkt) aan de jaarlijkse omstandigheden. Ze zien dat vaker droogte optreedt en passen de inrichting van het groen hierop aan. Diverse gemeenten planten nu al niet meer alle soorten aan, omdat ze ervan uitgaan dat die uitvallen door de veranderende omstandigheden. Ongemerkt zullen de komende jaren allerlei aanpassingen plaatsvinden: andere soorten, grotere plantafstanden, grotere plantgaten, extra ronde watergeven bij jonge aanplant en mogelijk de keuze om geen bomen te planten. De verwachting is dat investeringen in de hoeveelheid groen afnemen en meer aandacht en geld gaat naar de plant(groei)plaats.

3) *Verloren baten*

Verwacht wordt dat klimaatverandering zorgt voor frequentere en langere droge perioden, en als gevolg hiervan minder groen mogelijk is, of dat het groen in de stad minder functioneert. Hierbij gaat een deel van de te leveren ecosysteemdiensten, oftewel de baten van het groen, verloren. Groen vertegenwoordigt een aantal waarden of ecosysteemdiensten waar de mens voordeel bij heeft. Deze waarden betreffen onder andere:

- Biodiversiteit;
- CO₂ opslag (stam en tak- en wortelhout leggen CO₂ vast. Ook in de bodem onder het groen wordt CO₂ vastgelegd);
- Energieverbruik/hittestress (groen biedt beschutting);
- Waterhuishouding (voorkomen van wateroverlast);
- Gezondheid, psychologisch of mentale rust (groen is rustgevend);
- lucht-, water- en bodemzuiverend vermogen, koelvermogen (schaduw, verdamping);
- Waarde woningen (een groene omgeving leidt tot waardeinstijging van vastgoed);
- Sociale cohesie (mensen voelen zich in een groene wijk meer verbonden met elkaar);
- Esthetiek, cultuur (groen is belangrijk voor veel zachte waarden);
- Circulaire toepassing in een biobased economy: goed functionerend groen kan met hout, blad en maaisel een bron zijn voor de circulaire economie;
- Recreatieve waarde, groen nodigt uit tot ontspannen.



Figuur 7.1: Drie typen schade

Doorvertaling naar methode schaderaming

De typen schade zoals hierboven beschreven leiden tot een aantal conclusies of uitgangspunten voor het opstellen van een methode voor het inschatten schades en verlies van baten:

- Groen is nu en in de toekomst zelfvoorzienend. Groen kan in toekomstige klimaat met gebiedseigen grond floreren zonder extra watervoorziening of infiltratie.
- Schadebepaling is vooral relevant voor langcyclisch groen; bomen en bos. Sierheesters hebben een levensduur van circa tien tot twintig jaar. Hierdoor is het voor beheerders en gemeenten mogelijk om vrijwel direct beleid en sortimentslijsten aan te passen als geconstateerd wordt dat te veel uitval is bij bepaalde soorten. Juist bij langcyclisch groen is lastiger te realiseren omdat die vele decennia groeien.

7.2 Schades in recente droge jaren

7.2.1 Aanpak schade analyse

Om de droogteschade aan groen in de afgelopen jaren goed in beeld te brengen is in deze studie gekeken naar de volgende aspecten:

- Inboet (vervanging van groen/bomen die niet zijn aangeslagen of beschadigd zijn geraakt)
- Conditie en aantasting van het groen.

Inboet

Een belangrijke parameter om de effecten van de droogte te kunnen inschatten is de hoogte van de inboet. Inboet is nodig als een boom uitvalt en vervangen wordt door een nieuwe boom. Oorzaken zijn veelal onveiligheid vanwege een slechte conditie van de boom of schade door storm of andere factoren. De aanname is dat tijdens een droogteperiode de inboet stijgt.

Op basis van praktijkervaring is de jaarlijkse inboet bij bomen in een normaal meteorologisch jaar circa 1% van het totaal aantal bomen in een gemeente. Op basis van de praktijkervaring is bekend dat een inboet van 1% verantwoordelijk is voor 10 tot 15% van de onderhoudskosten aan bomen.

Tijdens dit onderzoek is navraag gedaan bij gemeenten over de hoogte van de inboet. Hieruit is onvoldoende informatie naar voren gekomen. Door het ontbreken van de hoogte van de inboet in de verschillende jaren kan geen overzicht worden gemaakt van de uitval over de verschillende jaren.

Conditie en aantastingen

Een andere parameter om de effecten van droogte op de bomen te kunnen inschatten is de conditie en de mate van aantasting van bomen. De aanname is dat door droogte de conditie vermindert en dat de bomen hierdoor bevattelijker worden voor aantastingen. Deze bomen hebben een lagere levensverwachting. Door de periode van 2018-2020 ten opzichte van voorgaande perioden op deze punten te vergelijken kan worden nagegaan of door droogte de verwachte levensduur afneemt en hiermee de inboet toe.

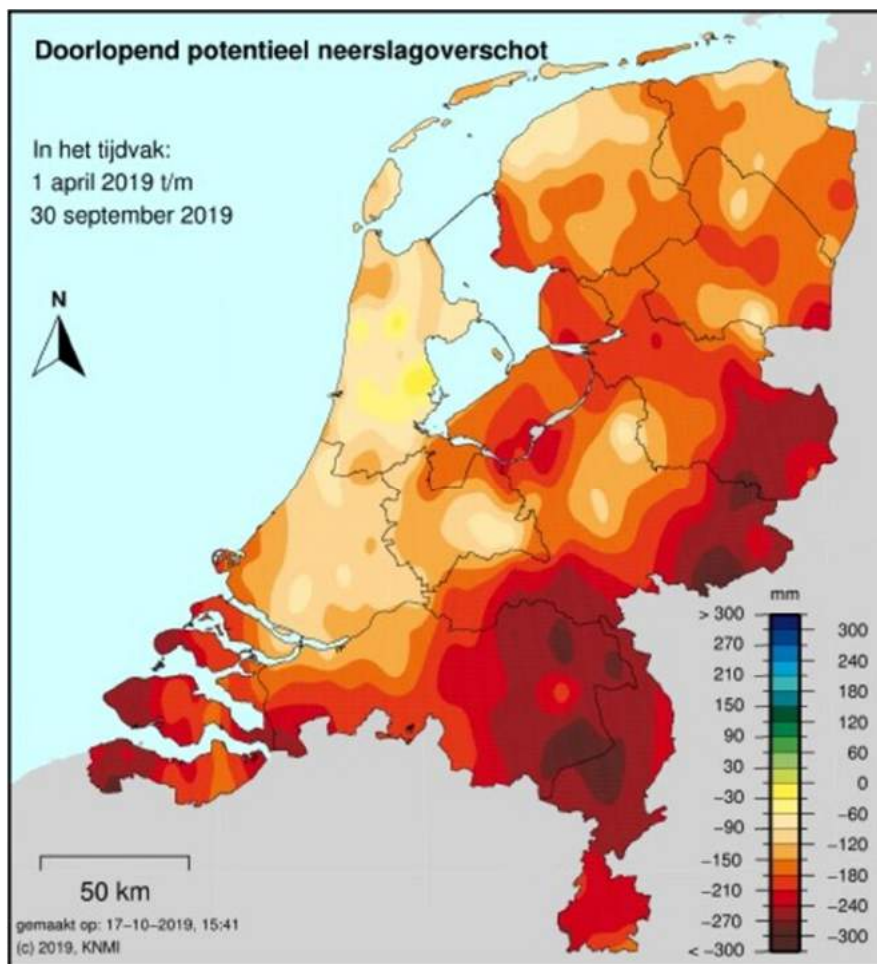
In het kader van boomveiligheid zijn gemeenten verplicht hun bomen periodiek te controleren. Jaarlijks wordt een vijfde tot een derde deel van de bomen gecontroleerd. Sommige gemeenten zijn hiermee begonnen vanaf ongeveer 2010. De informatie die verzameld wordt, is per gemeente verschillend. Enkele gemeenten verzamelen gegevens betreffende conditie en aanwezigheid van aantastingen.

Conditie wordt gemeten aan de hand van transparantie kroon, de lengte van groeischeuten. Een reactie van bomen tegen droogte is het verminderen van de hoeveelheid blad waardoor ook de groei achterblijft. Deze reactie is dus direct zichtbaar in de conditie.

Van de mogelijke aantastingen (ziekte, zwam, insect) is in dit onderzoek de zwam gekozen als aantasting die gevolgd kan worden om uitval op termijn te kunnen inschatten. Ziekten zijn veelal soort specifiek, daarnaast zijn in de afgelopen decennia verschillende ziektegolven in Nederland geweest zodat het beeld niet gelijkloopt met het effect van droogte. Denk bij ziekten aan onder andere de iepziekte, kastanjebloedingsziekte, essentaksterfte. Insectenaantastingen worden sporadisch geïnventariseerd en er is geen goed landelijk beeld van beschikbaar. Van enkele insectensoorten (plagen) is wel een landelijke monitoring beschikbaar.

Voor deze studie zijn enkele gemeente geselecteerd die over meerdere jaren de condities van de bomen hebben gemeten. In Figuur 7.2 zijn deze gemeenten weergegeven.

De verschillen tussen de meteorologische droogte in 2019 zijn weergegeven in Figuur 7.4. Uit deze figuur blijkt duidelijk dat de verschillen regionaal groot zijn. In Noord-Holland is beperkt sprake van een neerslagtekort (circa 30 à 90 mm), waarbij in Limburg op enkele plekken een neerslagtekort is van meer dan 270 mm.



Figuur 7.4: variatie in neerslagtekort 2019

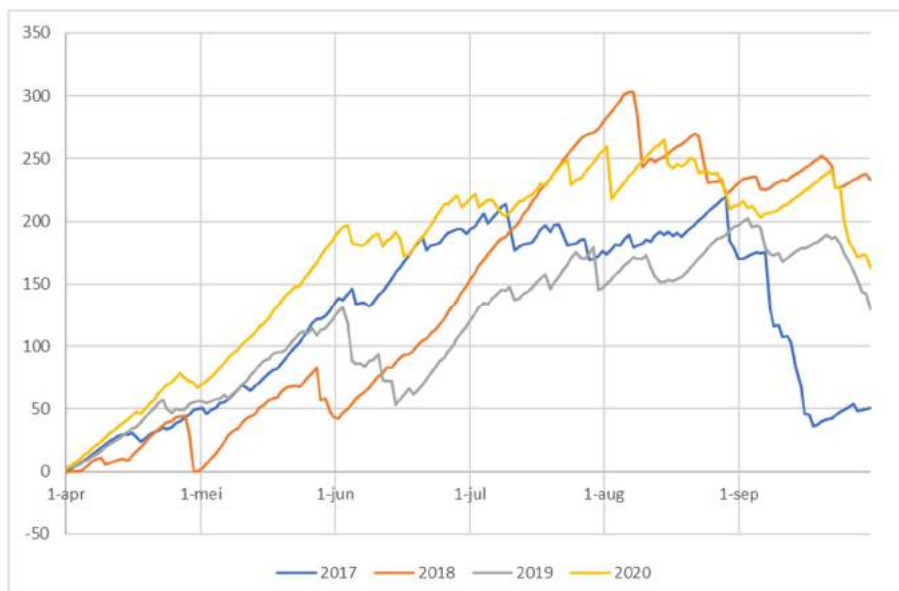
Ook bij eenzelfde meetpunt zijn op jaarbasis zijn grote verschillen zichtbaar. Als gekeken wordt naar de regio Rotterdam (Figuur 7.5) dan is een duidelijk verschil zichtbaar tussen de verschillende jaren. Uit de figuur blijkt dat het voorjaar van 2018 (tot 1 juni) niet het droogste voorjaar was. Het voorjaar van 2020 was duidelijk droger. Ook de periode in 2017 tot 1 juli was droger dan in 2018.

Het neerslagtekort in de zomer van 2020 en 2019 zijn goed vergelijkbaar. Belangrijk verschil hierbij is dat het neerslagtekort in juni 2020 met circa 25% is afgenomen en in 2019 dit geleidelijk toenam.

In Figuur 7.6 is het neerslagtekort weergegeven bij Hoek van Holland. Hoewel hemelsbreed op geringe afstand van Rotterdam is een duidelijk verschil tussen het neerslagtekort. De zomer van 2018 geven een vergelijkbaar beeld (beide circa 300 mm). Het voorjaar van 2017 is echter duidelijk droger dan bij Rotterdam.



Figuur 7.5: neerslagtekort meteostation Rotterdam



Figuur 7.6: neerslagtekort meteostation Hoek van Holland

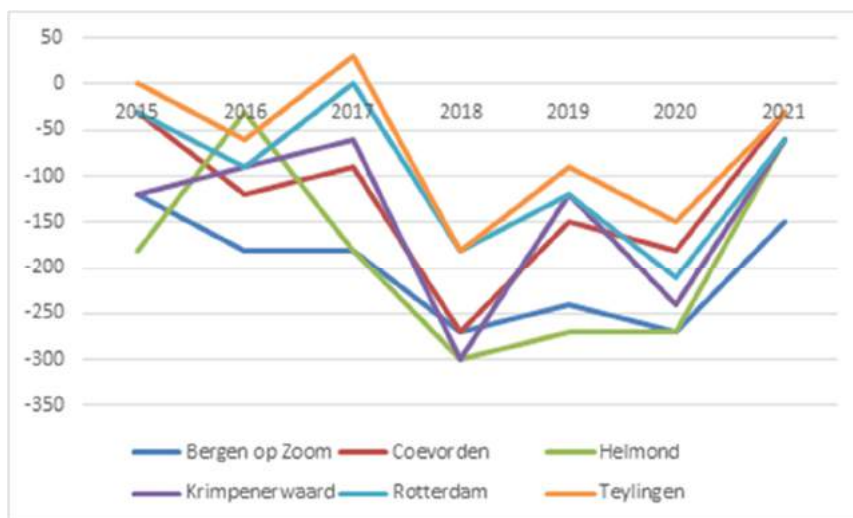
In Figuur 7.7 is het neerslagtekort van Eindhoven weergegeven. Bij dit meteostation valt op dat het tekort hoger is dan in het westen van het land (circa 50 mm hoger). En ook dat in de jaren 2019 en 2020 het neerslagtekort niet veel lager was.

Het droogtetekort in 2017 was in Eindhoven circa 100 mm groter dan in Rotterdam en Hoek van Holland. Deze figuren tonen aan dat grote verschillen aanwezig zijn in het neerslagtekort. Dit geldt zowel voor regionale verschillen als verschillen tussen de jaren.



Figuur 7.7: neerslagtekort meteostation Eindhoven

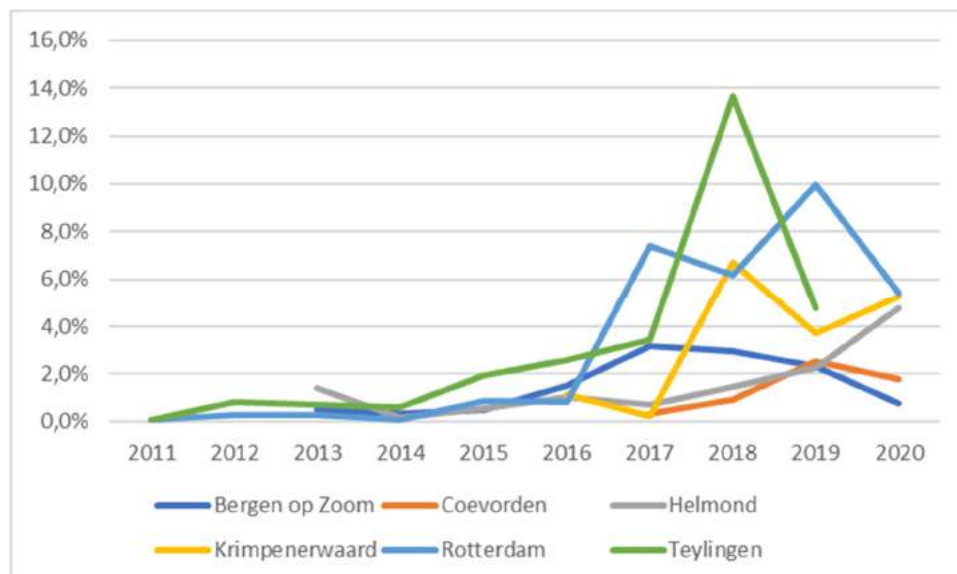
Niet zichtbaar in deze figuren, maar ook de hoeveelheid neerslag in de winterperioden is van belang voor de ervaren droogte in de zomerperiode. Bekend is dat de winter van 2018/2019 droger is dan gemiddeld. Dus na een zeer droog jaar, was ook de aanvulling van de grondwatervoorraden beperkt. Dus hoewel het neerslagtekort in 2019 lager was dan in 2018 is het goed mogelijk dat bomen meer last hadden van dit neerslagtekort doordat de grondwatervoorraden niet aangevuld waren.



Figuur 7.8: Neerslagtekort per gemeente

Conditie en aantastingen

In de onderzochte gemeenten is een duidelijke toename van bomen met een slechte of zeer slechte conditie zichtbaar.



Figuur 7.9: Percentage bomen met slechte en zeer slechte conditie van beoordeelde bomen

Vanaf 2017 is in Figuur 7.9 een toename van het percentage bomen met een slechte conditie te zien, maar is het meer specifieke beeld op verschillende plaatsen in Nederland divers:

Bergen op Zoom

Een groot neerslagtekort in zowel 2018 als 2019 en 2020. Het aantal bomen met een slechte of zeer slechte conditie neemt vanaf 2016 toe en is op 2020 weer op het niveau van voor 2016. Het percentage bomen met een (zeer) slechte conditie komt niet boven de 4% uit. Opvallend is dat het aantal bomen met een (zeer) slechte conditie in de droge jaren lager is dan in de jaren daarvoor.

Helmond

Vergelijkbaar met Bergen op Zoom; zowel in 2018, 2019 en 2020 een duidelijk neerslagtekort. Het aantal bomen met een (zeer) slechte conditie neemt hier door de jaren heen toe. In 2020 is dit meer dan 4%.

Krimpenerwaard

Het neerslagtekort is in 2018 vergelijkbaar met Helmond en Bergen op Zoom. In 2019 is een duidelijk lager tekort zichtbaar. 2020 hoort wel tot de drogere jaren. Deze trend is ook zichtbaar in het aantal bomen met een (zeer) slechte conditie. Ook dit is hoog in 2018 (6%), verbetert in 2019 waarna het in 2020 weer toeneemt.

Rotterdam

In Rotterdam is een duidelijke stijging te zien van het aantal slechte en zeer slechte bomen voor de droge jaren (in 2017). In 2018 is geen toename te zien ten opzichte van de jaren ervoor. In 2019 is deze toename wel zichtbaar, waarbij het aantal bomen met slechte conditie in 2020 vergelijkbaar is met 2018 (een afname ten opzichte van 2019). Het neerslagtekort in Rotterdam is in de jaren 2018-2020 lager dan bij de andere beoordeelde gemeenten.

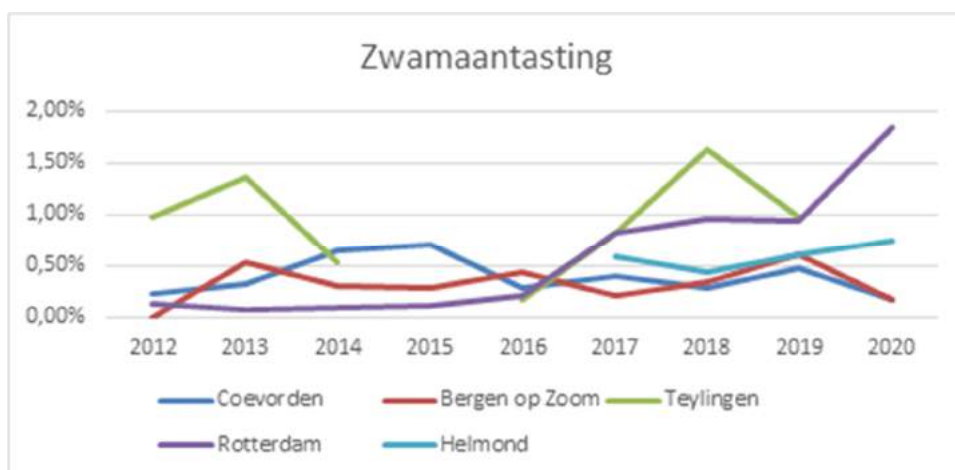
Teylingen

Het neerslagtekort in Teylingen is goed vergelijkbaar met het tekort in Rotterdam. Teylingen heeft het laagste neerslagtekort van de bekeken gemeenten. Toch is het aantal bomen met een (zeer) slechte conditie in 2018 het hoogst (14%), hoewel het in de jaren voor 2018 ook hoger was dan andere gemeenten. In 2019 is dit duidelijk beter. Onduidelijk is of dit komt door inboet of dat de bomen hersteld zijn na de zeer droge zomer.

Coevorden

Het neerslagtekort in Coevorden was in 2018 hoog, in 2019 en 2020 is het duidelijk lager. Toch neemt het aantal bomen met een (zeer) slechte conditie sinds 2018 toe. In 2020 lijkt een verbetering zichtbaar, toch is het aantal bomen met een (zeer) slechte conditie in 2020 hoger dan in 2018.

De zwamaantastingen laten bij de onderzochte gemeente een stijgende lijn zien vanaf 2017 (zie Figuur 7.10 en Figuur 7.11). Deze stijgende lijn lijkt overeen te komen met de vermindering van de conditie van de bomen. Context hierbij is dat in Rotterdam de door zwam aangetaste bomen meestal ouder dan veertig jaar zijn. De meest aangetaste boomsoorten betreffen kerspruim, treurwilg en witte esdoorn.



Figuur 7.10: Aangetroffen zwamaantasting procenten van de totale controles dat jaar



Figuur 7.11: Zwamaantastingen cumulatief

Uit de analyse blijkt dat over het algemeen gesteld kan worden dat het aandeel bomen met een (zeer) slechte conditie toeneemt tijdens droge jaren. De toename volgt echter niet een eenduidig beeld dat parallel loopt met het neerslagtekort. Wel lijken de gemeenten in het westen van Nederland meer last te hebben van droge zomers dan de gemeenten in het oosten. Mogelijk dat het effect in de oostelijke gemeenten nog niet zichtbaar is, juist bij deze gemeenten neemt het aantal bomen met een (zeer) slechte conditie sinds 2018 langzaam toe. Terwijl bij de gemeenten in het westen een snelle toename zichtbaar was van het aantal bomen met een (zeer) slechte conditie en tegelijkertijd een verbetering in de jaren erop. Mogelijke verklaringen voor de uitkomsten zijn:

- In laag Nederland heeft een dalende grondwaterstand een groter effect dan in hoog Nederland

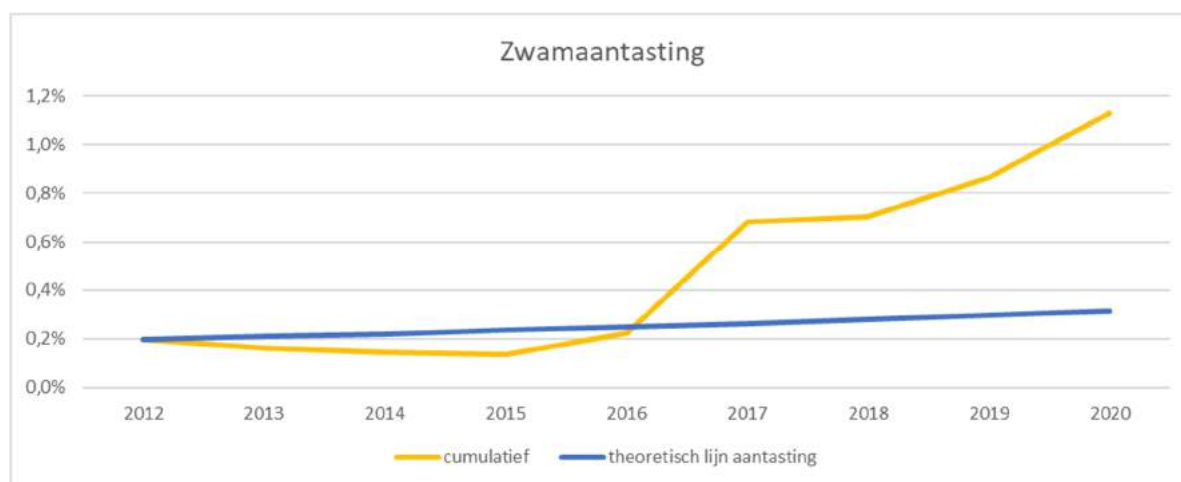
- Laag Nederland heeft minder doorwortelbare ruimte, de bomen groeien vaker in een (hoog)stedelijke omgeving met verstoorde bodem, en zijn daardoor gevoeliger voor variatie in klimaat
- Laag Nederland heeft plaatselijk last van zoute kwel. De relatieve invloed van deze zoute kwel neemt toe als er geen verzoeting door neerslag is
- Het neerslagtekort in het voorjaar (april t/m juni) kan een grotere invloed hebben op de conditie van de bomen dan het totale neerslagtekort over het hele groeiseizoen. 2017 en 2020 zijn jaren met een gemiddeld droog voorjaar
- Laag Nederland heeft een jonger bomenbestand en is daardoor kwetsbaarder.

Kanttekeningen methodiek

Bij het gebruik van gegevens uit boomveiligheidscontroles zijn nog wel kanttekeningen te plaatsen omdat de gegevens niet zijn verzameld om inzicht te krijgen in de effecten van droogte maar zijn verzameld om inzicht te krijgen in de maatregelen die moeten worden genomen om onveilige situaties te voorkomen. Kanttekeningen die te maken zijn:

- Elk jaar is een ander deel van de gemeente gecontroleerd, dit maakt de controles over de jaren moeilijker vergelijkbaar. Daar valt weer tegenin te brengen dat het steeds een mix van bomen in een soortgelijk gebied betreft.
- Attentiebomen worden juist weer wel elk jaar gecontroleerd (circa 10% van de bomen). Deze bomen bevatten relatief een groter deel gebreken waardoor de uit de controle voortkomende informatie een vertekend beeld geven.
- Alleen de set van 2021 is bekeken. Dit betekent uitgevallen bomen van voorgaande jaren niet zichtbaar zijn, achterstanden in onderhoud juist weer wel.

Om de kwantitatieve effecten van bovenstaande kanttekeningen te bepalen is een controle uitgevoerd. Van Rotterdam is een dataset uit 2017 vergeleken met die uit 2021. Hieruit blijkt dat jaarlijks 1% van de geïnspecteerde bomen verdwijnt, door uitval inboet en andere oorzaken. Van de aangetaste bomen verdwijnt in vijf jaar 35%, wat neerkomt op 6% per jaar. Het percentage aangetaste bomen wat aantasting heeft neemt af. Met deze gegevens is een theoretisch lijn te berekenen wat de aantasting zou zijn als die bijvoorbeeld gelijk zou zijn als in 2012 (zie Figuur 7.12). Uit deze figuur blijkt dat het aantal aantastingen fors is toegenomen los van effecten van uitgevallen bomen in de data.



Figuur 7.12: vergelijking theoretische en aangetroffen aantasting in Rotterdam

7.3 Aanbevelingen voor raming schades en verlies van baten

7.3.1 Gebruik scenario's om potentiële droogteschade te ramen

Voor het bepalen van de omvang van de droogteschade kan gerekend worden met scenario's. Door de scenario's met elkaar te vergelijken kan de schade worden bepaald. Een voorbeeld is hieronder beschreven waarbij door een hogere uitval de gemiddelde leeftijd van bomen afneemt. De hoogte van de uitval is nog niet te bepalen is op basis van de huidige gegevens en moet vooralsnog worden geschat.

Kwetsbaarheid bomenbestand

Een hulpmiddel om de grootte van de uitval te bepalen is na te gaan hoe kwetsbaar het huidige bomenbestand is voor droogte. Hoeveel droogtegevoelige bomen staan op plaatsen die gevoelig zijn voor klimaatverandering. Een boom langs een watergang die constant gevoed wordt is minder gevoelig van een weinig droogte tolerante boom in een gebied wat overgaat van grondwater gevoed naar regenwater afhankelijk.

Bepalen omvang effecten

Met een wiskundige berekening kan wel worden berekend wat de effecten zijn van mogelijke schades. Met behulp van deze berekening is door te rekenen wat uitval betekent voor verminderde biomassa aan bomen.

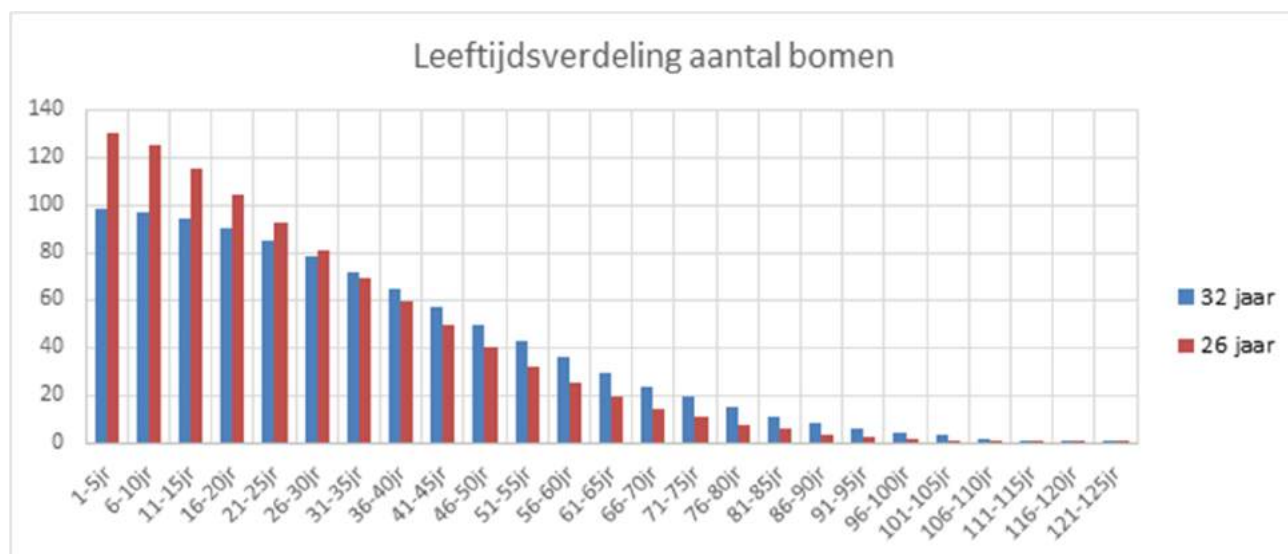
Bomen in de stad (in dit voorbeeld de oude stadsdelen van Rotterdam) hebben een gemiddelde leeftijd van ongeveer 32 jaar. Deze leeftijd wordt in stand gehouden bij een vervanging van 2% van het aantal bomen per jaar. In de praktijk wordt grofweg 1% van de bomen vervangen in het dagelijks beheer en onderhoud en 1% door stadsontwikkeling (boom valt uit vanwege einde economische levensduur).

Stel het scenario dat de droogteperiode 2018-2020 een na-ijleffect heeft waardoor de inboet tien jaar lang gemiddeld 2% is. Dan is na 5 jaar de stamomvang van bomen 8% minder dan wanneer het inboet percentage 1% was gebleven. Na honderd jaar wordt dit verschil groter. Dan is het de stamomvang circa 15% kleiner. Uiteindelijk dooft dit effect uit, hier gaat echter een lange periode overheen.

In Figuur 7.13 is de verdeling van 1000 bomen over verschillende leeftijdscategorieën zichtbaar. Hierbij geven de blauwe balken het aantal bomen weer bij een gemiddelde leeftijd van 36 jaar en de rode balken bij een gemiddelde leeftijd van 26 jaar. Hierbij is zichtbaar dat bij een gemiddelde leeftijd van 26 jaar meer bomen zijn in de leeftijdscategorieën 1-30 jaar. De leeftijd van een boom heeft een correlatie met de stamdiameter, -oppervlak en inhoud.

Op basis van deze berekening blijkt dat een bomenset met een gemiddelde leeftijd van 32 jaar circa 17% grotere stamdiameter en 36% meer stamoppervlak heeft dan een bomenset van 26 jaar. Het verschil in kubieke meters hout zal nog groter zijn.

Deze berekening laat zien dat als de gemiddelde leeftijd afneemt met 6 jaar de hoeveelheid hout in een boom ook afneemt. Dit heeft een directe relatie met de opgeslagen hoeveelheid CO₂. Ook zal de gemiddelde kroonprojectie (en daarmee de schaduw en hittebestrijding) kleiner zijn bij een lagere gemiddelde leeftijd.



Figuur 7.13: Theoretische leeftijdsverdeling en gemiddelde leeftijd

Bepalen maximale hoeveelheid bomen

Naast een leeftijdsverdeling van bomen kan het ongemerkt verlies worden bepaald. Denk hierbij aan beperkte ruimte voor bomen door beperkte beschikbaarheid van water. Bepalen wat het aantal standplaatsen op basis van verschuiving van standplaatsen met grondwater naar standplaatsen waar alleen regenwater beschikbaar is. Dit vergt grondwatermodellering jaar 2050 en bepaling verkleining potentiële bomenbestand. Dit laatste kan aan de hand van vuistregel zeg vijf bomen op een grondwaterprofiel is drie bomen op een hangwaterprofiel. Deze vuistregel moet nog ontwikkeld worden.

7.3.2 Benut bestaande instrumenten om verlies van baten te bepalen

Wat levert groen op. Er bestaan verschillende methoden om de baten om van groen om te zetten naar euro's. Om de effecten van droogte te kunnen berekenen moeten deze methoden de gevolgen van de droogte als parameter in zich hebben, en dan met name de effecten op bomen. Hieronder zijn beschreven de methoden TEEB.Stad, I-Tree Eco, I-Tree Hydro en Groene batenplanner.

Voor het berekenen van de effecten van droogte op de baten lijkt i-Tree eco het meest toegesneden tool. Hier wordt zowel omvang van de boom als de boomsoort betrokken in de batenberekening.

TEEB.stad

TEEB staat voor the Economics of Ecosystems and Biodiversity (TEEB) en is een internationale studie naar de economische betekenis van biodiversiteit en ecosysteemdiensten geïnitieerd door de Verenigde Naties. De hier beschreven versie van TEEB.stad is die van voor de actualisatie van 15 december 2021. TEEB.stad berekent de opbrengsten van groen en water voor zes punten:

1. gezondheid (minder zorgkosten, minder arbeidsverlies, betere luchtkwaliteit door afvang fijnstof)
2. energieverbruik (besparing door beschutting en besparing door isolatie)
3. waarde van woningen (stijging van vastgoedwaarde voor bestaande en nieuwe woningen)
4. recreatie en vrije tijd (meer recreatiemogelijkheden en meer winst ondernemers)
5. sociale cohesie (vermeden verhuiskosten)
6. waterhuishouding (waterberging).

Niet voor al deze punten zijn bomen in het geding. Bomen worden specifiek genoemd bij energieverbruik en gezondheid (afvangen fijnstof). Het gaat hier om nabijheid van bomen en aantal bomen, niet de grootte van de bomen. Bij waarde van woningen en recreatie wordt uitzicht en kwaliteit van groen genoemd. Indirect kan hiermee de waarde van bomen worden bepaald. TEEB.stad berekend de baten over dertigjaar, en maakt deze contant met een discontovoet van 3%. Prijspeil is 2016.

i-Tree Eco

i-Tree Eco is een in de Verenigde Staten ontwikkeld model dat inzicht geeft in de ecosysteemdiensten die bomen leveren. i-Tree Eco maakt die bijdrage van bomen concreet door er een waarde in euro's aan te verbinden. Voor de Nederlandse situatie is i-Tree Eco te gebruiken voor het berekenen van:

1. luchtzuiverende werking (opname fijnstof, ozon, koolstofmonoxide, zwaveloxide en stikstofoxide)
2. waterafvang (de hoeveelheid water wat het riool niet bereikt)
3. Koolstofdioxide opslag.

De financiële waarde van de afvang van luchtverontreiniging wordt berekend op basis van de prijzen uit het 'Handboek Milieuprijzen 2017' door CE Delft. Deze zijn gebaseerd zijn op de schadekosten: de kosten die moeten worden gemaakt om schade als gevolg van milieuvervuiling te compenseren. Daarbij worden ook de negatieve gezondheidseffecten van luchtvervuiling meegerekend.

De gegevens die nodig zijn voor het gebruik van i-Tree:

- Algemene meta gegevens: gemeente, grootte in van de gemeente in vierkante kilometer, aantal inwoners, weerstation wat ook vervuiling meet (meestal 2015).
- Verplichte velden: boomsoort, stamdiameter, hoogte waarop stamdiameter is gemeten (kan voor meerder stammen)
- Aanbevolen velden, boomhoogte, kroonhoogte, kroonbasis, kroonbreedte noord-zuid, kroonbreedte oost-west, percentage compleetheit kroon, lichtblootstelling kroon.

I-Tree Hydro

Het i-Tree Hydro model is geschikt om ontwerpscenario's te toetsten en geeft inzicht in de effecten van inrichtingskeuzes. i-Tree Hydro moet nog verder voor Nederland ontwikkeld worden, met Nederlandse brondata en kaarten.

Groene baten planner

De Groene baten planner is een beslissingsinstrument voor ruimtelijke inrichting. De tool berekent de effecten van ruimtelijke inrichting op het natuurlijk kapitaal. Dit helpt beleidsmakers met het maken van keuzes bij stedelijke ontwikkeling. Vragen als 'Welke ruimtelijke veranderingen hebben invloed op de ecosysteemdiensten die een locatie biedt?' en 'Waar zijn de maatschappelijke baten het grootst bij scenario's van ruimtelijke inrichting?' worden met de Groene baten planner beantwoord. De tool maakt hierbij gebruik van het Natuurlijk Kapitaal Model. Dit model gebruikt kaarten als basis voor modelberekeningen van verschillende typen baten/ecosysteemdiensten, zoals een landgebruikskaart, een bevolkingskaart en vegetatiekaarten.

7.3.3 Houdt rekening met extra beheerkosten

Een manier om het verschil in kosten te berekenen is de beheerkosten van twee scenario's met elkaar te vergelijken, waarbij rekening wordt gehouden met verhoogde kosten van inboet (meer en duurder) en een jonger bomenbestand. Een boom kost tussen de 15 en 20 euro per jaar in onderhoud, los van het onderhoud van de boomspiegel. De kosten van het onderhoud van een boom bestaan voor het grootste deel uit kosten voor snoeien en vervangen bij uitval. Overige kosten betreffen controle en onderhoud boompalen.

Het vervangen van bomen maakt een groot deel uit van de beheerkosten. Als het aantal te vervangen, of in te boeten bomen toeneemt dan stijgen de beheerkosten. Als bij het vervangen van bomen de kosten van watergeven en grondverbetering stijgen dan zullen ook de beheerkosten stijgen.

De toegenomen beheerkosten kunnen worden berekend door de toegenomen inboet- of vervangingskosten te berekenen bestaande uit een hoger inboetpercentage en hogere kosten voor watergeven en grondverbetering. Daarnaast moeten de effecten van een jonger en kleiner bomenbestand worden meegenomen.

7.4 Wat kon wel en wat kon niet worden geraamd?

Zoals uit voorgaande paragrafen is gebleken is het bepalen van de exacte droogteschade met de huidige gegevens niet mogelijk. Oorzaken zijn:

- Groenbeheerders passen continu hun beleid aan om basis van hun praktijkervaring. Hierdoor is het vooral bij kortlevend groen (sierheesters) niet mogelijk om betrouwbare inschattingen te doen over de kosten door droogte. Daarom is in deze studie vooral gekeken naar droogteschade aan bomen.
- De reactietijd van bomen op droogte is afhankelijk van verschillende componenten. Enerzijds reageren soorten anders op droogte, anderzijds heeft de omgeving invloed op hoe snel droogteschade zichtbaar is. Door deze indirecte schade (vermindering groei, aantasting door ziekte of zwammen, uitval na enkele jaren) is het met de beschikbare data niet mogelijk gebleken om enkel de schade die aan droogte is toe te schrijven, naar voren te brengen.
- De data die gemeenten momenteel bijhouden zijn niet voldoende om alle variabelen goed in beeld te hebben. Ook verschilt de bijgehouden data tussen gemeenten, hierdoor is het onderling vergelijken van gemeenten lastig.

Toch zijn op basis van het onderzoek enkele conclusie te trekken:

- De droogte heeft wel dergelijk invloed gehad op het groen. Hoeveel, is lastig te bepalen. Wel zijn duidelijk verschillen te zien tussen de onderzochte gemeenten in het westen en het oosten van het land. In het westen lijkt invloed van droogte sneller zichtbaar in de kwaliteit van de bomen dan in het oosten. Daarentegen lijkt in het oosten een geleidelijke trend zichtbaar. Het aantal bomen met een (zeer) slechte conditie neemt jaarlijks (beperkt) toe. Mogelijk dat hier sprake is van een na-ijleffect.
- Mogelijk speelt de manier waarop grondwater beschikbaar is hierin een rol. In het westen van Nederland is sprake van een hoge grondwaterstand. In droge jaren zakt deze grondwaterstand snel weg en heeft groen geen toegang meer tot grondwater. In het oosten is vaker sprake van lagere grondwaterstanden en is groen meer afhankelijk van het capillaire water. Mogelijk hebben deze bomen minder last van droge perioden zolang de capillaire zone vocht bevat. Daarnaast zijn ze beter ingesteld op perioden waarin het grondwater ver uitzakt.
- Ook lijkt een relatie zichtbaar tussen het aantal bomen met een zwamaantasting en een (zeer) slechte conditie. Dit verband is in eerder onderzoek vaker aangetoond, en ook hier lijkt het in de data zichtbaar.

De datareeksen die voor dit onderzoek beschikbaar worden zijn beperkt. Dit houdt in dat niet alle conclusies goed onderbouwd kunnen worden. Het is aan te raden om dit onderzoek over enkele jaren te herhalen met een grotere (en meer betrouwbare) dataset (zie ook Hoofdstuk 8).

8 Invullen kennis- en informatiehiaten

8.1 Verbetering ramingen, aanleg en beheer

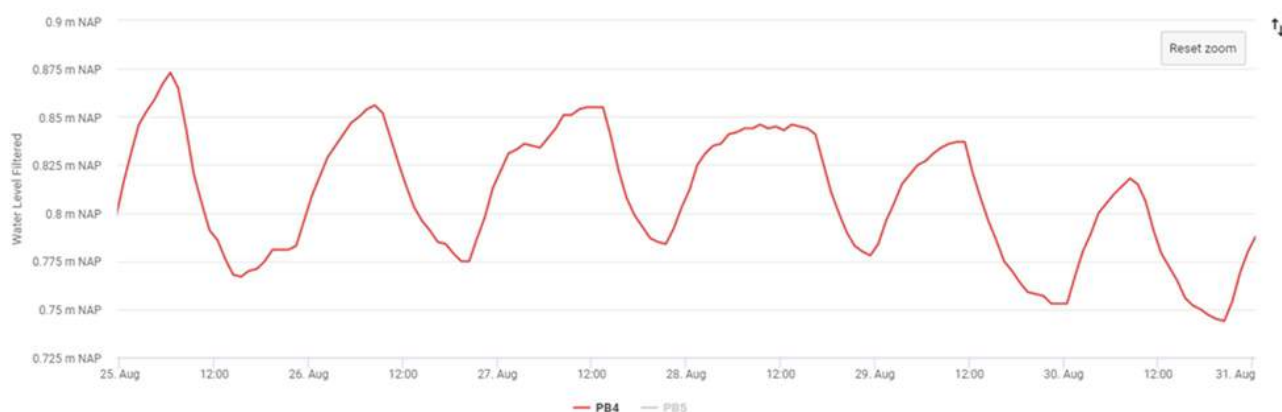
De variabelen die bepalend blijken voor het ramen van schades, verlies van baten en de realisatie van droogtebestendig nieuw groen, zijn tegelijkertijd de variabelen waarover nu en in de toekomst meer informatie moet worden verzameld om ramingen te verbeteren en te monitoren of aangepast beheer/aanleg de droogtebestendigheid daadwerkelijk vergroot. In dit onderdeel worden daartoe praktische aanbevelingen gedaan: wat moet hoe worden gemeten en geanalyseerd.

Ken het stedelijk bodemprofiel

Nergens is het bodemprofiel zo verstoort en daarom variabel als in de stad. Deze gebieden zijn niet voor niets op bodemkaarten grijs gelaten. Om meerdere redenen, niet alleen vanwege de vochtvoorziening van groen, is het van belang om de bodemopbouw van de bovenste 2 tot 3 meter met een zo hoog mogelijke nauwkeurigheid te karteren. Deze informatie is bruikbaar voor aanleg en onderhoud van alles dat op de bodem rust of daarin ligt. Het gaat dan over zowel de structuur, textuur, vochtgehalten en het bodemleven.

Metten en modelleren van grondwaterspiegel

Tezamen met het bodemprofiel varieert ook de grondwaterspiegel binnen een stad in hogere mate dan daarbuiten. Het is zeker geen bijjartlaken. Allerlei ondergrondse constructies, drainagevoorzieningen, aan-/afwezigheid van oppervlaktewater en variaties in verhardingsgraad zorgen op kleine afstand voor grote verschillen. Desalniettemin is het bij groenvoorzieningen zinnig om te weten hoe hier de lokale grondwaterstand varieert (GHG, GLG) en daarmee, hoe belangrijk dat grondwater is of kan zijn, voor de vochtvoorziening. Met deze informatie kan ook worden beoordeeld of het zinnig en mogelijk is om de grondwaterstand enigszins te optimaliseren, middels extra drainage of infiltratie-transport maatregelen. In laag Nederland, waar de grondwaterstand binnen het bereik van boomwortels ligt, is informatie over het grondwaterstandsverloop bruikbaar om het waterverbruik door groen te ramen, en daarmee het extra waterverbruik van extra groen. Figuur 8.1 illustreert dit. De figuur toont dat in de nacht de grondwaterstand oploopt (= door zijdelingse toestroming weer wordt aangevuld) en vanaf de ochtend, afhankelijk van de straling en temperatuur, zakt doordat de boom grondwater opneemt en verdampt. In dit geval uit het waterverbruik van de boom zich als een dagelijkse, plaatselijke grondwaterstandsval van circa 10 centimeter.



Figuur 8.1: daling en stijging grondwaterstand bij boom (bron: Sweco)

Veel steden beschikken over een grondwatermeetnet. Daaruit kan al veel informatie worden afgeleid die bruikbaar is voor monitoring van te droge of natte omstandigheden voor groen. Idealiter zou echter via een modellering een interpolatie tussen die meetpunten moeten worden uitgevoerd om een gebiedsdekkend beeld van de variatie in de grondwaterspiegel te verkrijgen. Dit is door de hierboven beschreven heterogeniteit in de bodem van stedelijk gebied, een complexe modelopgave, maar niet onmogelijk en niet alleen voor groenbeheer van waarde.

Monitoring van vochtgehaltes en weersvoorspellingen

Door op representatieve plaatsen het vochtgehalte in de bodem op verschillende dieptes te monitoren, kan worden gesignaleerd wanneer welke groen, hoeveel extra water nodig heeft. Met deze informatie kan op een rendabeler manier worden geïrrigeerd en wordt water bespaard. Door vochtmetingen in applicaties met weersverwachtingen te combineren kan zelfs een aantal dagen vooruit worden voorspeld waar irrigatie waarschijnlijk nodig wordt, en dit tijdig worden ingepland.

Monitor de asset management praktijk en specifieke uitgaven

In dit onderzoek is gebleken dat de data over droogteschades aan groen, denk aan vervanging, watervoorziening en ander onderhoud, gebrekkig is. Pas als dit beter wordt bijgehouden kan nauwkeuriger genoeg worden bepaald wat de financiële droogteschade is. Monitor daarom langjarig de wijze waarop groen wordt aangelegd, (oorzaken van) schades aan groen, aanleg- en onderhoudskosten.

De financiële uitdaging wordt met toenemende vergroening van de stad, en de rol van groen in klimaatadaptatie, complexer. Robuust en klimaatbestendiger groen wordt vooral gerealiseerd door het bieden van meer boven- en ondergrondse ruimte aan dat groen, en die ruimte vertegenwoordigt ook waarde.

Met deze informatie kunnen de handelingsperspectieven van een nauwkeuriger kwantitatieve onderbouwing worden voorzien en wordt de praktische samenwerking tussen groenbeheer, stedenbouwkunde en waterbeheer verder gefaciliteerd.

Dataverzameling voor schaderamingen

Uit dit onderzoek blijkt duidelijk dat vooral het gebrek aan (uniforme) langjarige gegevens het beantwoorden van de vraag 'welke schade veroorzaakt droogte aan groen' niet mogelijk maakt. Om deze vraag over enkele jaren, of na de volgende droogte, wel te kunnen beantwoorden pleiten we voor een uniforme opzet groendata. Een zo beperkt mogelijke minimale dataset om meer inzicht te krijgen in droogte en deze ook tussen gemeente onderling te kunnen vergelijken.

De volgende lijst is een eerste opzet met de minimaal wenselijke data. Hierbij ligt de focus op bomen. Zoals eerder aangegeven is het juist voor deze groep lastig om snelle wijzigingen door te voeren op basis van het wijzigende klimaat. Belangrijk is om informatie te hebben over de uitval van bomen en de reden van uitval zodat is te monitoren of het aantal uitgevallen bomen toe- of afneemt, welke dat zijn en wat de oorzaken zijn:

- Aantal ten opzichte van totaal aantal bomen
- Reden van inboet (kunnen meerdere zijn: veiligheid, zwamaantasting(soort zwam), insectenaantasting, ziekte, windworp, holte, plakksel, takbreuk, aanplantfout, problemen onderstam, schade wortelgestel, stamschade etc)
- Leeftijd boom
- Soort boom
- Standplaats (verharding, gras, beplanting, bosplantsoen)
- Informatie over de (geo)hydrologische condities: waaronder afstand tot watergang en informatie over (de variatie in) het grondwater.

Ontwikkelen tools

Uit het onderzoek komen een aantal ideeën voor het ontwikkelen van tools die kunnen helpen bij het bepalen van kosten en gemiste baten:

- Tool bepalen kwetsbaarheid bomenbestand bij klimaatverandering (boomsoorten in relatie tot verandering van beschikbaarheid van grondwater)
- Tool doorrekenen effecten hogere uitval op leeftijdsopbouw bomenbestand zodat resultaten zijn te gebruiken in i-Tree Eco en voor het berekenen van onderhoudskosten.

- Tool berekenen onderhoudskosten bomen (veel gemeenten hebben dit al in hun beheersysteem).

Samenwerking water- en bodembeheerders en groendeskundigen
Groen dat nu wordt gerealiseerd zal bestand moeten zijn tegen frequenter optreden van lange perioden met extreme droogte, maar tegelijkertijd ook tegen nattere omstandigheden. Bestendiger groen kan worden gerealiseerd door meer aandacht dan voorheen te besteden aan een optimale balans tussen soortkeuze, inrichting van de groeiplaats en de bodemvochthuishouding. De fouten die we moeten voorkomen worden gemaakt wanneer niet alle drie de expertises aan dezelfde tafel zitten en zij niet allemaal invloed hebben op de uitvoering van gebiedsontwikkelingen.



Figuur 8.2: niet te droog. En niet te nat? Wadi in aanleg (december 2021), waarin regenwater van t.b.v. klimaatadaptatie afgekoppelde weg wordt verzameld, met aangeplante eikenboom op diepste punt.

8.2 Geprogrammeerd en lopend onderzoek

Voor het invullen van voorname kennishiaten is langjarig onderzoek nodig waarin metingen kunnen worden verricht en geanalyseerd. Er zijn momenteel verschillende van deze onderzoeken gaande die nieuwe, bruikbare resultaten zullen opleveren.

Effectief groen voor klimaatadaptatie in de stad (looptijd 2019-2022)

Dit project richt zich op het formuleren van praktische richtlijnen en voorbeelden voor effectief klimaatgroen in de stad. Daarmee wordt het mogelijk specifieke baten te realiseren en een kwantitatieve onderbouwing te leveren van de te verwachten effecten.

Projecttoelichting: <https://edepot.wur.nl/509707>

Natuurlijk basissysteem voor klimaatadaptatieve maatregelen (looptijd 2020-2023)

Op dit moment zijn veel stedelijke adaptatieplannen gebaseerd op traditionele, relatief dure, technische maatregelen, zoals bijvoorbeeld riolen met een hogere capaciteit waar het gaat om wateroverlast. Maar ook t.b.v. het tegengaan van hittestress en CO2 reductie worden de mogelijkheden van het stedelijke natuurlijk basissysteem (geomorfologie, water, bodem, beplanting) onvoldoende benut. Daardoor worden voor de hand liggende maatregelen zoals opslag van regenwater in de bodem en vergroening van steden, wijken, straten, huizen en tuinen voor vermindering stedelijke hitte en CO2-opname vaak nog onvoldoende meegenomen in de lokale adaptatieplannen. Er is veel kennis, maar die is vaak nog niet optimaal operationeel en bovendien versnipperd.

WUR doet onderzoek naar het natuurlijk basissysteem van steden. Dit is een

typologie/classificatie van Nederland in tien gebieden op basis van gelijke kenmerken van het natuurlijk systeem (ondergrond, bodem en groen). Voor de verschillende regio's in Nederland worden de kenmerken van het natuurlijk basissysteem bepaald. De kennis wordt operationeel gemaakt voor stedelijke klimaatadaptatie. Daarnaast is er het software pakket i-Tree, gebruikt door verschillende groenadviesbureaus. Met i-Tree kan berekend worden hoeveel CO2; door een individuele boom wordt vastgelegd, nu en in de toekomst, hoeveel water wordt afgevangen en hoeveel fijnstof en NOx wordt vastgelegd. Het pakket is in eerste instantie voor de VS ontwikkeld, aan optimalisatie van het pakket voor de Nederlandse (en Europese) situatie wordt gewerkt.

Dit project verbindt kennis over het natuurlijk basissysteem met de mogelijkheid om daar geoptimaliseerd voor het betreffende systeem, de effecten te bepalen van bomen zoals die via i-Tree berekend worden. Daarmee ontstaat een basis voor de integrale aanpak voor stedelijke klimaatadaptatie. In samenwerking met belangrijke stakeholders wordt de aanpak operationeel gemaakt, op maat voor verschillende stakeholders: provincie, gemeente, projectontwikkelaar, groenadviseur, natuur beherende organisatie, bewoner. Zij zijn daardoor in staat vanuit hun belang of focus beter bij te dragen aan een urgente opdracht voor elke stad: klimaatadaptatie.

Ontwikkeling van Kritische Prestatie Indicatoren (KPI's) voor het toepassen van bomen in de stad (looptijd 2021-2024)

Hoewel iedereen weet dat het op een erg warme dag veel prettiger is in de schaduw van een boom, is daarmee nog niet direct bekend hoe groot die bijdrage van de boom werkelijk is. Veel harde cijfers over het functioneren van bomen ontbreken, zodat we bij de inrichting van de stad ook lastig kunnen inschatten wat de effecten daadwerkelijk zullen zijn. Veel is door de eeuwen heen kwalitatief en op basis van ervaring beschreven, en niet op basis van empirische (gemeten) waarden vastgesteld.

Het is van belang te weten wat je wilt meten en wat die meetwaarde feitelijk zegt over hetgeen je wilt bereiken bij onderhoud en realisatie van nieuw groen. Juist al in de fase van planvorming is het belangrijk om de functionaliteit en waarde van groen tijdens de volledige levensduur te bepalen en deze dan ook daadwerkelijk te meten. Daarvoor gaan we op zoek naar de juiste indicatoren die deze waarde het best kunnen uitdrukken. Deze indicatoren vormen de graadmeters voor de prestaties van de bomen. Deze zogenaamde Kritische Prestatie Indicatoren (KPIs) bestaan nog niet voor bomen en beplanting in de stedelijke omgeving. In dit onderzoek worden KPIs geselecteerd en in vier Nederlandse gemeenten getest. De resultaten daarvan bepalen of een indicator in de toekomst operationeel kan worden en gebruikt in een KPI dashboard. Uiteindelijk ontwikkelen we een systeem dat door alle partijen in het stedelijk groen ingezet kan worden en real time inzichtelijk is. Gemeenten en overige stakeholders in de openbare ruimte kunnen vanuit hun Sustainable Development Goals (SDGs) de doelstellingen van hun stedelijke (groen)visie concreet maken en vertalen in een plan van eisen. Ontwerpers, bestekmakers, groenaannemers en bestuurders krijgen een concreet handvat voor de uitvoering en monitoring van groeninrichting, -aanleg en -beheer. Het ontwikkelen van deze veel meer data-gedreven groenketen is het doel van dit onderzoek.

Duurzame water- en ecosystemen voor klimaatrobuust stedelijk groen (looptijd 2021-2024)

Vergroening van steden wordt steeds vaker toegepast als maatregel tegen hitte, mede vanwege andere positieve effecten op biodiversiteit, gezondheid, leefbaarheid en de financiële baten die het oplevert via bijvoorbeeld de belevingswaarde van een stadscentrum. Maar vergroening vergroot ook de verdamping en dus de waterbehoefte in stedelijk gebied, terwijl extreem hoge temperaturen vaak voorkomen in tegelijkertijd droge periodes. In de praktijk kan dit leiden tot verdampingsreductie tijdens droogte en dus minder effectieve verkoeling. De recente zomers van 2018 en 2019 hebben de urgentie van het gekoppelde probleem tussen de stedelijke waterhuishouding, droogte en hittemitigatie goed zichtbaar gemaakt. Over de link tussen hitte en waterbehoefte van groen (voor verkoeling en überhaupt om te overleven) zijn veel vragen. Dit project start met een inventarisatie van bestaand en kansrijk opgaand groen voor Nederlandse steden, aansluitend op bestaande informatie en bekeken vanuit een ecosysteembenadering. M.b.v. atmosfeermodellen leggen we de relatie tussen verdamping en verkoeling en voeden we het Landelijk Hydrologisch Model waarmee het effect van stedelijke verdamping op het grondwaterpeil geschat kan worden. In een maatschappelijke kosten-baten analyse zullen we verschillende opties voor vergroening evalueren en vergelijken. Door bestaande kennis over klimaatbestendige uitgangsmaterialen te combineren met kennis van natuurlijke (bos)ecosystemen met uitkomsten van het hydrologisch model ontwikkelen we voorbeelden van ruimtelijke ontwerpen voor klimaatbestendige opgaande ecosystemen voor verschillende regio's en toepassingen.

Studie Amsterdam naar groeiplaatsomstandigheden bij bomen

In het Westelijk Havengebied zijn 180 iepen geplant in 15 verschillende groeimedia, met name granulaten, van 8 verschillende leveranciers. De ontwikkeling van de 180 bomen wordt 5 jaar intensief gevolgd.

Studie TU Delft naar verdamping van stadsbomen

TU Delft (Wendy Batenburg) heeft een eerste proefopzet gemaakt om verdamping in stad goed te meten. Betreft een onderzoek naar verdamping van een 40-tal boomsoorten. Zijn hele jonge bomen, van 2 jaar.

Referenties

- Agentschap voor Natuur en Bos (2008). Vlaams Technisch Vademecum Bomen. D/2008/3241/048
- Benchmark Gemeentelijk Groen, Rapportage 2021. J.J. de Jong, S. van Baren, J.K. van Raffe, R.A. Schmidt, R.A.M. Schrijver & J.H. Spijker
- Feddes, R.A. 1987. Crop factors in relation to Makkink reference-crop evapotranspiration, in (ed) Hooghart, Evaporation and weather, Technical Meeting 44, Ede, 25 maart 1987, Proceedings and Information no. 39, TNO Committee on Hydrological Research, Den Haag: 33-45.
- Hartig, T., Mitchell, R., De Vries, S., & Frumkin, H. (2014). Nature and health. Annual review of public health, 35, 207-228.
- Heinen, M. G. Bakker, H. Wösten, 2020. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks; Update 2018. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 2978. 78 blz.; 6 fig.; 4 tab.; 22 ref.
- Hiemstra, J., Factsheet Groen in de stad Waterhuishouding. <https://edepot.wur.nl/460541>
- Hiemstra, Jelle 2018a. Soorten tabel groen in de stad. <https://edepot.wur.nl/460540>.
- Hiemstra, Jelle 2018b. Groen in de stad, klimaat en temperatuur. <https://edepot.wur.nl/460543>
- Hiemstra, 2019-2023, lopend project TU18044 Effectief groen voor klimaatadaptatie in de stad, Wageningen Universiteit).
- Jochner, S., & Menzel, A. (2015). Urban phenological studies—Past, present, future. Environmental Pollution, 203, 250-261.
- Klaarenbeek, R., van Dorst, M., van den Hurk, J., Kopinga, J., (2016) BWZ Ingenieurs, Klimaatverandering en effecten op het bomenbestand van de gemeente Amersfoort. <https://www.pwve.nl/wp-content/uploads/2020/10/131-15-BWZ-Rapport-Klimaatverandering-en-bomen-Amersfoort-definitief-14-10-2016-met-kaft-1.pdf>
- Kleerekoper, L. (2016). Urban Climate Design: Improving thermal comfort in Dutch neighbourhoods. A+BE Architecture and the Built Environment.
- Kluck, J., Een koele kijk op de inrichting van de buitenruimte. De hittebestendige stad (2020). <https://www.hva.nl/urban-technology/gedeelde-content/nieuws/nieuws/2020/05/een-koele-kijk-op-de-inrichting-van-de-buitenruimte.html>
- KNMI, De droogte van 2018. Een analyse op basis van het potentiële neerslagtekort (november 2018).
- KNMI oktober 2021: KNMI Klimaatsignaal'21: hoe het klimaat in Nederland snel verandert, KNMI, De Bilt, 72 pp.
- Kuipers, S.F. (1981). Bodemkunde.
- KWR, 2009.032 Ecohydrologische effecten van klimaatverandering op de vegetatie van Nederland. <https://edepot.wur.nl/62184>
- Machairas, I. 2020. Vulnerability of cities to soil moisture and groundwater droughts. MSc. Thesis, Delft University of Technology. October 28, 2020.

Mens, M., Hunink, J. C., Delsman, J. R., Pouwels, J., & Schasfoort, F. (2020). Geactualiseerde knelpuntenanalyse voor het Deltaprogramma Zoetwater fase II. Deltares rapport 11203734-003. Delft.

Mens, M., N. Kramer (Deltares), J. Beersma (KNMI), N. Kielen (RWS), 28 augustus 2019. Hoe extreem was de droogte van 2018. Vakblad H2O.

Santamour, F.. "TREES FOR URBAN PLANTING : DIVERSITY UNIFORMITY , AND COMMON SENSE." (1999).

Smith IA, Dearborn VK, Hutyra LR (2019) Live fast, die young: Accelerated growth, mortality, and turnover in street trees. PLoS ONE 14(5): e0215846.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215846>

Stad Antwerpen, Onderzoek naar droogte en waterschaarste in Antwerpen (2019)

Steenefeld, G. J., Koopmans, S., Heusinkveld, B. G., van Hove, L. W. A. & Holtslag, A. A. M. (2011). Quantifying urban heat island effects and human comfort for cities of variable size and urban morphology in the Netherlands, Journal of Geophysical Research. 116: 1-14.

Stuurman, R., M. Mens (2021). Droogte, een druppel te veel. Vakblad Bodem, nummer 4, augustus 2021.

Teuling, A. J., Seneviratne, S. I., Stockli, R., Reichstein, M., Moors, E., Ciais, P., . . . Wohlfahrt, G. (2010). Contrasting response of European forest and grassland energy exchange to heatwaves. Nat. Geosci., 3(10), 722-727.

Vries, S. de, 2016. Van Groen Naar Gezond: mechanismen achter de relatie groen–welbevinden; Stand van zaken en kennisagenda. Wageningen, Alterra Wageningen UR (University & Research centre), Alterra-rapport 2714.

Wiebke Klemm, Sanda Lenzholzer & Adri van den Brink (2017) Developing green infrastructure design guidelines for urban climate adaptation, Journal of Landscape Architecture, 12:3, 60-71, DOI: 10.1080/18626033.2017.1425320

Bijlage: Achtergrondinformatie waterbalansmodellering

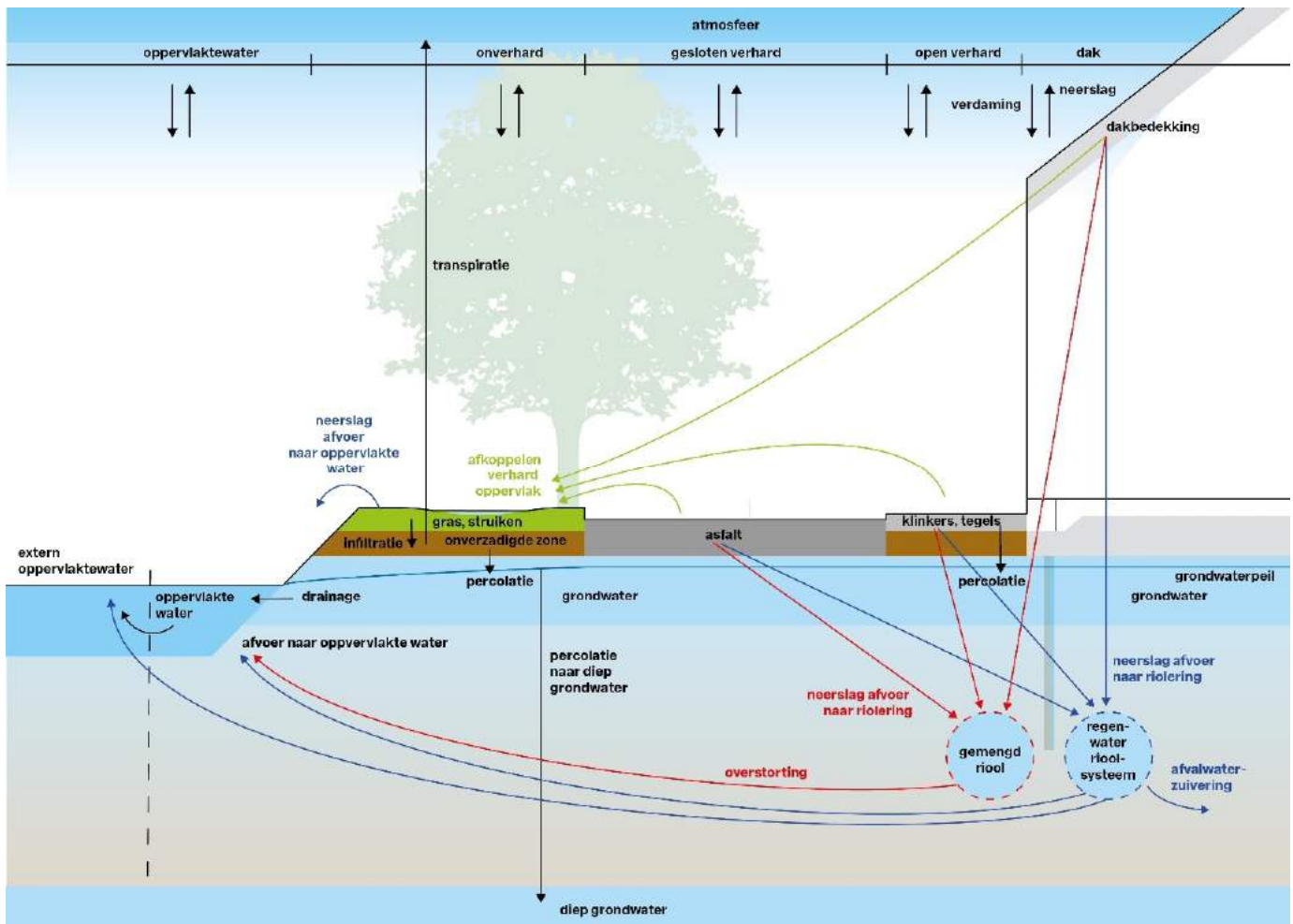
Deze bijlage is bestemd voor lezers die bekend zijn met hydrologische modellen en de waterbalansberekeningen met het UWBM of met een eigen model willen reproduceren en daarop voort willen bouwen.

Het balansmodel

Het stedelijk waterbalansmodel (UWBM) zelf wordt beschreven in:

- <https://publicwiki.deltares.nl/display/AST/Urban+Water+balance+model>
- Wenxing Zhang. Adaptive planning of stormwater management measures to mitigate pluvial flooding under climatic and socio-economic uncertainties. Technical report, TU Delft, 2019.
- <https://gitlab.com/deltares/urban/urbanwb> (open source modelcode)

Het UWBM is een multi-reservoir model waarin de belangrijkste componenten van de stedelijke waterbalans worden gesimuleerd als reservoirs en fluxen daartussen (Figuur 1). De belangrijkste landgebruik typen (gebouwen, verhard oppervlak, open-verhard oppervlak, onverhard (groen) en water) worden gepresenteerd door aparte reservoirs. Neerslag dat op deze oppervlakken valt zal deels verdampen als interceptie of infiltreert in het geval van onverhard oppervlak naar de onverzadigde zone. In het geval dat neerslag valt op open-verhard oppervlak infiltreert het naar het grondwater en bij gebouwen en verharde oppervlakken infiltreert het water naar het water afvoersysteem. Van daaruit wordt het water afgevoerd naar de afvalwater zuivering of naar het oppervlakte water. Het water dat infiltreert in de onverzadigde zone zal direct verdampen, door plantenwortels worden opgenomen en transpireren via de vegetatie of wanneer de bodem nat wordt percoleren naar het grondwater.



Figuur 1: Stedelijk waterbalansmodel met daarin de reservoirs en fluxen daartussen.

Het water dat in het grondwater terechtkomt kan vervolgens in droge perioden alsnog via capillaire nalevering naar de onverzadigde zone stromen, draineren naar het oppervlaktewater, of percoleren naar het diepere grondwater. Wanneer het oppervlaktewaterpeil boven streefpeil komt wordt het afgevoerd naar het regionale oppervlaktewater en verdwijnt daarmee uit het systeem.

De parameters die voor de waterbalansberekeningen zijn gebruikt zijn deels afhankelijk van het berekende scenario:

- Landgebruik – Wijktype en hoog/Laag NL
- Ondergrond en watersysteem– hoog/Laag NL
- Vegetatie – Type vegetatie

Landgebruik – Wijktype en hoog/Laag NL

In de stad komen meerdere typen landgebruik voor die een verschillend effect hebben op de waterbalans van de stad. In het waterbalansmodel wordt daarom onderscheid gemaakt naar verschillende type landgebruik: daken, gesloten verharding (niet doorlatend), open verharding (klinker/tegelsverharding), onverhard en open water. De verhouding tussen deze klassen van landgebruik verschilt van wijk tot wijk. Tabel 0.1 geeft de percentages voor de verschillende type landgebruik weer voor de bloemkoolwijk, oudere woonwijk en Vinexwijk voor zowel hoog als laag Nederland.

Tabel 0.1: Verhoudingen type landgebruik zoals gebruikt voor de waterbalansberekeningen

Hoog Nederland		Laag Nederland	
<i>Bloemkoolwijk</i>		<i>Bloemkoolwijk</i>	
Percentage openbare ruimte	55.3%	Percentage openbare ruimte	57.1%
Percentage groen in openbare ruimte (laag groen + bomen in groen)	26.2%	Percentage groen in openbare ruimte (laag groen + bomen in groen)	21.0%
Percentage verharding in openbare ruimte (verharding + bomen in verharding)	21.1%	Percentage verharding in openbare ruimte (verharding + bomen in verharding)	21.3%
Percentage water	6.7%	Percentage water	13.5%
Percentage privaat terrein	44.5%	Percentage privaat terrein	42.4%
Percentage gebouw op privaat terrein	10.9%	Percentage gebouw op privaat terrein	13.6%
Percentage verharding op privaat terrein	16.5%	Percentage verharding op privaat terrein	15.7%
Percentage groen/onverhard op privaat terrein (laag groen + bomen)	15.8%	Percentage groen/onverhard op privaat terrein (laag groen + bomen)	11.9%
<i>Oudere woonwijk</i>		<i>Oudere woonwijk</i>	
Percentage openbare ruimte	56.4%	Percentage openbare ruimte	57.3%
Percentage groen in openbare ruimte (laag groen + bomen in groen)	25.8%	Percentage groen in openbare ruimte (laag groen + bomen in groen)	19.1%
Percentage verharding in openbare ruimte (verharding + bomen in verharding)	23.7%	Percentage verharding in openbare ruimte (verharding + bomen in verharding)	23.2%
Percentage water	5.6%	Percentage water	13.7%
Percentage privaat terrein	43.4%	Percentage privaat terrein	42.6%
Percentage gebouw op privaat terrein	12.4%	Percentage gebouw op privaat terrein	13.9%
Percentage verharding op privaat terrein	16.2%	Percentage verharding op privaat terrein	14.8%
Percentage groen/onverhard op privaat terrein (laag groen + bomen)	13.4%	Percentage groen/onverhard op privaat terrein (laag groen + bomen)	12.6%
<i>Vinex</i>		<i>Vinex</i>	
Percentage openbare ruimte	60.1%	Percentage openbare ruimte	64.7%
Percentage groen in openbare ruimte (laag groen + bomen in groen)	31.9%	Percentage groen in openbare ruimte (laag groen + bomen in groen)	23.2%
Percentage verharding in openbare ruimte (verharding + bomen in verharding)	17.4%	Percentage verharding in openbare ruimte (verharding + bomen in verharding)	20.5%
Percentage water	9.1%	Percentage water	19.4%
Percentage privaat terrein	39.7%	Percentage privaat terrein	35.1%
Percentage gebouw op privaat terrein	6.6%	Percentage gebouw op privaat terrein	9.9%
Percentage verharding op privaat terrein	13.9%	Percentage verharding op privaat terrein	14.2%
Percentage groen/onverhard op privaat terrein (laag groen + bomen)	17.3%	Percentage groen/onverhard op privaat terrein (laag groen + bomen)	9.4%

Hierbij is de volgende aggregatie is uitgevoerd:

Daken: Percentage gebouw op privaat terrein (op openbaar terrein staan (nagenoeg) geen gebouwen).

Gesloten verharding (niet doorlatend): 0.5 x (totale verharding in openbare ruimte + verharding op privaat terrein), exclusief bomen in verharding.

Open verharding (klinkers/tegels): 0.5 x (totale verharding in openbare ruimte + verharding op privaat terrein), exclusief bomen in verharding.

Onverhard: Percentage groen in openbare ruimte + Percentage groen/onverhard op privaat terrein.

Open Water: Percentage water

Dit resulteert in de percentages landgebruiksoppervlak zoals weergegeven in Tabel 0.2.

Tabel 0.2: Verhouding verhard oppervlak voor bloemkoolwijk, oudere wijk en vinexwijk zoals gebruikt voor de waterbalans berekeningen

Oppervlak	hoog NL:			laag NL:		
	Bloemkool-wijk	Oudere woonwijk	Vinex	Bloemkool-wijk	Oudere woonwijk	Vinex
Daken	11.20%	12.90%	6.90%	14.10%	14.30%	10.40%
Gesloten verharding (niet doorlatend)	19.30%	20.50%	16.25%	19.05%	19.55%	18.00%
Open verharding (klinkers/tegels)	19.30%	20.50%	16.25%	19.05%	19.55%	18.00%
Onverhard	43.30%	40.40%	51.20%	33.90%	32.50%	33.70%
Open water	6.90%	5.70%	9.40%	13.90%	14.10%	19.90%

Er is uitgegaan van 10 ha projectgebied (100.000 m²) waarbij de percentages omgezet zijn naar oppervlakten 0.1% = 100 m².

Ondergrond en watersysteem – hoog/laag Nederland

De ondergrond en het watersysteem worden onder meer bepaald door de volgende parameters:

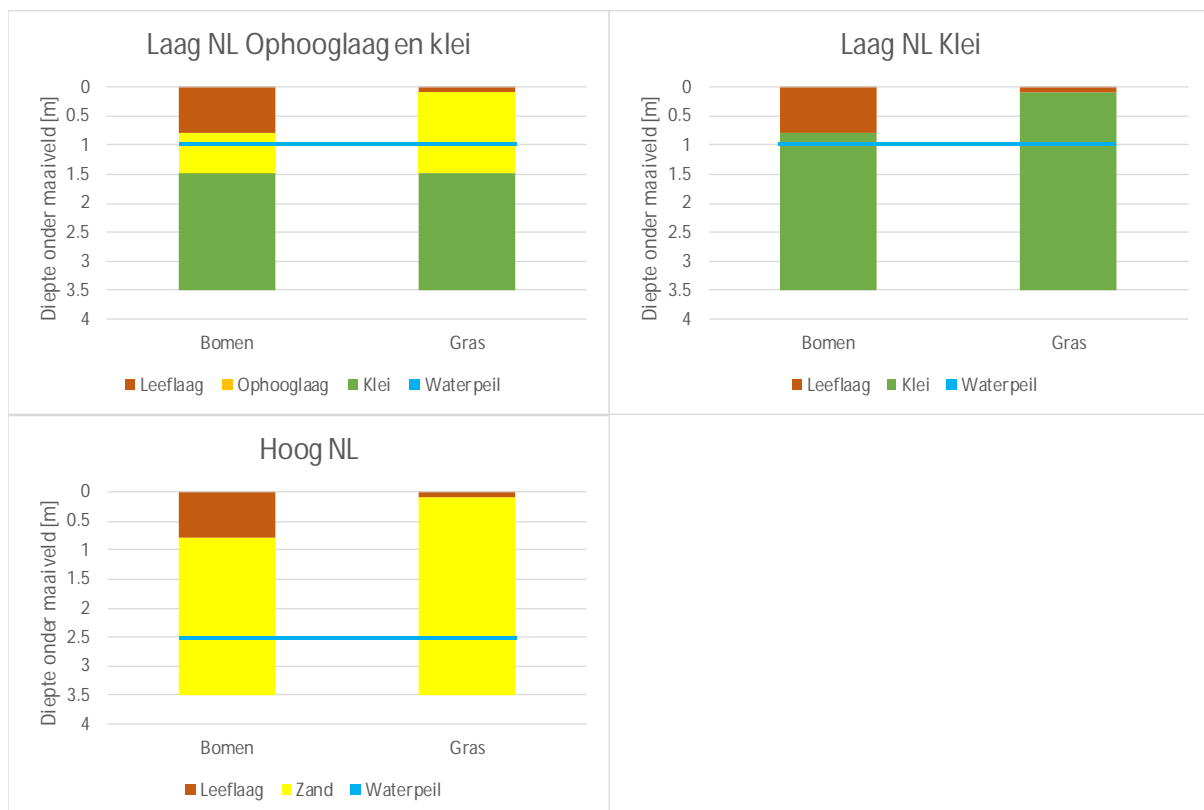
- Opbouw van de ondergrond, dikte van de lagen en type materiaal
- Grondwater- en oppervlaktewaterpeil

Voor de karakterisering van de ondergrond in stedelijk gebied is onderscheid gemaakt tussen de typische situatie in hoog Nederland (hoog NL) en laag Nederland (laag NL).

- hoog NL situatie met een zandige ondergrond met daarop aangebracht een leeflaag voor vegetatie
- laag NL de volgende twee situaties:
 - Zware klei in ondergrond met direct bovenop de klei aangebracht een leeflaag voor vegetatie, zonder verdere ophoging
 - Zware klei in ondergrond met daarop aangebracht een zandige ophooglaag beginnend op 1.5 meter onder maaiveld en daar boven op een leeflaag.

Opbouw van de ondergrond

De hydrologische karakterisering van de ondergrond is gebaseerd op Heinen et al. 2020. We gebruiken voor laag NL bodemtype 17 (Zware klei) en voor hoog NL bodemtype 8 – (Podzol, leemarm, fijn zand). De ophooglaag in laag NL bestaat uit bodemtype 14 (Podzol, grof zand). Onderstaand een overzicht, waarin Waterpeil de hoogte van het oppervlaktewater aangeeft.



Figuur 2: Opbouw van de ondergrond voor de drie verschillende ondergrond situaties

Grond en oppervlaktewater

Het grond- en oppervlaktewater wordt berekend ten opzicht van maaiveld. Voor de grond en oppervlaktewater situatie is gekozen voor een onderscheid naar de situatie in hoog NL en de situatie in laag NL.

Voor de vinexwijk is op basis van het grotere wateroppervlak een lagere drainage weerstand voor het grondwater gebruikt van voor de bloemkoolwijk en oudere woonwijk.

Tabel 0.3: Hydrologische parameters voor het watersysteem voor hoog en laag Nederland. Let op de afwijkende drainage weerstand voor vinexwijken in laag NL.

Parameter	hoog NL	laag NL
Drooglegging (oppervlaktewater 'streefpeil' ten opzichte van maaiveld)	2.5 m	1.0 m
Weerstand grondwater-oppervlaktewater	5000 dagen	Vinexwijk: 100 dagen Overig wijken: 200 dagen
Kwel/wegzijging grondwater (op basis van diepe stijghoogte en weerstand)	0.8 mm/dag wegzijging bij een grondwaterstand op oppervlaktewater streefpeil	0.25 mm/dag kwel bij een grondwaterstand op oppervlaktewater streefpeil
Infiltratiecapaciteit	20 mm/uur	5 mm/uur

Vegetatie

De relevante parameters voor de vegetatie in het waterbalansmodel zijn:

- Worteldiepte en dikte leeflaag
- Referentieverdamping
- Verdampingsreductie door vochttekort.

Vegetatie worteldiepte en dikte leeflaag

De wortelzone die wordt gehanteerd is afhankelijk van het type vegetatie en wordt in praktijk sterk bepaald door de dikte van de aangebrachte leeflaag. Deze zijn voor dit onderzoek aan elkaar gelijk gesteld. Op basis van praktijkervaring is de dikte van de leeflaag en daarmee wortelzone als volgt ingeschat:

- 10 cm voor gras
- 80 cm voor bomen

Verdamping

Voor de simulatie van de verdamping wordt gebruik gemaakt van de verdampingsformule van Makkink. Deze formule geeft de verdamping voor gras dat voldoende vochtig is (potentiele verdamping). Andere typen vegetatie worden middels een verdampingsfactor gerelateerd aan de verdamping van gras.

Voor bomen in een park wordt deze gelijk gesteld aan de verdamping van gras. Solitaire bomen en bomen in een rij hebben een hogere verdamping die onder zonnige omstandigheden twee keer zo hoog kan zijn als die van gras.

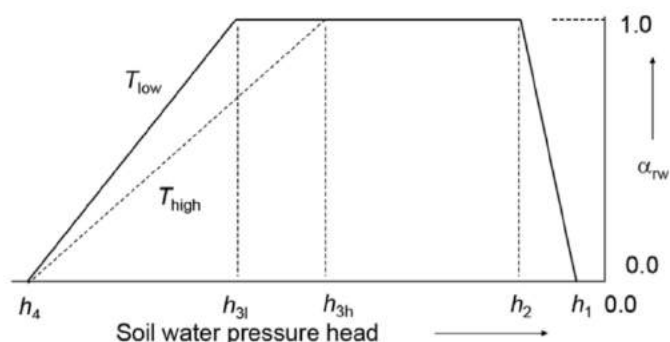
Hier is gebruik gemaakt van de volgende gewasfactoren voor het relateren van de verdamping van vegetatie aan referentiegewasverdamping volgens Makkink:

- Gewasfactor voor bomen in park = 1.0
- Gewasfactor voor bomen in straat (laanbomen en solitaire bomen) = 1.5
- Voor bomen in de woonwijk gaan we uit van een gemiddelde gewasfactor van 1.3

Verdampingsreductie door vochttekort

De verdamping van vegetatie neemt af wanneer de bodem droger wordt. De verdampingsreductie door vochttekort is gesimuleerd aan de hand van de Feddes reductiefunctie (Feddes et al., 1978), Figuur 2. Deze schaal de verdamping tussen 0 en 1 afhankelijk van het bodemvochtgehalte. Hierbij neemt de verdamping lineair af wanneer een

vegetatieafhankelijk bodemvochtgehalte (h_3) wordt onderschreden tot 0 bij het verwelkingspunt (h_4). Ditzelfde gebeurt bij natte tot verzadigde bodem.



Figuur 2 Feddes reductie functie voor wateropname door wortels van vegetatie afhankelijk van de drukhoogte (soil water pressure head) in de bodem (Feddes et al., 1978)

Hoewel de Feddes parameters soortafhankelijk zijn, zijn deze voor dit onderzoek niet soort afhankelijk gemaakt. Er is voor dit onderzoek onvoldoende informatie gevonden om hier voor vegetatie in de stad onderbouwd onderscheid in te kunnen maken.

Voor de Feddes parameters zijn de volgende basistabellen gebruikt, onafhankelijk van het gewas:

soil type	crop type	TH_rz [m]	TH_rz [mm]	θ_{h1} [%]	θ_{h1} [mm]	θ_{h2} [mm]	θ_{h3h} [mm]	θ_{h3l} [mm]	θ_{h4} [mm]	θ_{h4} [%]
8 all		0.1	100	34.4%	34.4	33.8	11.4	8.4	3.5	3.5%
8 all		0.2	200	34.4%	68.8	65.9	22.9	16.8	6.9	3.5%
8 all		0.3	300	34.4%	103.2	96.1	34.3	25.3	10.4	3.5%
8 all		0.4	400	33.9%	135.6	122.4	45.7	33.7	13.8	3.5%
8 all		0.5	500	33.2%	166.0	145.6	57.1	42.1	17.3	3.5%
8 all		0.6	600	32.7%	196.4	167.6	68.6	50.5	20.7	3.5%
8 all		0.7	700	32.4%	226.8	187.9	80.0	58.9	24.2	3.5%
8 all		0.8	800	32.2%	257.2	206.3	91.4	67.4	27.6	3.5%
8 all		0.9	900	32.0%	287.6	222.8	102.9	75.8	31.1	3.5%
8 all		1	1000	31.8%	318.0	237.8	114.3	84.2	34.5	3.5%
17 all		0.1	100	44.0%	44.0	43.3	34.5	32.6	26.9	26.9%
17 all		0.2	200	44.0%	88.0	85.4	68.9	65.3	53.8	26.9%
17 all		0.3	300	44.3%	132.8	127.6	103.4	97.9	80.7	26.9%
17 all		0.4	400	44.6%	178.4	170.5	137.8	130.5	107.6	26.9%
17 all		0.5	500	44.8%	224.0	213.2	172.3	163.2	134.5	26.9%
17 all		0.6	600	44.9%	269.6	255.8	206.7	195.8	161.4	26.9%
17 all		0.7	700	45.0%	315.2	298.0	241.2	228.4	188.3	26.9%
17 all		0.8	800	45.1%	360.8	340.0	275.6	261.1	215.2	26.9%
17 all		0.9	900	45.2%	406.4	381.7	310.1	293.7	242.1	26.9%
17 all		1	1000	45.2%	452.0	423.1	344.5	326.3	269.0	26.9%

soil type	θ_{h3h} [av %]	θ_{h3l} [av %]	θ_{h4} [av %]
1	45.8%	41.4%	28.8%
2	39.4%	33.0%	17.2%
3	42.2%	39.3%	30.3%
4	42.2%	39.3%	30.3%
5	15.9%	11.5%	4.6%
6	44.9%	40.7%	28.3%
7	4.8%	3.1%	2.3%
8	11.4%	8.4%	3.5%
9	11.0%	8.0%	3.2%
10	11.0%	8.0%	3.2%
11	17.5%	13.6%	5.9%
12	10.5%	7.6%	3.1%
13	7.4%	5.2%	3.1%
14	10.8%	8.0%	3.2%
15	22.0%	17.6%	8.0%
16	24.6%	20.9%	11.5%
17	34.5%	32.6%	26.9%
18	34.5%	32.6%	26.9%
19	25.0%	21.2%	11.4%
20	25.0%	21.2%	11.4%
21	21.7%	18.4%	9.7%

En voor het ophoogzand:

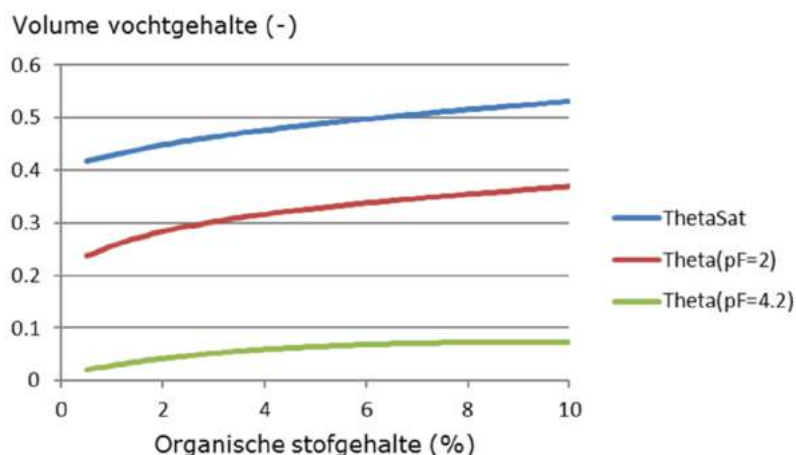
soil type	crop type	TH_rz [m]	TH_rz [mm]	θ_{h1} [%]	θ_{h1} [mm]	θ_{h2} [mm]	θ_{h3h} [mm]	θ_{h3l} [mm]	θ_{h4} [mm]	θ_{h4} [%]
14 all		0.1	100	34.4%	34.4	33.8	10.8	8.0	3.2	3.2%
14 all		0.2	200	32.4%	64.8	61.8	21.6	15.9	6.5	3.2%
14 all		0.3	300	30.4%	91.2	83.1	32.5	23.9	9.7	3.2%
14 all		0.4	400	29.4%	117.6	100.4	43.3	31.9	13.0	3.2%
14 all		0.5	500	28.8%	144.0	113.4	54.1	39.8	16.2	3.2%
14 all		0.6	600	28.4%	170.4	123.1	64.9	47.8	19.4	3.2%
14 all		0.7	700	28.1%	196.8	130.3	75.8	55.8	22.7	3.2%
14 all		0.8	800	27.9%	223.2	136.6	86.6	63.7	25.9	3.2%
14 all		0.9	900	27.7%	249.6	142.4	97.4	71.7	29.1	3.2%
14 all		1	1000	27.6%	276.0	147.9	108.2	79.7	32.4	3.2%

Voor de bepaling van de vochtgehalten bij h_{3h} , h_{3l} en h_4 voor de diverse diktes van de wortelzone zijn de gemiddelde vochtgehalten van de 16 beschikbare combinaties gewas en wortelzone per bodemtype gebruikt (rechterdeel bovenstaande tabel) en vermenigvuldigd met de dikte van de wortelzone.

Als er in laag NL een ophooglaag (zandig materiaal) op de originele grond (klei) wordt aangebracht, worden:

- Evenwichtsvochtgehalte in de wortelzone:
 - Bij elke GWS: evenwichtsvochtgehalte van verbeterde grond
- Maximum capillaire opstijging:
 - GWS in bovenste 1.5 m: capillaire opstijging van verbeterde grond
 - GWS onder bovenste 1.5 m: capillaire opstijging gemiddelde van verbeterde en originele grond
- Bergingscoëfficiënt:
 - GWS in bovenste 1.5 m: bergingscoëfficiënt van verbeterde grond
 - GWS onder bovenste 1.5 m: bergingscoëfficiënt van originele grond.

Voor dit onderzoek is verder uitgegaan van een aangebrachte leeflaag ter dikte van de wortelzone. Daarbij is ervan uitgegaan dat de leeflaag bestaat uit humusrijk zand. Daardoor neemt het vochtgehalte in de wortelzone toe. Uit onderstaande figuur blijkt dat het vochtgehalte in de leeflaag bij veldcapaciteit (grondwaterstand 1m onder onderkant wortelzone) 37% bedraagt bij 10% organische stof (humus rijk zand) en 23% bij 1% organische stof (humusarm zand). Op basis daarvan verhogen we de evenwichtsvochtgehaltenes van de bodem met leeflaag met 14%. Dat komt neer op 14 mm per 10 cm.



Figuur 3: Verloop van het volume bodemvochtgehalte bij verzadiging, bij pF 2 (veldcapaciteit) en bij pF 4.2 (verwelkingspunt) met organische stofgehalte (stowa.nl)

Door het aanbrengen van een leeflaag in hoog NL en laag NL en eventueel een ophooglaag in laag NL zijn voor deze studie bodems gedefinieerd met aangepaste bodemparameters.

Het model zoekt de dikte van de wortelzone uit de combinatie van bodemtype en gewastype. Daarom definiëren we nieuwe combinaties van bodem- en Feddes-parameters in de UWBM invoerfiles (etparameters.csv en soilparameters_new.csv):

- laag NL met 10 cm leeflaag voor gras op 140 cm ophooglaag op klei.
 - 10 cm bodemtype 14 humusrijk + 140 cm bodemtype 14 + overig bodemtype 17 wordt
 - Bodemtype 33 – Gewastype 21 – Wortelzone 10 cm
- laag NL met 80 cm leeflaag voor bomen op 70 cm ophooglaag op klei.
 - 80 cm bodemtype 14 humusrijk + 70 cm bodemtype 14 + overig bodemtype 17 wordt
 - Bodemtype 33 – Gewastype 23 – Wortelzone 80 cm
- hoog NL met 10 cm leeflaag voor gras op zand.
 - 10 cm bodemtype 8 humusrijk + overig bodemtype 8 wordt
 - Bodemtype 34 – Gewastype 21 – Wortelzone 10 cm

- hoog NL met 80 cm leeflaag voor bomen op zand.
 - o 80 cm bodemtype 8 humusrijk + overig bodemtype 8 wordt
 - o Bodemtype 34 – Gewastype 23 – Wortelzone 80 cm
- laag NL met 10 cm leeflaag voor gras op klei.
 - o 10 cm bodemtype 14 humusrijk + overig bodemtype 17 wordt
 - o Bodemtype 35 – Gewastype 21 – Wortelzone 10 cm
- laag NL met 80 cm leeflaag voor bomen op klei.
 - o 80 cm bodemtype 14 humusrijk + overig bodemtype 17 wordt
 - o Bodemtype 35 – Gewastype 23 – Wortelzone 80 cm

Voor een van de doorgerekende maatregelen toegepast in laag NL met ophooglaag en in hoog NL, het verdikken van de leeflaag, zijn nog 4 combinaties van bodemtype en gewastype (met daaraan gekoppelde dikte wortelzone) toegevoegd:

- laag NL met 20 cm leeflaag voor gras op 130 cm ophooglaag op klei.
 - o 20 cm bodemtype 14 humusrijk + 130 cm bodemtype 14 + overig bodemtype 17 wordt
 - o Bodemtype 33 – Gewastype 24 – Wortelzone 20 cm
- laag NL met 100 cm leeflaag voor bomen op 50 cm ophooglaag op klei.
 - o 100 cm bodemtype 14 humusrijk + 50 cm bodemtype 14 + overig bodemtype 17 wordt
 - o Bodemtype 33 – Gewastype 25 – Wortelzone 100 cm
- hoog NL met 20 cm leeflaag voor gras op zand.
 - o 20 cm bodemtype 8 humusrijk + overig bodemtype 8 wordt
 - o Bodemtype 34 – Gewastype 24 – Wortelzone 20 cm
- hoog NL met 100 cm leeflaag voor bomen op zand.
 - o 100 cm bodemtype 8 humusrijk + overig bodemtype 8 wordt
 - o Bodemtype 34 – Gewastype 25 – Wortelzone 100 cm

De gebruikte bodemparameters zijn voor gras met 10 cm wortelzone en bomen met 80 cm (geel gearceerde waarden zijn aangepast ten opzichte van de standaardtabellen):

soil_type	th_rz	gwl	moist_cont_eq_rz[mm]	capris_max[mm/d]	stor_coef	k_sat	K_unsat	soil_type	th_rz	gwl	moist_cont_eq_rz[mm]	capris_max[mm/d]	stor_coef	k_sat	K_unsat
33	10	0	48.4	5	0.01	50.00	25.00	33	80	0	335.2	5	0.01	50.00	25.00
33	10	0.1	47.8	5	0.01	50.00	25.00	33	80	0.1	334.6	5	0.01	50.00	25.00
33	10	0.2	46.1	4	0.05	50.00	25.00	33	80	0.2	332.2	5	0.05	50.00	25.00
33	10	0.3	44.2	2	0.1	50.00	25.00	33	80	0.3	327.1	5	0.1	50.00	25.00
33	10	0.4	42.3	1	0.15	50.00	25.00	33	80	0.4	318	5	0.15	50.00	25.00
33	10	0.5	40.6	0.5	0.2	50.00	25.00	33	80	0.5	304.6	5	0.2	50.00	25.00
33	10	0.6	39.1	0.3	0.25	50.00	25.00	33	80	0.6	287.9	5	0.25	50.00	25.00
33	10	0.7	37.9	0.15	0.3	50.00	25.00	33	80	0.7	268.7	5	0.3	50.00	25.00
33	10	0.8	36.7	0.1	0.3	50.00	25.00	33	80	0.8	248.6	5	0.3	50.00	25.00
33	10	0.9	35.7	0.09	0.3	50.00	25.00	33	80	0.9	229.1	4	0.3	50.00	25.00
33	10	1	34.8	0.08	0.3	50.00	25.00	33	80	1	212.2	2	0.3	50.00	25.00
33	10	1.1	34	0.07	0.3	50.00	25.00	33	80	1.1	199.7	1	0.3	50.00	25.00
33	10	1.2	33.3	0.06	0.3	50.00	25.00	33	80	1.2	190.9	0.5	0.3	50.00	25.00
33	10	1.3	32.7	0.05	0.3	50.00	25.00	33	80	1.3	185.3	0.3	0.3	50.00	25.00
33	10	1.4	32.1	0.04	0.3	50.00	25.00	33	80	1.4	181.3	0.15	0.3	50.00	25.00
33	10	1.5	31.6	0.03	0.3	50.00	25.00	33	80	1.5	178.1	0.1	0.3	50.00	25.00
33	10	1.6	31.1	0.02	0.057	5.37	0.12	33	80	1.6	175.2	0.09	0.057	5.37	0.12
33	10	1.7	30.6	0.01	0.059	5.37	0.12	33	80	1.7	172.7	0.08	0.059	5.37	0.12
33	10	1.8	30.2	0.001	0.06	5.37	0.12	33	80	1.8	170.4	0.07	0.06	5.37	0.12
33	10	1.9	29.8	0.001	0.062	5.37	0.12	33	80	1.9	168.4	0.06	0.062	5.37	0.12
33	10	2	29.4	0.001	0.064	5.37	0.12	33	80	2	166.7	0.05	0.064	5.37	0.12
33	10	2.1	29.1	0.001	0.066	5.37	0.12	33	80	2.1	165.1	0.04	0.066	5.37	0.12
33	10	2.2	28.8	0.001	0.067	5.37	0.12	33	80	2.2	163.6	0.03	0.067	5.37	0.12
33	10	2.3	28.5	0.001	0.069	5.37	0.12	33	80	2.3	162.3	0.02	0.069	5.37	0.12
33	10	2.4	28.2	0.001	0.07	5.37	0.12	33	80	2.4	161.1	0.01	0.07	5.37	0.12
33	10	2.5	28	0.001	0.072	5.37	0.12	33	80	2.5	159.9	0.001	0.072	5.37	0.12
33	10	3	26.8	0.001	0.078	5.37	0.12	33	80	3	155.6	0.001	0.078	5.37	0.12
33	10	4	25.2	0.001	0.089	5.37	0.12	33	80	4	149.7	0.001	0.089	5.37	0.12
33	10	5	24.1	0.001	0.097	5.37	0.12	33	80	5	146.3	0.001	0.097	5.37	0.12
33	10	10	21.4	0.001	0.121	5.37	0.12	33	80	10	137.8	0.001	0.121	5.37	0.12

soil_type	th_rz	gw	moist_cont_eq_rz[mm]	capris_max[mm/d]	stor_coef	k_sat	K_unsat	soil_type	th_rz	gw	moist_cont_eq_rz[mm]	capris_max[mm/d]	stor_coef	k_sat	K_unsat
34	10	0	48.4	5	0.01	23.4	11.38	34	80	0	369.2	5	0.01	23.4	11.38
34	10	0.1	47.8	5	0.01	23.4	11.38	34	80	0.1	368.6	5	0.01	23.4	11.38
34	10	0.2	46.1	5	0.023	23.4	11.38	34	80	0.2	366.3	5	0.023	23.4	11.38
34	10	0.3	44.2	5	0.042	23.4	11.38	34	80	0.3	362.1	5	0.042	23.4	11.38
34	10	0.4	42.3	5	0.056	23.4	11.38	34	80	0.4	356	5	0.056	23.4	11.38
34	10	0.5	40.6	5	0.069	23.4	11.38	34	80	0.5	348.8	5	0.069	23.4	11.38
34	10	0.6	39.1	5	0.092	23.4	11.38	34	80	0.6	340.4	5	0.092	23.4	11.38
34	10	0.7	37.9	5	0.108	23.4	11.38	34	80	0.7	330.3	5	0.108	23.4	11.38
34	10	0.8	36.7	5	0.128	23.4	11.38	34	80	0.8	318.3	5	0.128	23.4	11.38
34	10	0.9	35.7	3.806	0.146	23.4	11.38	34	80	0.9	304.9	5	0.146	23.4	11.38
34	10	1	34.8	2.881	0.161	23.4	11.38	34	80	1	290.9	5	0.161	23.4	11.38
34	10	1.1	34	2.202	0.174	23.4	11.38	34	80	1.1	277.4	5	0.174	23.4	11.38
34	10	1.2	33.3	1.695	0.185	23.4	11.38	34	80	1.2	265.3	5	0.185	23.4	11.38
34	10	1.3	32.7	1.307	0.193	23.4	11.38	34	80	1.3	254.7	5	0.193	23.4	11.38
34	10	1.4	32.1	1.015	0.203	23.4	11.38	34	80	1.4	245.4	5	0.203	23.4	11.38
34	10	1.5	31.6	0.79	0.21	23.4	11.38	34	80	1.5	237.3	5	0.21	23.4	11.38
34	10	1.6	31.1	0.619	0.216	23.4	11.38	34	80	1.6	230.3	3.852	0.216	23.4	11.38
34	10	1.7	30.6	0.487	0.221	23.4	11.38	34	80	1.7	224.2	2.61	0.221	23.4	11.38
34	10	1.8	30.2	0.386	0.226	23.4	11.38	34	80	1.8	218.9	1.817	0.226	23.4	11.38
34	10	1.9	29.8	0.309	0.23	23.4	11.38	34	80	1.9	214.1	1.297	0.23	23.4	11.38
34	10	2	29.4	0.248	0.234	23.4	11.38	34	80	2	209.9	0.946	0.234	23.4	11.38
34	10	2.1	29.1	0.201	0.237	23.4	11.38	34	80	2.1	206	0.704	0.237	23.4	11.38
34	10	2.2	28.8	0.164	0.24	23.4	11.38	34	80	2.2	202.6	0.533	0.24	23.4	11.38
34	10	2.3	28.5	0.136	0.243	23.4	11.38	34	80	2.3	199.5	0.411	0.243	23.4	11.38
34	10	2.4	28.2	0.113	0.246	23.4	11.38	34	80	2.4	196.7	0.321	0.246	23.4	11.38
34	10	2.5	28	0.094	0.248	23.4	11.38	34	80	2.5	194.1	0.254	0.248	23.4	11.38
34	10	3	26.8	0.042	0.257	23.4	11.38	34	80	3	183.8	0.093	0.257	23.4	11.38
34	10	4	25.2	0.012	0.268	23.4	11.38	34	80	4	171.1	0.021	0.268	23.4	11.38
34	10	5	24.1	0.005	0.274	23.4	11.38	34	80	5	163.4	0.007	0.274	23.4	11.38
34	10	10	21.4	0	0.285	23.4	11.38	34	80	10	147.4	0	0.285	23.4	11.38
35	10	0	48.4	5	0.01	5.37	0.12	35	80	0	335.2	5	0.01	23.4	11.38
35	10	0.1	47.8	5	0.01	5.37	0.12	35	80	0.1	334.6	5	0.01	23.4	11.38
35	10	0.2	46.1	5	0.018	5.37	0.12	35	80	0.2	332.2	5	0.018	23.4	11.38
35	10	0.3	44.2	2.463	0.021	5.37	0.12	35	80	0.3	327.1	5	0.021	23.4	11.38
35	10	0.4	42.3	1.576	0.023	5.37	0.12	35	80	0.4	318	5	0.023	23.4	11.38
35	10	0.5	40.6	1.028	0.027	5.37	0.12	35	80	0.5	304.6	5	0.027	23.4	11.38
35	10	0.6	39.1	0.746	0.029	5.37	0.12	35	80	0.6	287.9	5	0.029	23.4	11.38
35	10	0.7	37.9	0.571	0.033	5.37	0.12	35	80	0.7	268.7	5	0.033	23.4	11.38
35	10	0.8	36.7	0.453	0.036	5.37	0.12	35	80	0.8	248.6	5	0.036	23.4	11.38
35	10	0.9	35.7	0.369	0.039	5.37	0.12	35	80	0.9	229.1	5	0.039	23.4	11.38
35	10	1	34.8	0.307	0.042	5.37	0.12	35	80	1	212.2	5	0.042	23.4	11.38
35	10	1.1	34	0.259	0.045	5.37	0.12	35	80	1.1	199.7	5	0.045	23.4	11.38
35	10	1.2	33.3	0.222	0.047	5.37	0.12	35	80	1.2	190.9	5	0.047	23.4	11.38
35	10	1.3	32.7	0.192	0.05	5.37	0.12	35	80	1.3	185.3	3.079	0.05	23.4	11.38
35	10	1.4	32.1	0.168	0.052	5.37	0.12	35	80	1.4	181.3	1.658	0.052	23.4	11.38
35	10	1.5	31.6	0.148	0.054	5.37	0.12	35	80	1.5	178.1	1.018	0.054	23.4	11.38
35	10	1.6	31.1	0.132	0.057	5.37	0.12	35	80	1.6	175.2	0.431	0.057	23.4	11.38
35	10	1.7	30.6	0.117	0.059	5.37	0.12	35	80	1.7	172.7	0.336	0.059	23.4	11.38
35	10	1.8	30.2	0.106	0.06	5.37	0.12	35	80	1.8	170.4	0.27	0.06	23.4	11.38
35	10	1.9	29.8	0.095	0.062	5.37	0.12	35	80	1.9	168.4	0.222	0.062	23.4	11.38
35	10	2	29.4	0.086	0.064	5.37	0.12	35	80	2	166.7	0.185	0.064	23.4	11.38
35	10	2.1	29.1	0.079	0.066	5.37	0.12	35	80	2.1	165.1	0.157	0.066	23.4	11.38
35	10	2.2	28.8	0.072	0.067	5.37	0.12	35	80	2.2	163.6	0.135	0.067	23.4	11.38
35	10	2.3	28.5	0.066	0.069	5.37	0.12	35	80	2.3	162.3	0.117	0.069	23.4	11.38
35	10	2.4	28.2	0.061	0.07	5.37	0.12	35	80	2.4	161.1	0.103	0.07	23.4	11.38
35	10	2.5	28	0.056	0.072	5.37	0.12	35	80	2.5	159.9	0.075	0.072	23.4	11.38
35	10	3	26.8	0.039	0.078	5.37	0.12	35	80	3	155.6	0.042	0.078	23.4	11.38
35	10	4	25.2	0.021	0.089	5.37	0.12	35	80	4	149.7	0.02	0.089	23.4	11.38
35	10	5	24.1	0.012	0.097	5.37	0.12	35	80	5	146.3	0.009	0.097	23.4	11.38
35	10	10	21.4	0.001	0.121	5.37	0.12	35	80	10	137.8	0.001	0.121	23.4	11.38

En voor de maatregel met verdikte leeflaag voor gras met 20 cm wortelzone en bomen met 100 cm (geel gearceerde waarden zijn aangepast ten opzichte van de standaardtabellen):

soil_type	th_rz	gwl	moist_cont_eq_rz[mm]	capris_max[mm/d]	stor_coef	k_sat	K_unsat	soil_type	th_rz	gwl	moist_cont_eq_rz[mm]	capris_max[mm/d]	stor_coef	k_sat	K_unsat
33	20	0	92.8	5	0.01	50.00	25.00	33	100	0	416	5	0.01	50.00	25.00
33	20	0.1	92.2	5	0.01	50.00	25.00	33	100	0.1	415.4	5	0.01	50.00	25.00
33	20	0.2	89.8	5	0.05	50.00	25.00	33	100	0.2	413	5	0.05	50.00	25.00
33	20	0.3	85.7	4	0.1	50.00	25.00	33	100	0.3	407.9	5	0.1	50.00	25.00
33	20	0.4	80.6	2	0.15	50.00	25.00	33	100	0.4	398.8	5	0.15	50.00	25.00
33	20	0.5	75.9	1	0.2	50.00	25.00	33	100	0.5	385.4	5	0.2	50.00	25.00
33	20	0.6	71.8	0.5	0.25	50.00	25.00	33	100	0.6	368.7	5	0.25	50.00	25.00
33	20	0.7	68.6	0.3	0.3	50.00	25.00	33	100	0.7	349.5	5	0.3	50.00	25.00
33	20	0.8	66.4	0.15	0.3	50.00	25.00	33	100	0.8	329.4	5	0.3	50.00	25.00
33	20	0.9	64.6	0.1	0.3	50.00	25.00	33	100	0.9	308.8	5	0.3	50.00	25.00
33	20	1	63	0.09	0.3	50.00	25.00	33	100	1	287.9	5	0.3	50.00	25.00
33	20	1.1	61.5	0.08	0.3	50.00	25.00	33	100	1.1	267.8	4	0.3	50.00	25.00
33	20	1.2	60.2	0.07	0.3	50.00	25.00	33	100	1.2	250.4	2	0.3	50.00	25.00
33	20	1.3	59.1	0.06	0.3	50.00	25.00	33	100	1.3	237.4	1	0.3	50.00	25.00
33	20	1.4	58.1	0.05	0.3	50.00	25.00	33	100	1.4	228.3	0.5	0.3	50.00	25.00
33	20	1.5	57.1	0.04	0.3	50.00	25.00	33	100	1.5	222.3	0.3	0.3	50.00	25.00
33	20	1.6	56.3	0.03	0.057	5.37	0.12	33	100	1.6	218	0.15	0.057	5.37	0.12
33	20	1.7	55.5	0.02	0.059	5.37	0.12	33	100	1.7	214.5	0.1	0.059	5.37	0.12
33	20	1.8	54.8	0.01	0.06	5.37	0.12	33	100	1.8	211.4	0.09	0.06	5.37	0.12
33	20	1.9	54.1	0.001	0.062	5.37	0.12	33	100	1.9	208.7	0.08	0.062	5.37	0.12
33	20	2	53.5	0.001	0.064	5.37	0.12	33	100	2	206.2	0.07	0.064	5.37	0.12
33	20	2.1	52.9	0.001	0.066	5.37	0.12	33	100	2.1	204	0.06	0.066	5.37	0.12
33	20	2.2	52.4	0.001	0.067	5.37	0.12	33	100	2.2	202.1	0.05	0.067	5.37	0.12
33	20	2.3	51.9	0.001	0.069	5.37	0.12	33	100	2.3	200.3	0.04	0.069	5.37	0.12
33	20	2.4	51.4	0.001	0.07	5.37	0.12	33	100	2.4	198.7	0.03	0.07	5.37	0.12
33	20	2.5	51	0.001	0.072	5.37	0.12	33	100	2.5	197.3	0.02	0.072	5.37	0.12
33	20	3	49.1	0.001	0.078	5.37	0.12	33	100	3	191.6	0.01	0.078	5.37	0.12
33	20	4	46.5	0.001	0.089	5.37	0.12	33	100	4	184.5	0.001	0.089	5.37	0.12
33	20	5	44.7	0.001	0.097	5.37	0.12	33	100	5	180.4	0.001	0.097	5.37	0.12
33	20	10	40.3	0.001	0.121	5.37	0.12	33	100	10	170.3	0.001	0.121	5.37	0.12
34	20	0	96.8	5	0.01	23.4	11.38	34	100	0	458	5	0.01	23.4	11.38
34	20	0.1	96.2	5	0.01	23.4	11.38	34	100	0.1	457.4	5	0.01	23.4	11.38
34	20	0.2	93.9	5	0.023	23.4	11.38	34	100	0.2	455.1	5	0.023	23.4	11.38
34	20	0.3	90.3	5	0.042	23.4	11.38	34	100	0.3	450.9	5	0.042	23.4	11.38
34	20	0.4	86.5	5	0.056	23.4	11.38	34	100	0.4	444.8	5	0.056	23.4	11.38
34	20	0.5	82.9	5	0.069	23.4	11.38	34	100	0.5	437.6	5	0.069	23.4	11.38
34	20	0.6	79.8	5	0.092	23.4	11.38	34	100	0.6	429.2	5	0.092	23.4	11.38
34	20	0.7	77	5	0.108	23.4	11.38	34	100	0.7	419.1	5	0.108	23.4	11.38
34	20	0.8	74.6	5	0.128	23.4	11.38	34	100	0.8	407.1	5	0.128	23.4	11.38
34	20	0.9	72.4	5	0.146	23.4	11.38	34	100	0.9	393.2	5	0.146	23.4	11.38
34	20	1	70.5	4.252	0.161	23.4	11.38	34	100	1	377.8	5	0.161	23.4	11.38
34	20	1.1	68.9	3.094	0.174	23.4	11.38	34	100	1.1	361.3	5	0.174	23.4	11.38
34	20	1.2	67.3	2.27	0.185	23.4	11.38	34	100	1.2	344.6	5	0.185	23.4	11.38
34	20	1.3	66	1.675	0.193	23.4	11.38	34	100	1.3	328.9	5	0.193	23.4	11.38
34	20	1.4	64.8	1.248	0.203	23.4	11.38	34	100	1.4	314.9	5	0.203	23.4	11.38
34	20	1.5	63.6	0.939	0.21	23.4	11.38	34	100	1.5	302.6	5	0.21	23.4	11.38
34	20	1.6	62.6	0.713	0.216	23.4	11.38	34	100	1.6	291.9	5	0.216	23.4	11.38
34	20	1.7	61.7	0.548	0.221	23.4	11.38	34	100	1.7	282.6	5	0.221	23.4	11.38
34	20	1.8	60.8	0.426	0.226	23.4	11.38	34	100	1.8	274.5	3.852	0.226	23.4	11.38
34	20	1.9	60	0.335	0.23	23.4	11.38	34	100	1.9	267.5	2.61	0.23	23.4	11.38
34	20	2	59.2	0.266	0.234	23.4	11.38	34	100	2	261.3	1.817	0.234	23.4	11.38
34	20	2.1	58.5	0.214	0.237	23.4	11.38	34	100	2.1	255.7	1.297	0.237	23.4	11.38
34	20	2.2	57.9	0.173	0.24	23.4	11.38	34	100	2.2	250.9	0.946	0.24	23.4	11.38
34	20	2.3	57.3	0.142	0.243	23.4	11.38	34	100	2.3	246.4	0.704	0.243	23.4	11.38
34	20	2.4	56.7	0.117	0.246	23.4	11.38	34	100	2.4	242.5	0.533	0.246	23.4	11.38
34	20	2.5	56.2	0.097	0.248	23.4	11.38	34	100	2.5	238.9	0.411	0.248	23.4	11.38
34	20	3	53.9	0.043	0.257	23.4	11.38	34	100	3	225	0.135	0.257	23.4	11.38
34	20	4	50.6	0.012	0.268	23.4	11.38	34	100	4	208.4	0.027	0.268	23.4	11.38
34	20	5	48.4	0.005	0.274	23.4	11.38	34	100	5	198.8	0.009	0.274	23.4	11.38
34	20	10	42.9	0	0.285	23.4	11.38	34	100	10	179.6	0	0.285	23.4	11.38

N.B. K_unsat (verticale onverzadigde doorlatendheid) wordt (nog) niet gebruikt in het UWBM. K_sat (verticale verzadigde doorlatendheid) wordt eenmalig ingelezen via de bovenste regel. Omdat we ervan uitgaan dat de grondwaterstand zelden in de wortelzone staat, krijgt de leeflaag op klei de K_sat van klei. Bij de situaties met een ophooglaag van zand tot 1.5 meter onder maaiveld zal de grondwaterstand zich in de ophooglaag bevinden en krijgt de K_sat de waarde van het ophoogzand.

Toegevoegd aan de Feddes parameters zijn:

soil_type	crop_type	th_rz_m	th_rz_mm	theta_h1_%	theta_h1_mm	theta_h2_mm	theta_h3h_mm	theta_h3l_mm	theta_h4_mm	theta_h4_%
33	21	0.1	100	50	50	48.4	22.7	20.3	15.1	15.1
33	23	0.8	800	50	400	335.2	181.1	162.4	120.6	15.1
33	24	0.2	200	50	100	92.8	45.3	40.6	30.2	15.1
33	25	1.0	1000	50	500	416	226.4	203	150.7	15.1
34	21	0.1	100	50	50	48.4	11.4	8.4	3.5	3.5
34	23	0.8	800	50	400	369.2	91.4	67.4	27.6	3.5
34	24	0.2	200	50	100	96.8	22.9	16.8	6.9	3.5
34	25	1.0	1000	50	500	458	114.3	84.2	34.5	3.5
35	21	0.1	100	50	50	48.4	22.7	20.3	15.1	15.1
35	23	0.8	800	50	400	335.2	181.1	162.4	120.6	15.1

Hierbij is voor theta_h2 het evenwichtsvochtgehalte bij een grondwaterstand aan maaiveld aangehouden en zijn de waarden voor theta_h3 en theta_h4 bepaald uit de gemiddelde waarden van de leeflaag en van de originele ondergrond.

Oppervlakte water

Voor het oppervlaktewater wordt een streefpeil opgegeven ten opzichte van maaiveld. Voor laag NL is daarvoor een streefpeil van 1.0 m onder maaiveld gehanteerd. Voor hoog NL is wordt een streefpeil van 2.5 m onder maaiveld gehanteerd. De bijbehorende drainageweerstanden zijn 100 d voor vinexwijken in laag NL, 200 d voor de andere wijken in laag NL en 5000 d voor hoog NL.

De uitwisseling met het diepe grondwater (kwel / wegzijging) gebeurt via een stijghoogte verschil en een weerstand:

$$Q = 1000 * (H_{diep} - GWS) / c \text{ (positief is neerwaarts gericht).}$$

Waarin:

Q = wegzijging [mm] (negatieve getallen duiden op kwel)

GWS = grondwaterstand [m –MV]

Hdiep = constante stijghoogte diep grondwater [m –MV]

C = weerstand tegen stroming van GWS naar Hdiep en omgekeerd [dagen]

N.B. de stijghoogte Hdiep en de weerstand c hebben geen fysieke betekenis en zijn alleen bedoeld om de uitwisseling met het diepere grondwater te sturen.

Voor laag NL gebruiken we voor Hdiep 0.75 m –MV en voor c 1000 dagen. Als de grondwaterstand gelijk aan het oppervlaktewater streefpeil (1.0 m –MV) is, resulteert dat in een wegzijging van –0.25 mm/dag (negatief, dus kwel). Voor hoog NL gebruiken we voor Hdiep 3.3 m –MV en voor c 1000 dagen. Als de grondwaterstand gelijk aan het oppervlaktewater streefpeil (2.5 m –MV) is, resulteert dat in een wegzijging van 0.8 mm/dag.

De infiltratiecapaciteiten in onverharde gebieden zijn voor laag NL 5 mm/uur en voor hoog NL 20 mm/uur. Voor Open Verhard gebied zijn dat 0.11 mm/uur resp. 0.45 mm/uur. Omdat dit in het model direct door percoleert naar het grondwater, is er voor wat betreft de infiltratiecapaciteit (in laag NL) geen rekening gehouden met een eventueel aangebrachte laag ophoogzand onder het open verharde gebied.

Meteorologie

Voor neerslag en verdamping gebruiken we data van KNMI weerstation Rotterdam (344) aangevuld met data van weerstation De Bilt (260) vanaf 1951 tot en met 2020 (70 jaar). De neerslag per uur is gebruikt, waarbij de kleine hoeveelheden (-1 in de KNMI data = < 0.05 mm) zijn vervangen door 0.025 mm. De referentiegewas verdamping per uur is afgeleid door de etmaalverdamping te vermenigvuldigen met het quotiënt van de globale straling per uur en de globale straling per dag (som van 24 uren). De open water verdamping is afgeleid door de gewas verdamping te delen door 0.8982.

Voor de berekeningen gebruiken we de laatste 30 jaar (1991 t/m 2020), omdat 30 jaar de periode is waarover een klimaat wordt vastgesteld. Klimaat = gemiddeld weer over een periode van 30 jaar. Dat levert karakteristieken op zoals weergegeven in Tabel 4.

Tabel 4: Samenvatting van belangrijkste meteorologische parameters.

Parameter waarden over 30 jaar uur neerslag data (1991 – 2020)	Totaal [mm]	Gemiddeld per jaar [mm]	Gemiddeld per dag [mm]
Neerslag	27053	902	2.47
Maximum gemeten uur neerslag	22.7		
Uur neerslag 6 per jaar overschreden *	7.5		
Uur neerslag 1x per 2 jaar overschreden **	16.0		
De totale referentie gewasverdamping	18032	601	1.65
De totale open water verdamping	20076	669	1.83
De totale potentiële verdamping voor bomen	23442	781	2.14

* bepalend voor de afvoercapaciteit voor gemengde rioolssystemen

** bepalend voor de afvoercapaciteit voor regenwater rioolssystemen

De gemiddelde jaarlijkse neerslag over de laatste 30 jaar is 902 mm (2.47 mm/dag). Dat is ruim 90 mm/jaar meer dan het gemiddelde over de 40 jaar daarvoor. De maximum uur-neerslag in de laatste 30 jaar is 22.7 mm, waar die over de 40 jaar daarvoor 44.1 mm is. De gemiddelde jaarlijkse potentiële referentiegewasverdamping in de laatste 30 jaar bedraagt 601 mm, waar die over de 40 jaar daarvoor op 535 mm/jaar ligt.

Dus orde 90 mm meer neerslag per jaar, maar minder extreme neerslaguren. En 65 mm meer (potentiële) verdamping per jaar. Voor buien (gescheiden door 6 uur zonder neerslag) geldt dat buien tot 75 mm iets vaker voorkomen in de laatste 30 jaar, maar dat de maximum bui van de laatste 30 jaar (89.6 mm, gedurende 60 uur in september 1998) in de 40 jaar daarvoor nog 4 keer wordt overschreden door buien van meer dan 100 mm, met als maximum 127.4 mm (een lange periode met gestage neerslag van 12 tot 25 november 1977) en als korter durend maximum 109.1 mm in 21 uur in juni 1975.

In de laatste 30 jaar een neerslag van 7.5 mm/uur wordt 6 keer per jaar overschreden, een neerslag van 16.0 mm/uur wordt 1 keer per 2 jaar overschreden.

Beschikbare oppervlaktewaterberging

De beschikbare berging in openwater [mm over de gehele wijk] wordt weergegeven in onderstaande tabel. Deze bergingscapaciteit in openwater wordt bepaald door het aandeel aan openwater in een wijk en de ruimte tussen het openwater streefpeil en maaiveld. Ondanks het kleinere oppervlak aan openwater in hoog NL is de waterberging hier groter. Dit komt doordat het streefpeil van het openwater in hoog NL 1.5 m verder onder maaiveld ligt dan in laag NL.

Bergingscapaciteit van het openwater, uitgedrukt in mm over het totale wijkoppervlak

Combinatie	Bloemkoolwijk	Vinex	Oudere Woonwijk
laag NL	139	199	141
hoog NL	173	235	143

Deze bergingscapaciteit is in alle wijken dusdanig groot dat die in de beschouwde 30 jaar nooit wordt overschreden.

Overzicht modelparameters

Hieronder een overzicht van de meest relevante modelparameters per wijk. Uitgangspunten daarbij zijn:

- Afvoercapaciteit uit het gebied is gebaseerd op gemiddeld poldergemaal;
- Interceptiebergings op verhard gebied: 1.6 mm op onverhard gebied: 20 mm;
- Riooloverloop op straat begint bij een neerslagintensiteit vanaf 16.0 mm/uur (1 keer per 2 jaar);
- Riooloverloop van gemengde riolen begint bij een neerslagintensiteit vanaf 7.5 mm/uur (6 keer per jaar);
- Bergingscapaciteit regenwaterriool: 2 mm; gemengd riool: 9 mm
- Aandeel gescheiden rioolstelsel:
 - Oudere woonwijken: 0%
 - Bloemkoolwijken: 50%
 - Vinexwijken: 100%
- Vinexwijken in laag NL hebben een grotere dichtheid met watergangen, resulterend in een 2 keer zo lage drainageweerstand.
- Wegzijing in hoog NL in orde van 0.8 mm/dag; kwel in laag NL in orde van 0.25 mm/dag.

Een overzicht van de meest relevante parameters wordt gegeven in Tabel 5

Tabel 5: Gebruikte parameters voor bergingscapaciteit, aandeel afgekoppeld oppervlak, aandeel boven grondwater, afvoercapaciteit, infiltratie capaciteit, oppervlaktewaterpeil, drainage weerstand en kwel/wegzijing.

Overige parameters	Hoog NL			Laag NL		
	Bloemkoolwijk	Oudere woonwijk	Vinex	Bloemkoolwijk	Oudere woonwijk	Vinex
Aandeel gescheiden riool	50%	0%	100%	50%	0%	100%
Bergingscapaciteit						
- daken	1.6 mm	1.6 mm	1.6 mm	1.6 mm	1.6 mm	1.6 mm
- gesloten verhard	1.6 mm	1.6 mm	1.6 mm	1.6 mm	1.6 mm	1.6 mm
- open verhard	1.6 mm	1.6 mm	1.6 mm	1.6 mm	1.6 mm	1.6 mm
- onverhard	20 mm	20 mm	20 mm	20 mm	20 mm	20 mm
- gescheiden riool	2 mm		2 mm	2 mm		2 mm
- gemengd riool	9 mm	9 mm		9 mm	9 mm	
Aandeel afgekoppeld						
- daken	0%	0%	0%	0%	0%	0%
- gesloten verhard	0%	0%	0%	0%	0%	0%
- open verhard	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Aandeel boven grondwater						
- daken	0%	0%	0%	0%	0%	0%
- open water	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Afvoercapaciteit						
- project gebied	14.4 mm/dag	14.4 mm/dag	14.4 mm/dag	14.4 mm/dag	14.4 mm/dag	14.4 mm/dag
- gescheiden riool	16.0 mm/uur		16.0 mm/uur	16.0 mm/uur		16.0 mm/uur
- gemengd riool	7.5 mm/uur	7.5 mm/uur		7.5 mm/uur	7.5 mm/uur	
Infiltratie capaciteit						
- open verhard	10.7 mm/dag	10.7 mm/dag	10.7 mm/dag	2.64 mm/dag	2.64 mm/dag	2.64 mm/dag
- onverhard	480 mm/dag	480 mm/dag	480 mm/dag	120 mm/dag	120 mm/dag	120 mm/dag
Open water peil	2.5 m-MV	2.5 m-MV	2.5 m-MV	1.0 m-MV	1.0 m-MV	1.0 m-MV
Drainageweerstand	5000 dagen	5000 dagen	5000 dagen	200 dagen	200 dagen	100 dagen
Wegzijing (+) / kwel (-)						
- Hdiep	3.3 m-MV	3.3 m-MV	3.3 m-MV	0.75 m-MV	0.75 m-MV	0.75 m-MV
- c	1000 dagen	1000 dagen	1000 dagen	1000 dagen	1000 dagen	1000 dagen