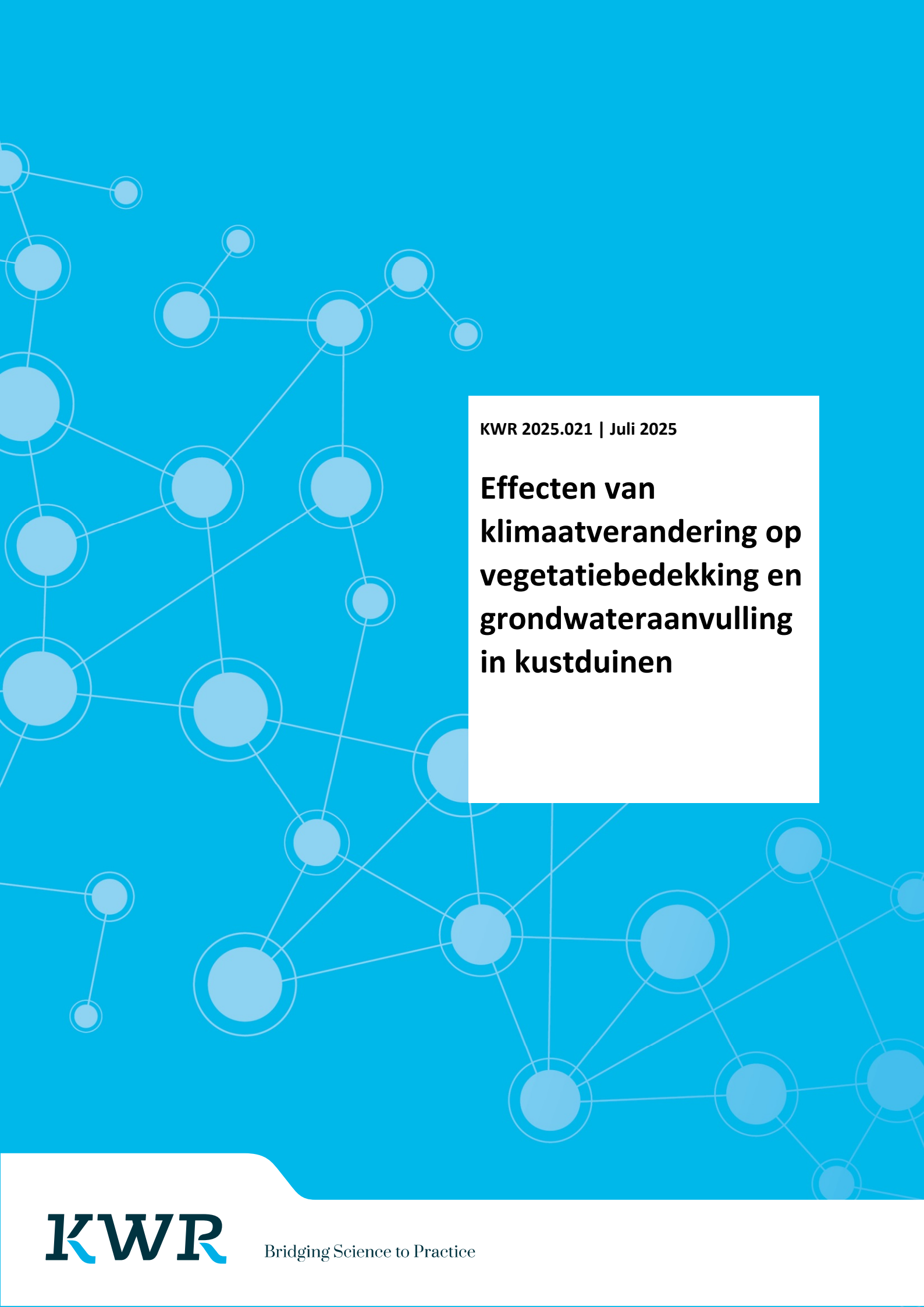




KWR 2025.021 | Juli 2025

**Effecten van
klimaatverandering op
vegetatiebedekking en
grondwateraanvulling
in kustduinen**

Colofon

Effecten van klimaatverandering op vegetatiebedekking en grondwateraanvulling in kustduinen

KWR 2025.021 | Juli 2025

Opdrachtnummer

404744-004

Projectmanager

Dr. Edu Dorland

Opdrachtgever

DPWE

Auteurs

Dr.ir. Henk Krajenbrink, dr. ir. Gijsbert Cirkel

Kwaliteitsborger

Prof.dr.ir. Ruud Bartholomeus

Verzonden naar

DPWE begeleidingsgroep Bronnen

Een jaar na publicatie is dit rapport openbaar.

Keywords

Duinhydrologie, klimaatverandering, grondwateraanvulling, grondwateronafhankelijke natuur, duinvalleien

Jaar van publicatie
2025

Meer informatie
Dr.ir. Henk Krajenbrink
T +31 30 606 9647
E henk.krajenbrink@kwrwater.nl

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

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

KWR

Juli 2025 ©

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

Samenvatting

Aanleiding

De zoetwaterbeschikbaarheid in kustduinsystemen zal de komende decennia veranderen als gevolg van klimaatverandering. Zowel in de huidige meetreeksen als in modelsimulaties van de klimaatscenario's zien we een toename van de jaarlijkse neerslag, met name in de winter. Tegelijkertijd kunnen langere periodes van droogte en hogere temperaturen in de zomer leiden tot droogtestress en zelfs tot afsterven van de vegetatie op droge standplaatsen in het duin. Hierdoor verandert de vegetatiebedekking, ontstaat meer kale grond, met als gevolg minder verdamping en een grotere grondwateraanvulling. Een toename van de grondwateraanvulling en stijging van grondwaterstanden kunnen een potentieel risico zijn voor de waterwinning in de duinen door te dunne onverzadigde zones en invloed op bestaande infrastructuur. Ook komt het halen van de Natura 2000-doelstellingen mogelijk in gevaar door te langdurige inundatie van huidige natte duinvalleien. De duinwaterbedrijven willen antwoord op de volgende onderzoeksvraag: *Hoe werken veranderingen in neerslag en verdamping als gevolg van klimaatverandering door op de bedekkingsgraad van duinvegetaties en de grondwateraanvulling in het duin?* Kennis hiervan is voor hen cruciaal om de effecten op waterwinning, natuur en omgeving te kunnen inschatten.

Werkwijze

In een eerdere studie uit 2008 is een eerste empirische relatie tussen droogtegraad en vegetatie afgeleid, die vervolgens is gebruikt om inzicht te krijgen in verandering in de vegetatie en grondwateraanvulling onder toenmalige klimaatscenario's. In voorliggende studie hebben we de relatie opnieuw getoetst en aangescherpt met behulp van nieuwe datasets met vegetatieopnamen en bodemfysische eigenschappen. De aangescherpte relatie is vervolgens gebruikt om inzicht te krijgen in de te verwachten veranderingen in samenstelling en bedekking van duinvegetatie en grondwateraanvulling onder de nieuwe KNMI'23 klimaatscenario's. Daartoe hebben we SWAP-berekeningen uitgevoerd voor drie fictieve representatieve duinlocaties (zuidhelling, duintop, noordhelling) om de grondwateraanvulling onder verschillende klimaatscenario's te kwantificeren. Anders dan in 2008 hebben we daarbij de inkomende neerslag gecorrigeerd voor het effect van hellingshoek en expositie. Op basis van de modelresultaten hebben we praktisch toepasbare correctiefactoren voor vegetatieterugkoppeling bij klimaatverandering afgeleid, waarmee de toekomstige grondwateraanvulling op grondwateronafhankelijke delen in de grondwatermodellen van de duinbedrijven kan worden gecorrigeerd.

Resultaten en conclusies

In deze studie hebben we de empirische relatie tussen vegetatiebedekking en droogtegraad verbeterd met nieuwe veldmetingen, met name in het bereik van lage bedekkingsgraden. We concluderen dat de methode uit 2008 nog steeds geschikt is om de relatie tussen droogte en bedekking te beschrijven en om hiermee de bedekkingsgraad onder toekomstige klimaatomstandigheden te benaderen, mits hiervoor de vaatplantbedekking wordt gebruikt.

De laatste decennia is een duidelijk vernattende trend te zien in de duingebieden met een toename van 16% van de gemiddelde jaarneerslag tussen de periode 1971-2000 en 1991-2020. De referentieverdamping is minder sterk toegenomen, zodat het potentiële jaarlijkse neerslagoverschot is toegenomen. Alle nieuwe klimaatscenario's, met uitzondering van de natte variant Hn, voorspellen dat in de duinstreek het potentiële neerslagoverschot in de toekomst niettemin zal afnemen. De afname in droge variant Hd in zichtjaar 2100 bedraagt ongeveer 40% ten opzichte van nu.

Het jaarlijkse potentieel vochttekort (gemiddeld verschil tussen de jaarlijkse potentiële en werkelijke transpiratie van een referentiegewas; een maat voor de droogtegraad van een standplaats waaraan de werkelijke vegetatie zich aanpast) is in de huidige situatie het hoogst op een zuidhelling en het laagst op een noordhelling en zal in alle

klimaatscenario's toenemen. Volgens de opgestelde empirische relatie tussen droogtegraad en vegetatiebedekking, neemt hierdoor de vaatplantbedekking in alle KNMI '23 scenario's af, met bijvoorbeeld een afname van 51 naar 6% op een zuidhelling in het scenario Hd₂₁₀₀. Een nieuw inzicht, volgend uit de correctie van neerslag op hellingen, is dat ook de bedekkingsgraad op noordhellingen in de toekomst sterk kan afnemen.

De terugkoppeling tussen vegetatie en klimaat heeft een niet te verwaarlozen invloed op de grondwateraanvulling op droge (grondwateronafhankelijke) locaties in de duinen. De aanvulling is anders op duinhellingen dan op vlak terrein, met de hoogste aanvulling op zuidhellingen en de laagste aanvulling op noordhellingen. Dit inzicht wijkt af van de resultaten uit 2008, als gevolg van de correctie voor de hoeveelheid neerslag op hellingen.

Door veranderingen in de vegetatiebedekking neemt de grondwateraanvulling op grondwateronafhankelijke locaties in alle klimaatscenario's toe, ondanks dat het potentiële neerslagoverschot afneemt. De voorspelde toename van de grondwateraanvulling tot zichtjaar 2100 bedraagt ongeveer 30%. In vochtige duinvalleien (grondwaterafhankelijk) neemt de grondwateraanvulling juist af, omdat de bedekkingsgraad hier niet verandert en de vegetatie door de vochtige omstandigheden vrijwel potentieel kan verdampen. Dit laat zien dat een verandering in vegetatiebedekking het klimaatsignaal dempt of zelfs omkeert. De hydrologische effecten van klimaatverandering verschillen zodoende per locatie in het duin. We concluderen dat klimaatverandering waarschijnlijk zal leiden tot een stijging van de freatische grondwaterstanden in de duingebieden.

Door het empirische karakter van de gevolgde methode zijn de exacte veranderingen van vegetatiebedekking en grondwateraanvulling met enkele onzekerheden omgeven. Niettemin stellen we vast dat de methode een goed beeld geeft van de effecten van klimaatverandering op deze factoren. Wel is meer onderzoek nodig om het effect van klimaatverandering op de bedekking door (korst)mossen beter te kwantificeren. Het effect van (korst)mossen op de grondwateraanvulling kan zowel positief als negatief zijn, maar we hebben dit in onze studie niet direct kunnen modelleren. Bovendien heeft een verandering van (korst)mosbedekking waarschijnlijk invloed op de verstuivingsdynamiek, waarbij mogelijk ook de Natura 2000-doelen worden beïnvloed. Tot slot bevelen we aan om toe te werken naar de ontwikkeling van tijdsafhankelijke correctiefactoren voor grondwatermodellen, en om te onderzoeken hoe de inzichten uit onze studie het beste kunnen worden geïmplementeerd.

Inhoud

Samenvatting	3
1 Inleiding	6
1.1 Aanleiding en belang	6
1.2 Doel, opbrengsten en leeswijzer	6
2 Bevindingen uit voorgaande studies	7
2.1 Inleiding en definities	7
2.2 Ecologische gevolgen van klimaatverandering voor kustduinen in Nederland: bevindingen 2008	8
2.3 Aanvullende inzichten uit recenter werk	9
2.4 KNMI Klimaatscenario's 2023	10
3 Empirische relatie tussen droogtegraad en bedekking	13
3.1 Methode	13
3.2 Droogtegraad en totale bedekking	13
3.3 Droogtegraad en vaatplantbedekking	14
3.4 Relatie tussen droogtegraad en mosbedekking	16
4 Extrapolatie naar toekomstig klimaat	18
4.1 Methode	18
4.2 KNMI'23 Klimaatscenario's en potentieel neerslagoverschot	19
4.3 Resultaten	20
5 Synthese en discussie	26
5.1 Synthese	26
5.2 Aandachtspunten en onzekerheden	27
6 Conclusies en aanbevelingen	28
6.1 Conclusies	28
6.2 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek	29
7 Bronnenlijst	30

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en belang

De zoetwaterbeschikbaarheid in kustduinsystemen zal de komende decennia gaan veranderen (Cirkel en Aggenbach, 2024). Klimaatpredicties laten een toename van de jaarlijkse neerslaghoeveelheid zien, met name in het winterseizoen. De grondwateraanvulling kan hierdoor toenemen, ondanks een stijging van de referentieverdamping. Langjarige meetreeksen laten op verschillende plekken al een stijgende grondwaterstand zien. Tegelijkertijd leiden langere periodes van droogte en hogere temperaturen in de zomer tot (bovengronds) afsterven van (hogere) planten en tot meer kale grond en zo tot minder verdamping op droge standplaatsen in het duin. Zeespiegelstijging, eveneens een effect van klimaatverandering, kan het effect op de freatische grondwaterstanden versterken door de stijging van de drainagebasis, hoewel dit effect niet eenduidig is en van meerdere factoren afhankelijk is. Wel is duidelijk dat een dergelijke toename van aanvulling en hiermee gepaard gaande stijging van grondwaterstanden een potentieel risico kan zijn voor de waterwin-infrastructuur in de duinen, en bijvoorbeeld de kans op herbesmetting kan vergroten door te dunne onverzadigde zones. Ook komt het halen van de Natura 2000-doelstellingen mogelijk in gevaar door te lange of zelfs permanente inundatie van huidige vochtige duinvalleien. Positief effect van de toenemende aanvulling is de vergroting van de zoetwaterlens en reductie van verzilting als gevolg van de stijgende zeespiegel. Om bovenstaande risico's beter te kunnen duiden, is kwantitatief inzicht in de grondwateraanvulling en de vegetatierespons noodzakelijk.

1.2 Doel, opbrengsten en leeswijzer

De centrale onderzoeksvraag in voorliggende studie is: *Hoe werken veranderingen in neerslag en verdamping als gevolg van klimaatverandering door op de bedekkingsgraad van duinvegetaties en de grondwateraanvulling in het duin?*

In een eerdere studie gaven Witte et al. (2008) een eerste inzicht in de relatie tussen droogte en vegetatieontwikkelingen en de terugkoppelingen die in die relatie zitten. Op basis van destijds beschikbare datasets leidden zij een empirische relatie af tussen droogtegraad en vegetatie en gebruikten die relatie om inzicht te krijgen in verandering in de vegetatie en grondwateraanvulling onder toenmalige klimaatpredicties. We bespreken de belangrijkste bevindingen uit die studie in Hoofdstuk 2, aangevuld met relevante bevindingen uit recentere studies.

Een belangrijk aandachtspunt bij de destijds afgeleide empirische relatie tussen droogte en vegetatie was de beperkte beschikbaarheid van vegetatieopname met een lage dekkingsgraad. In Hoofdstuk 3 voeren we een update uit van de relatie met enkele recentere datasets met vegetatieopnamen en bodemfysische informatie. Daarbij besteden we ook kort aandacht aan de invloed van klimaatextremen in de aanlooperperiode.

In Hoofdstuk 4 gebruiken we de opnieuw afgeleide relatie om via de methodiek van Witte et al. (2008) met de nieuwe KNMI'23 scenario's inzicht te krijgen in te verwachten veranderingen in duinvegetatie en grondwateraanvulling in de toekomst. Uit de resultaten leiden we praktisch toepasbare factoren voor vegetatieterugkoppeling bij klimaatverandering af waarmee de gangbare manieren om de grondwateraanvulling te berekenen kunnen worden aangepast.

Een synthese van het onderzoek en de belangrijkste aandachtspunten en onzekerheden beschrijven we in Hoofdstuk 5. De conclusies en aanbevelingen zijn opgenomen in Hoofdstuk 6.

2 Bevindingen uit voorgaande studies

2.1 Inleiding en definities

In dit rapport beschrijven we de resultaten van een update van het onderzoek naar de ecohydrologische gevolgen van klimaatverandering voor de Nederlandse kustduinen, zoals dat destijds door KWR is uitgevoerd en is beschreven in Witte et al. (2008). We vatten de belangrijkste bevindingen uit dat onderzoek beknopt samen in dit hoofdstuk. Sindsdien zijn er verschillende andere onderzoeken op dit gebied uitgevoerd. Enkele nieuwe inzichten die hierin zijn opgedaan, worden eveneens in dit hoofdstuk benoemd.

In het rapport hanteren we verschillende meteorologische en (eco)hydrologische begrippen en grootheden. De meeste worden bij de eerste vermelding kort gedefinieerd, maar kunnen later in de tekst mogelijk alsnog voor verwarring zorgen. Voor het leesgemak hebben we de belangrijkste definities opgenomen in Tabel 2-1.

Tabel 2-1: Lijst van de belangrijkste begrippen en grootheden die voorkomen in dit rapport

Grootheid	Omschrijving
Verdamping (mm/d of mm/j)	De overgang van water in vloeibare of vaste vorm in waterdamp (Moors et al., 2002). In meteorologische en hydrologische context gaat het om de flux van water die per tijdseenheid overgaat van de bodem en vegetatie naar de atmosfeer (Bos-Burgering et al., 2020). Verdamping is samengesteld uit verschillende componenten: verdamping direct vanuit de bodem (evaporatie), verdamping van onderschepte neerslag vanaf het oppervlak van de plant (interceptieverdamping) en verdamping via huidmondjes van planten (transpiratie)
Referentie(gewas)verdamping ET_{ref} (mm/d of mm/j)	De verdamping van een uitgebreid uniform, van buiten droog grasoppervlak met een hoogte van 8-15 cm (standaardgewas) dat voldoende van water en nutriënten is voorzien (Moors et al., 2002; Witte et al., 2008). Berekend met behulp van de vergelijking van Makkink.
(Werkelijke) verdamping ET_a (mm/d of mm/j)	Verdamping door vegetatie en bodem die in werkelijkheid optreedt, afhankelijk van o.a. de beschikbare hoeveelheid bodemvocht, nutriënten, planteigenschappen
Potentieel neerslagoverschot (mm/d of mm/j)	Verschil tussen de netto neerslag en de referentieverdamping ($P - ET_{ref}$)
(Werkelijk) neerslagoverschot (mm/d of mm/j)	Verschil tussen de netto neerslag en de verdamping ($P - ET_a$) (Moors et al., 2002)
Grondwateraanvulling R (mm/d of mm/j)	De netto aanvulling van het grondwater ten gevolge van enerzijds percolatie van netto neerslag en anderzijds capillaire opstijging (Moors et al., 2002). Bij afwezigheid van oppervlakkige afstroming is deze hoeveelheid hetzelfde als het neerslagoverschot ($R = P - ET_a$)
Droogtegraad	De mate van droogte van een bepaalde standplaats gedurende een vastgestelde periode. De precieze definitie en berekening hangt af van

	de gekozen methode, zoals het potentieel vochttekort of de droogtestress (zie hierna).
Potentieel vochttekort TK (mm/jaar)	Gemiddelde verschil tussen de jaarlijkse potentiële (T_p) en werkelijke transpiratie (T_a) van een standaardgewas (Witte et al., 2008), berekend over een vastgestelde periode van volledige jaren. Omdat de bodemverdamping (evaporatie) voor het standaardgewas nul wordt verondersteld, is T_p gelijk aan ET_{ref} .
Droogtestress TS (mm/10 dagen)	Jaarlijkse maximale transpiratiereductie ($T_p - T_a$) voor een standaardgewas over een periode van tien opeenvolgende dagen. TS wordt berekend door voor elk jaar de maximale tiendaagse transpiratiereductie te berekenen, en vervolgens de getallen van alle jaren te middelen tot één getal (Bartholomeus et al., 2011).
Standaardgewas	Korte volledig bedekkende grasmat waarbij de verdamping bij optimale watervoorziening overeenkomt met de referentieverdamping volgens Makkink (ET_{ref})
Bedekking, bedekkingsgraad	Het percentage van een bepaald grondoppervlak dat door vegetatie wordt bedekt (0-100%)

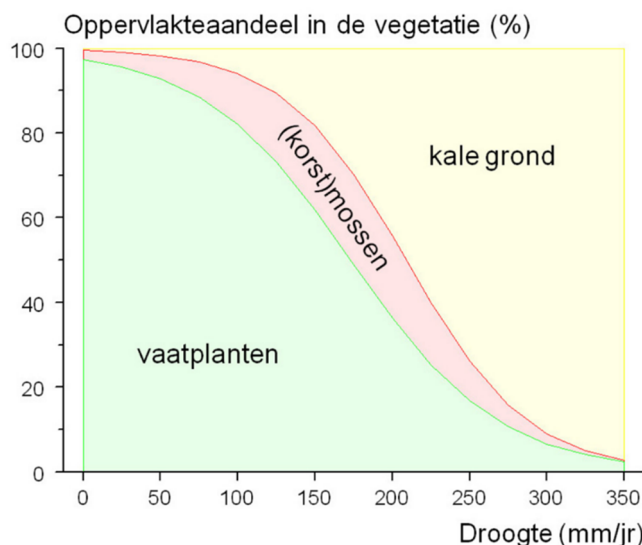
2.2 Ecologische gevolgen van klimaatverandering voor kustduinen in Nederland: bevindingen 2008

Ten tijde van het uitvoeren van het voorgaande onderzoek leek het potentiële neerslagoverschot (het verschil tussen neerslag en referentiegewasverdamping) in de voorafgaande decennia te zijn toegenomen. Op basis van de KNMI'06 klimaatscenario's werd verwacht dat de zomers droger en de winters natter zouden worden. Afhankelijk van het klimaatscenario werd voor de jaarlijkse grondwateraanvulling in de Amsterdamse Waterleidingduinen (AWD) in 2050 zowel een stijging (maximaal 16%) als een daling voorspeld (maximaal 42%). Witte et al. (2008) stelden vast dat er geen reden was om aan te nemen dat klimaatverandering in de duinen anders zou uitpakken dan in de rest van Nederland, zodat geen correctie van de klimaatscenario's nodig werd geacht voor de duinstreek.

Er bestaat een nauwe wisselwerking tussen bodem, water, atmosfeer en vegetatie. Drogere zomers zullen mogelijk zorgen voor een stijging van het aandeel kale grond en het aandeel mossen en kostmossen in de vegetatie. Doordat netto neerslag en potentiële verdamping afhangen van hellingshoek en oriëntatie (de Lima, 1990; Šúri & Hofierka, 2004), zullen deze veranderingen in vegetatie verschillen tussen horizontale oppervlakken (duintoppen) en noord- en zuidhellingen. Op basis van 42 vegetatieopnamen (drie datasets, met opnamen uit duingebieden, maar ook van andere bodems en locaties) met bijbehorende berekeningen aan vochttransport (modellering in SWAP) leidden Witte et al. (2008) een empirisch verband af tussen totale bedekking en droogtegraad (Figuur 2-1). De droogtegraad werd uitgedrukt als 'potentieel vochttekort'. Dit is het gemiddelde verschil tussen de jaarlijkse potentiële en werkelijke transpiratie (mm/jaar) van een volledig gesloten korte grasmat (standaardgewas) over een periode van 30 jaar. Het gebruik van een gestandaardiseerd gewas in de SWAP-berekeningen biedt de mogelijkheid om locaties onderling te vergelijken, waarbij verschillen in de droogtegraad alleen afhangen van ruimtelijke verschillen in de bodem en het weer. De onderzoekers stelden wel vast dat de afgeleide relatie tussen bedekking en droogtegraad gebaseerd was op relatief weinig punten, die bovendien een ruime spreiding kenden als gevolg van systematische verschillen tussen de studies. Bovendien omvatten de datasets vrijwel geen locaties met een relatief lage bedekking.

Als gevolg van klimaatverandering zal de droogtegraad (het potentieel vochttekort) veranderen, wat weer gevolgen heeft voor de bedekkingsgraad van de vegetatie. Witte et al. (2008) hebben met behulp van de afgeleide relatie en substitutie van de huidige bedekking en het verschil in potentieel vochttekort, de bedekkingsgraad in de toekomst afgeleid voor drie fictieve locaties in de AWD: een duintop (horizontaal), een noordhelling en een zuidhelling. Voor deze drie locaties werden vervolgens met SWAP-modellen de grondwateraanvulling berekend in de huidige situatie en in vier klimaatscenario's, rekening houdend met verschillen in voorspelde bedekkingsgraad van de vegetatie. Hieruit volgde dat als gevolg van klimaatverandering het percentage kale grond op zuidhellingen mogelijk zou toenemen van 30% nu naar 80% in 2050. Op noordhellingen was de berekende toename aanzienlijk minder, van 5% naar 17%. Door de toename van het aandeel kale grond (en (korst)mossen) en de daaraan gekoppelde afname van de werkelijke verdamping, zal de grondwateraanvulling naar verwachting toenemen. Op zuidhellingen werd een maximale toename van 28% berekend. Op noordhellingen was de grondwateraanvulling het hoogst, maar de toename het geringst (maximaal 11%, met in sommige klimaatscenario's een daling van enkele procenten). De auteurs stelden vast dat door de wisselwerking tussen potentieel vochttekort, bedekkingsgraad en grondwateraanvulling, het precieze effect op de toekomstige grondwateraanvulling in de kustduinen lastig kon worden samengevat.

Witte et al. (2008) stelden dat op langere termijn de extra grondwateraanvulling zal leiden tot hogere grondwaterstanden in de duinen, en dat de berekende verschillen en de toegenomen dynamiek in het grondwater effecten zullen hebben op duinvegetatie. Verder gaven zij aan dat diep wortelende, houtige soorten mogelijk in het voordeel zullen zijn en toenemen. In combinatie met het hogere aandeel kaal zand en (korst)mos kan dit betekenen dat duinvegetatie in de toekomst gekenmerkt wordt door een groter contrast met scherpere overgangen. Volgens Witte et al. (2008) zullen grondwaterafhankelijke duinvaleien in de toekomst door hogere grondwaterstanden iets natter worden. Effecten daarvan op de vegetatie hangen onder andere af van de grootte en dynamiek van de kwelflux.



Figuur 2-1: Provisorische relatie tussen de droogtegraad van de bodem en het aandeel in de vegetatie aan vaatplanten, (korst)mossen en kale grond, ontleend aan Witte et al. (2008).

2.3 Aanvullende inzichten uit recenter werk

Tussen 2008 en nu is in diverse studies voortgebouwd op de bevindingen van Witte et al. (2008), waarbij nieuwe inzichten zijn opgedaan over droogtegraad en over het effect van mos en bodemvorming.

Bartholomeus et al. (2012) deden nader onderzoek naar droogtegraad en vegetatie op hellingen. Daarbij introduceerden zij een andere methode om de droogtegraad uit te drukken, de zogeheten 'droogtestress': het jaarlijkse maximale verschil tussen potentiële en werkelijke transpiratie gedurende een periode van tien dagen. Deze methode werd geacht beter recht te doen aan het effect van kortdurende extreme weersgebeurtenissen op

vegetatie dan het door Witte et al. (2008) beschreven potentiële vochttekort, dat meer gebaseerd is op een gemiddelde situatie. De studie stelde vast dat droogtestress een betere voorspeller is van het aandeel (korst)mossen in de vegetatie. Daarnaast werd een positieve relatie aangetoond tussen droogtestress het aandeel (korst)mossen.

Dat mossen en korstmossen andere verdampingseigenschappen hebben is door verschillende studies aangetoond en werd ook door Witte et al. (2008) besproken. In het licht van de voorspelde toename van mos in de vegetatie als gevolg van klimaatverandering en het effect daarvan op verdamping en grondwateraanvulling, is een correcte parametrisatie hiervan in hydrologische modellen belangrijk. Voortman et al. (2014) leidden bodemfysische eigenschappen en onverzadigde doorlatendheid af voor enkele mos- en korstmossoorten om een beeld te krijgen van de capillaire stroming door een (korst)moslaag tijdens het proces van verdamping. Uit laboratoriumproeven bleek de onverzadigde doorlatendheid van een laag (korst)mos verrassend laag, gezien de toch hoge porositeit. Dit werd in de studie verklaard door het feit dat mossen veel lucht vasthouden in de grote poriëruimten, waardoor grote poriën en ruimten niet meedoen aan het vochttransport tijdens het proces van verdamping. Tevens werd aangetoond dat mossen onder natte omstandigheden minder verdampen dan kaal zand, maar onder droge omstandigheden soms juist meer verdampen. Het precieze effect is mogelijk verschillend tussen een droog en nat klimaat.

Voortman et al. (2017) deden onderzoek naar het effect van bodemvorming, vegetatiesuccessie en (korst)mossen op de verdamping van duingraslanden. Op 36 locaties in Meijndel werden vegetatieopnamen gedaan en bodemopbouw en bodemfysische eigenschappen bepaald. De locaties werden in drie groepen verdeeld op basis van leeftijd (successie) van de duingraslanden. Werkelijke bodemverdamping en transpiratie per plot werd gesimuleerd met behulp van Hydrus 1D. Daarbij werd het effect van mos nagebootst door het als bodemlaagje voor te stellen met eerder afgeleide bodemfysische kenmerken. Uit de modelberekeningen volgde dat bodemvorming en vegetatiesuccessie leiden tot een hogere werkelijke verdamping (en dus een lagere grondwateraanvulling). Dit effect werd vooral veroorzaakt door bodemvorming en een daaraan gerelateerde toename van het watervasthoudend vermogen. Op jonge duinbodems kan een moslaag, afhankelijk van de soort mos, leiden tot zowel hogere als lagere verdamping dan op kaal zand. Op oudere bodems leidt de ontwikkeling van een moslaag vooral tot lagere bodemverdamping en meer transpiratie door vaatplanten. Hierbij is expliciet gecorrigeerd voor het effect van vaatplantbedekking. In het onderzoek werd geen duidelijke relatie aangetoond tussen hellingshoek/oriëntatie (i.e. verschillen in inkomende straling) en de werkelijke verdamping. Dit werd onder andere gekoppeld aan een lagere bedekking door vaatplanten. Deze bevinding wijkt enigszins af van die van Witte et al. (2008), die in de huidige situatie een iets hogere grondwateraanvulling vonden op noordhellingen dan op zuidhellingen. De auteurs verwachtten dat een toename van (korst)mossen het effect van klimaatverandering (drogere zomers) op de grondwateraanvulling kan dempen.

Aggenbach et al. (2020) deden onderzoek naar het effect van graasdruk door damherten op duingraslanden in de Luchterduinen, nabij de Amsterdamse Waterleidingduinen. Ze deden in 2018 en 2019 vegetatieopnamen op 18 locaties, zowel binnen als buiten omheiningen tegen begrazing, en verzamelden tevens bodemfysische eigenschappen. Met behulp van modellering in SWAP werd geprobeerd de invloed van verschillende factoren op de waterbeschikbaarheid te bepalen. Graasdruk door damherten zorgde voor een lagere bedekking van vaatplanten, maar had geen effect op de moslaag. Het effect van zeer droge jaren (2018, in mindere mate 2019) was merkbaar en had een groter effect op de berekende droogtestress dan de variatie in helling en expositie. Bovendien bleek er sprake van een na-ijleffect: vaatplantbedekking herstelt zich niet direct na enkele (zeer) droge jaren. Dit ondersteunt de stelling uit Bartholomeus et al. (2012) dat een methode op basis van (korter durende) extreme omstandigheden geschikter is om de droogtegraad uit te drukken.

2.4 KNMI Klimaatscenario's 2023

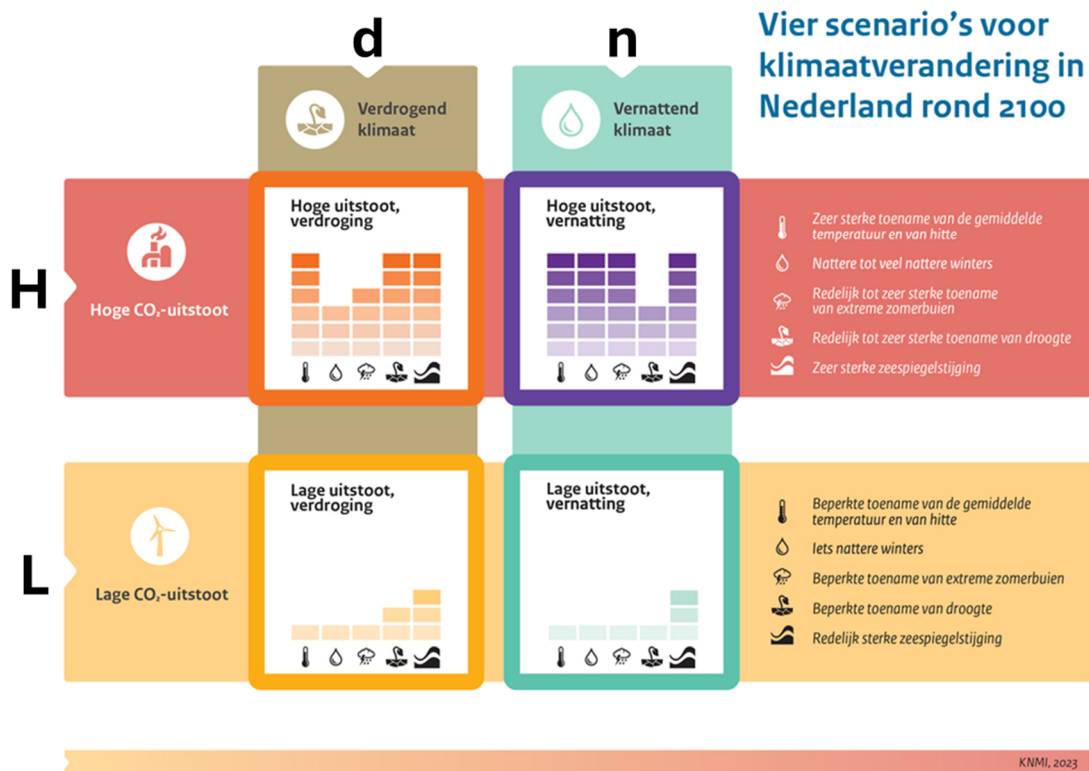
In 2023 zijn de nieuwe KNMI Klimaatscenario's gepubliceerd (KNMI, 2023). Uit de combinatie van twee CO₂-uitstootscenario's, Laag (L) en Hoog (H), met twee varianten voor de neerslagverandering in Nederland, nat (n) en

droog (d), zijn vier klimaatscenario's opgesteld voor 2050 en 2100: Ln, Ld, Hn en Hd (Figuur 2-2). Aangezien in het lage uitstootscenario (L) de mondiale opwarming rond 2050 stabiliseert rond 1,7°C, zijn de kenmerken van scenario's Ln en Ld gelijk voor de zichtjaren 2050 en 2100. Een belangrijke update ten opzichte van de vorige klimaatscenario's (2014) is dat de droogteproblematiek voor Nederland en omgeving beter in beeld is gebracht.

Cirkel en Aggenbach (2024) hebben een literatuurstudie uitgevoerd naar de gevolgen van zeespiegelstijging en klimaatverandering op de waterhuishouding in het duin, waarin onder andere de inzichten uit de nieuwe klimaatscenario's worden behandeld. Hun belangrijkste conclusies ten aanzien van neerslag, verdamping en grondwateraanvulling zijn hieronder opgesomd:

- Op basis van observaties (o.a. stations Vlissingen en Den Helder, maar ook lokale stations) wordt geconcludeerd dat de neerslag in de kustgebieden de afgelopen decennia is toegenomen, zowel in de winter als in de zomer. Dit sluit het beste aan bij KNMI'23 klimaatscenario Hn, hoewel de trend in de observaties natter is dan in het landelijke scenario;
- De neerslag in de winter neemt sterk toe. Neerslag in de zomer zal vaker voorkomen in de vorm van zware buien;
- De referentieverdamping neemt toe langs de kust, maar minder dan in het binnenland;
- Het potentiële neerslagoverschot blijft minimaal gelijk of neemt toe;
- In het algemeen is sprake van een vernattende trend in de duinen, als gevolg van de combinatie van een toename van de neerslag, een mogelijke afname van de werkelijke verdamping en een stijgende zeespiegel. Uit langjarige meetreeksen blijkt dat de door Witte et al. (2008) voorspelde hogere grondwaterstand in de duinen inmiddels werkelijkheid is geworden;
- De uitwerking van de vernattende trend op de verschillende landschapsonderdelen is echter verschillend. Lage delen (duinvalleien) zullen waarschijnlijk vernatten, terwijl grondwateronafhankelijke delen sterker zullen worden beïnvloed door de mate waarin de vegetatie droogtestress ervaart.

Een belangrijke vaststelling is dat we inmiddels wel rekening moeten houden met het feit dat klimaatverandering in de kustgebieden anders verloopt dan in het binnenland, dit in tegenstelling tot wat uit de eerdere klimaatscenario's volgde en ook door Witte et al. (2008) als uitgangspunt werd gehanteerd. In hoofdstuk 4 gaan we hier nog kort op in op basis van meetreeksen van klimaatscenario's.



Figuur 2-2: Vier scenario's voor klimaatverandering in Nederland (ontleend aan KNMI, 2023)

3 Empirische relatie tussen droogtegraad en bedekking

3.1 Methode

Voor het opstellen van een empirische relatie tussen droogtegraad en bedekking hebben we grotendeels de werkwijze van Witte et al. (2008) gevolgd (zie paragraaf 3.3 in dat rapport). Uit de gebruikte dataset hebben we 37 locaties met vegetatieopnamen en bodemeigenschappen geselecteerd. De SWAP-modelresultaten zijn vrijwel ongewijzigd gebruikt (van vijf locaties bleken de resultaten niet reproduceerbaar of anderszins niet bruikbaar). We hebben geen extra punt voor kaal zand toegevoegd, zoals in Witte et al. 2008 wel is gedaan. Vervolgens hebben we de dataset aangevuld met locaties uit twee andere studies waarvoor vegetatieopnamen en bodemeigenschappen beschikbaar waren:

- 35 locaties in Meijndel, verzameld in 2014 (Voortman et al., 2017);
- 18 locaties binnen omheiningen in de Luchterduinen, verzameld in 2019 (Aggenbach et al., 2020).

Voor de locaties in de Luchterduinen waren eveneens simulaties van de vochthuishouding uit SWAP-modellen beschikbaar, waarbij net als in Witte et al. (2008) gebruik was gemaakt van een standaardgewas. Dit betekent dat we de resultaten direct kunnen gebruiken voor het opstellen van de empirische relatie. De vochthuishouding op de oorspronkelijke 36 locaties in Meijndel was door Voortman et al. (2017) berekend met het model Hydrus 1D, waarbij bovendien was gerekend met de werkelijke bedekkingsgraad van de vegetatie ter plaatse. Om de dataset bruikbaar te maken voor onze studie, hebben we voor alle locaties SWAP-modellen opgezet met een standaardgewas om de vochthuishouding en droogtegraad opnieuw te berekenen. Waar mogelijk hebben we gebruik gemaakt van de bodemfysische eigenschappen uit de Hydrus-modellen. Het gebruik van exact dezelfde bodemfysische eigenschappen (Mualem-van Genuchten-functies) leverde enige numerieke instabiliteit in de SWAP-berekeningen op, waardoor we genooddaakt waren om op basis van expertoordeel enkele kleine aanpassingen in een aantal parameters te doen. Uiteindelijk lukte het om voor 35 locaties de modellen succesvol door te rekenen.

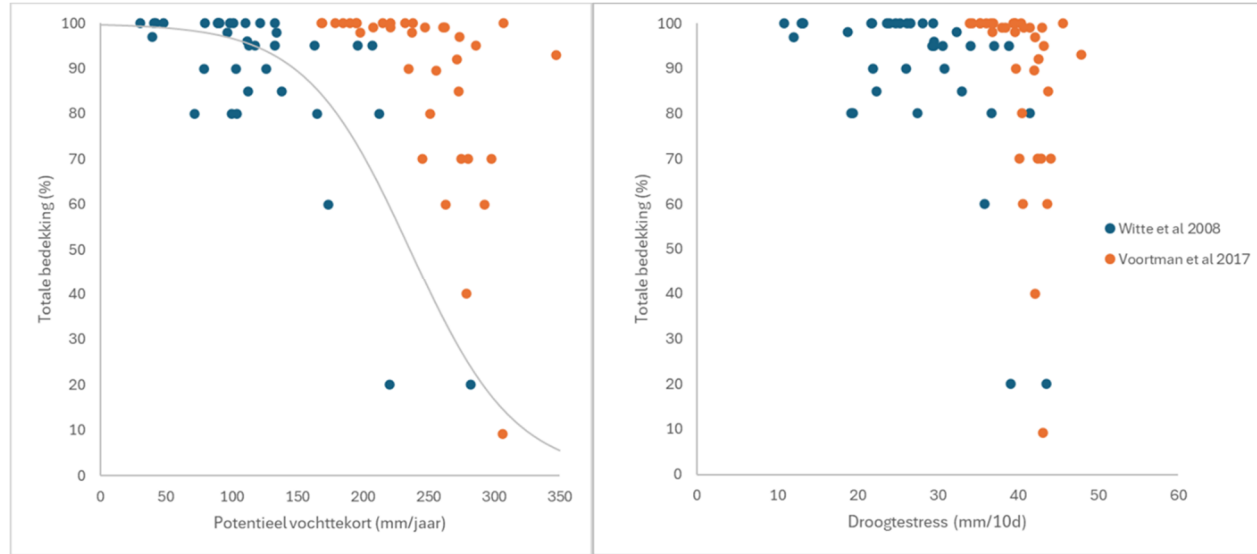
Voor het bepalen van de droogtegraad hebben we gebruik gemaakt van zowel het potentieel vochttekort (Witte et al., 2008) als de tiendaagse droogtestress (Bartholomeus et al., 2012). Ter verkenning van het effect van droge jaren op de bedekkingsgraad hebben we het potentieel vochttekort berekend voor verschillende ‘aanloopperiodes’ tot aan het moment van vegetatieopname: drie, vijf, tien en 30 jaar (klimaatperiode). Voor een aantal modellen, waaronder de dataset uit Voortman et al. (2017), was de klimaatperiode iets korter (27 jaar) vanwege de beschikbaarheid van meteorologische gegevens. Witte et al. (2008) heeft totale bedekking (vaatplanten en (korst)mossen) gebruikt als maat voor de toestand voor de vegetatie, maar hebben ook kort het gebruik van bedekking van enkel vaatplanten (kruiden) besproken. In de huidige studie gebruiken we beide bedekkingsgraden om te bepalen welke methode het meest bruikbaar is. Voor het afleiden van de empirische relatie hebben we door de punten van de drie gecombineerde datasets een sigmoïde gefit met asymptoten 100 (geen vochttekort, volledige (vaatplant)bedekking) en 0 (extreem droog, geen (vaatplant)bedekking).

3.2 Droogtegraad en totale bedekking

Wanneer we de opnames uit Meijndel (Voortman et al., 2017) toevoegen aan de originele dataset van Witte et al. (2008), zorgt dit in het geval van totale bedekkingsgraad hoofdzakelijk voor een horizontale verschuiving in de puntenwolk (Figuur 3-1), zowel bij het potentieel vochttekort als bij de droogtestress. Nog steeds is een lage bedekkingsgraad ondervertegenwoordigd en is geen duidelijke relatie af te leiden. Wel valt met name in geval van de droogtestress op dat er een soort verticale grens ligt tussen 45 en 50 mm/10 dagen. We hebben de dataset uit de Luchterduinen (Aggenbach et al., 2020) niet kunnen toevoegen, aangezien hier een andere manier van bepalen

van de bedekkingsgraad lijkt te zijn toegepast. De som van bedekking van vaatplanten en mossen is regelmatig hoger dan 100%, terwijl dit bij de andere datasets niet het geval is.

De oorzaak van de horizontale verschuiving hebben we in deze studie niet exact kunnen achterhalen, maar kan waarschijnlijk het best worden verklaard door het aantal droge jaren in de recente dataset en de hoge mosbedekking die daarin voorkomt. De vaatplantbedekking lijkt na de opeenvolgende droge jaren deels te zijn vervangen door mos. De dataset bevat echter geen datapunten met een dusdanig extreme droogtegraad dat ook de mosbedekking weer afneemt. We stellen vast dat het gebruik van totale bedekking niet heel geschikt is voor het afleiden van een relatie met droogte.



Figuur 3-1: Relatie tussen de totale bedekking van de vegetatie en droogtegraad, waarbij de dataset van Voortman et al. (2017) is toegevoegd aan die van Witte et al. (2008). Links: bedekking versus potentieel vochttekort TK, waarbij de originele sigmoïde ter indicatie is weergegeven; rechts: bedekking versus droogtestress TS.

3.3 Droogtegraad en vaatplantbedekking

Het toevoegen van vegetatieopnamen uit Meijendel en Luchterduinen levert een aanzienlijk betere vertegenwoordiging op voor de lage bedekkingsgraad van vaatplanten (Figuur 3-2). Wel valt op dat de verschillende datasets nog steeds geclusterd liggen, hoewel de data van Meijendel en Luchterduinen gedeeltelijk overlappen. De eerder afgeleide vergelijking voor de empirische relatie tussen potentieel vochttekort en vaatplantbedekking blijkt de gecombineerde dataset al vrij goed te beschrijven. We concluderen dat de methode uit Witte et al. (2008) nog steeds geschikt is om de relatie tussen droogte en bedekking te beschrijven en om hiermee de bedekkingsgraad onder toekomstige klimaatomstandigheden te benaderen, mits hiervoor de vaatplantbedekking wordt gebruikt. In het vervolg van de studie zullen we daarom gebruik maken van vaatplantbedekking. Met het toevoegen van de extra datasets hebben we de relatie verder kunnen verfijnen:

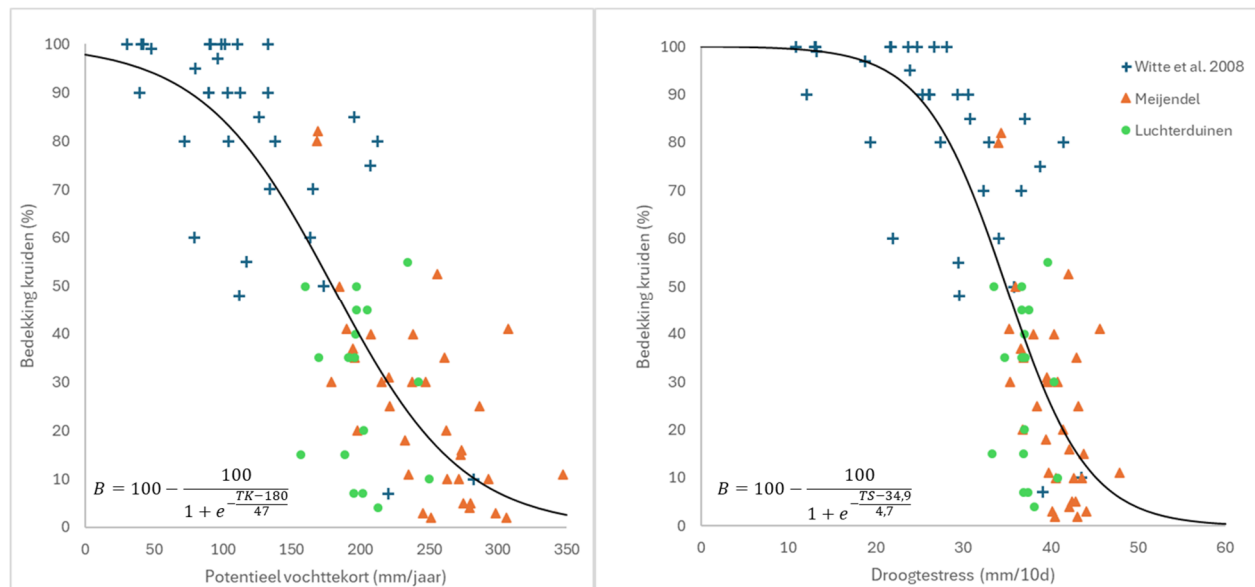
$$B_{\text{huidig}} = 100 - \frac{100}{1 + e^{-\frac{TK_{\text{huidig}} - 180}{47}}} \quad [3.1]$$

De toekomstige bedekking kan vervolgens worden geschreven als een functie van de huidige bedekking en de toename van het potentieel vochttekort:

$$B_{\text{toekomst}} = 100 - \frac{100}{1 + \left(\frac{100}{100 - B_{\text{huidig}}} - 1 \right) e^{-\frac{\Delta TK}{47}}} \quad [3.2]$$

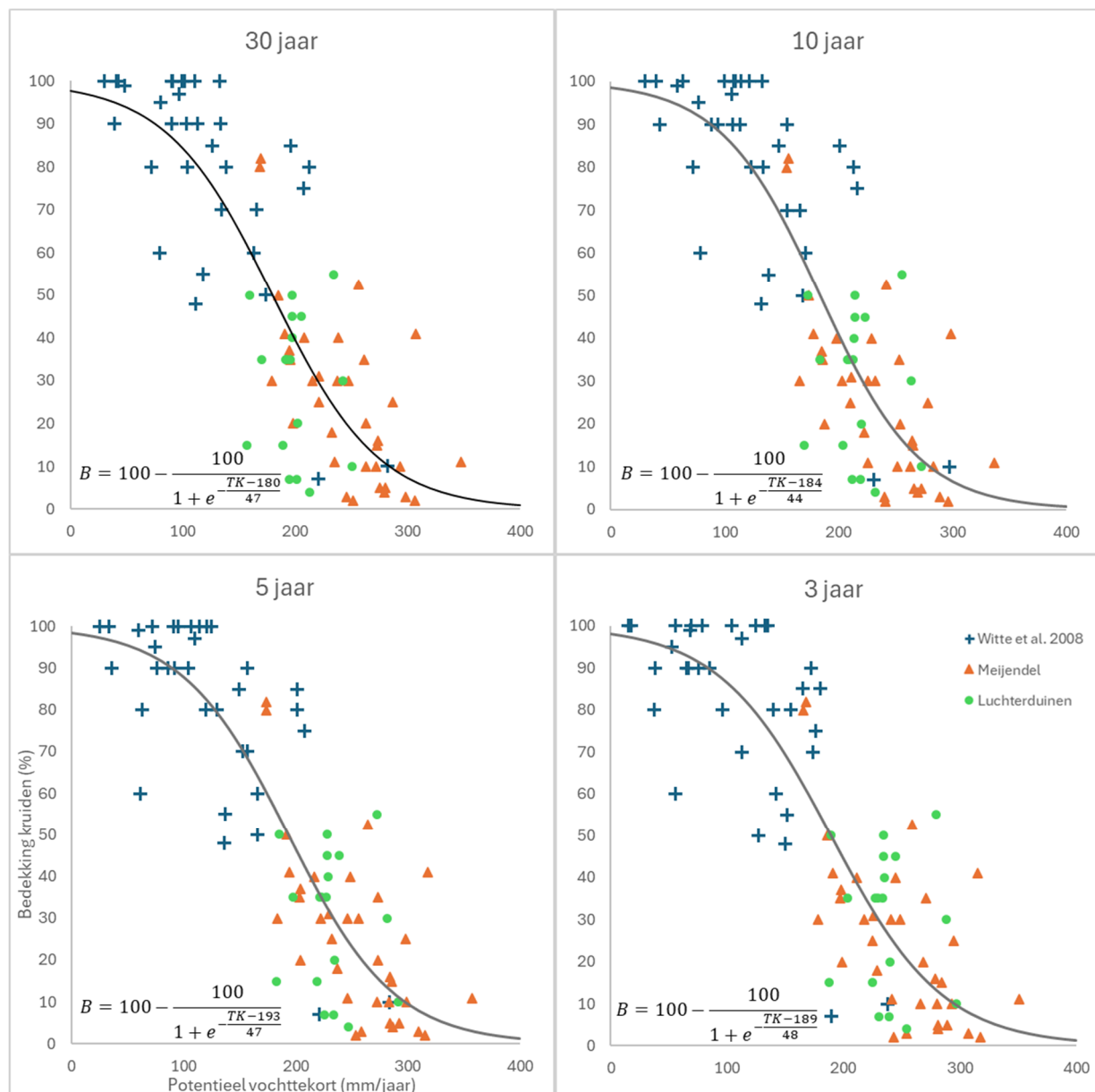
We hebben eveneens een empirische relatie afgeleid tussen droogtestress TS en vaatplantbedekking (Figuur 3-2, rechter paneel). Uit verdere analyses bleek dat de afgeleide relatie behoorlijk steil is. Door dit steile verloop worden

in een bepaald deel van de grafiek voor kleine veranderingen van TS zeer grote verschillen in de toekomstige bedekking berekend. Daarnaast wijkt de range waarin het steile deel zich bevindt iets af van de eerdere studie. Door deze gevoeligheden geven we de voorkeur aan een empirische relatie met een minder steil verloop, zodat de berekeningen van de toekomstige bedekking minder gevoelig zijn voor kleine fouten in de droogtegraad. We hebben daarom besloten om in de verdere analyses alleen het potentieel vochttekort TK te gebruiken als methode om de droogtegraad te bepalen. Hierdoor zijn de resultaten bovendien beter te vergelijken met de studie uit 2008.



Figuur 3-2: Relatie tussen vaatplantbedekking en droogtegraad, inclusief de afgeleide relaties, waarbij de datasets van Meijndel (Voortman et al., 2017) en Luchterduinen (Aggenbach et al., 2020) zijn toegevoegd aan die van Witte et al. (2008). Links: bedekking versus potentieel vochttekort TK ; rechts: bedekking versus droogtestress TS .

Aggenbach et al. (2020) hebben vastgesteld dat extreme weersomstandigheden zoals zeer droge zomers doorwerken op de vegetatiebedekking in de jaren erop. We hebben daarom kort onderzocht hoe sterk de empirische relatie wordt beïnvloed door de lengte van de periode voorafgaand aan een vegetatieopname waarover de droogtegraad wordt berekend. We hebben daarom de droogtegraad berekend over periodes van drie, vijf, tien en 30 jaar en hiermee de relatie opnieuw afgeleid (Figuur 3-3). Hieruit blijkt dat de lengte van de aanlooperperiode de empirische relatie wel enigszins beïnvloedt, maar dat het verschil niet groot is. We hebben daarom besloten om bij de verdere analyses in Hoofdstuk 4 vast te houden aan het gebruik van een lange aanlooperperiode, ook aangezien dit bij het gebruik van klimaatreeksen in plaats van getransformeerde meetreeksen beter te verantwoorden is. Niettemin is dit een aandachtspunt bij het interpreteren van de resultaten in Hoofdstuk 4.

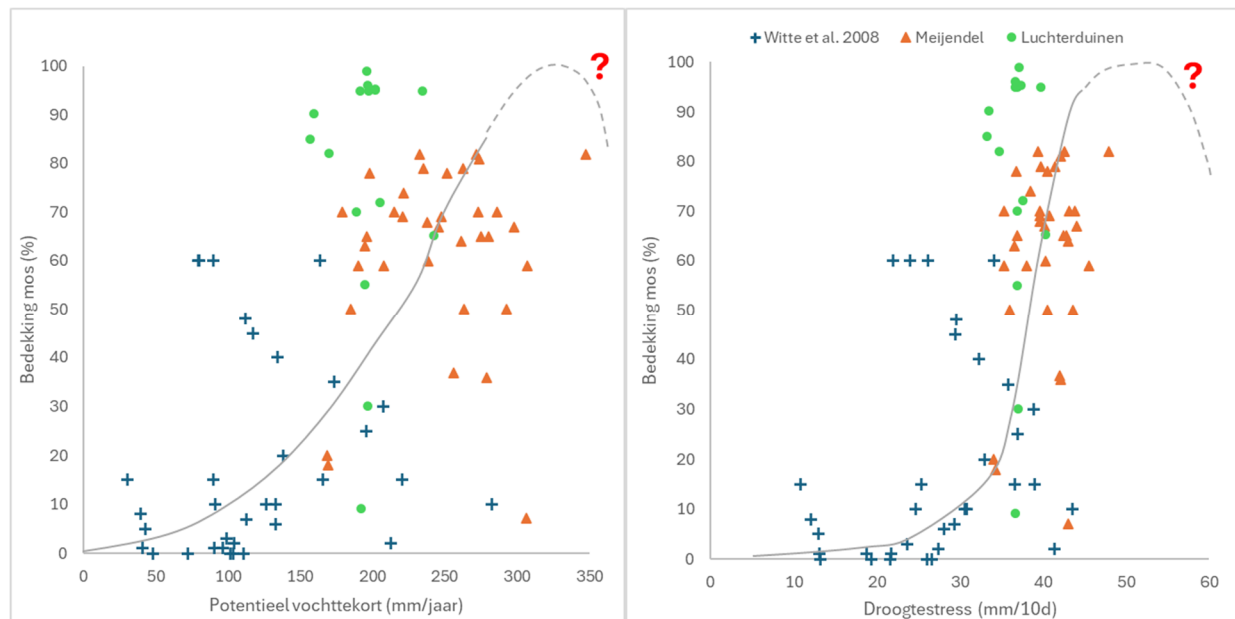


Figuur 3-3: Relatie tussen vaatplantbedekking en potentieel vochttekort TK, waarbij het potentieel vochttekort is berekend over aanlooperperiodes van drie, vijf, tien en 30 jaar.

3.4 Relatie tussen droogtegraad en mosbedekking

Witte et al. (2008) vonden op basis van de beschikbare data een positieve relatie tussen potentieel vochttekort en de bedekkingsgraad van (korst)mossen. Na het toevoegen van de vegetatieopnamen uit Meijndel en de Luchterduinen blijkt er nog steeds een positieve relatie te bestaan (Figuur 3-4). Evenals in geval van vaatplantbedekking liggen de opnamen uit de verschillende datasets sterk geclusterd. Met name in het geval van potentieel vochttekort TK (linker paneel) is de spreiding van de punten groot, zodat hooguit een positieve trend zichtbaar is. In geval van droogtestress (rechter paneel) lijkt eerder sprake van een exponentiële relatie met een verticale grens rond 45-50 mm/10 dagen. Onze hypothese is dat bij een extreem hoge droogtegraad de bedekking van mos uiteindelijk ook weer naar 0 zal gaan en er dus meer kaal zand zal ontstaan (de situatie van een woestijn). De relatie tussen mosbedekking en droogtegraad zal dus niet oneindig positief kunnen zijn (geïllustreerd met de gestippelde 'curve'). Geen van de drie datasets bevat echter opnamen op locaties die zo droog zijn dat ook de

(korst)mosbedekking zeer laag is, wat betekent dat deze extreme droogtegraad niet vertegenwoordigd is in de empirische relatie. Recente veldwaarnemingen in het Nederlandse duingebied lijken echter wel in die richting te wijzen (ontstaan van meer kaal zand); bovendien zijn in duingebieden ter hoogte van Bordeaux (Zuidwest-Frankrijk) dezelfde observaties gedaan (*pers. med.* C. Aggenbach). Er lijkt meer onderzoek nodig om de relatie tussen mosbedekking en droogtegraad nader te kunnen kwantificeren, gezien de in hoofdstuk 2 geschetste hydrologische effecten van deze laag op de verdamping.



Figuur 3-4: Relatie tussen (korst)mosbedekking en droogtegraad, waarbij de datasets van Meijndel (Voortman et al., 2017) en Luchterduinen (Aggenbach et al., 2020) zijn toegevoegd aan die van Witte et al. (2008). Links: bedekking versus potentieel vochtttekort TK; rechts: bedekking versus droogtestress TS. De grijze (stippel)lijnen zijn niet berekend, maar ter illustratie toegevoegd om de (verwachte) relatie te visualiseren.

4 Extrapolatie naar toekomstig klimaat

4.1 Methode

Om een beeld te krijgen van de effecten van klimaatverandering op toekomstige vegetatiebedekking en grondwataeraanvulling, hebben we een reeks SWAP-modellen doorgerekend voor drie representatieve, fictieve duinlocaties, analoog aan de methode in Witte et al. (2008). Het gaat om een duintop (horizontaal), een noordhelling en een zuidhelling. Daarbij hebben we globaal de volgende stappen doorlopen:

- 1 Per representatieve locatie zijn in SWAP het referentiescenario (huidige situatie) en klimaatscenario's doorgerekend voor een volledig gesloten korte grasmat (referentiegewas). Qua bodemopbouw (duinvaaggrond) is aangesloten bij de modellen uit Witte et al. (2008). Voor de toekomstige situatie hebben we zes klimaatscenario's doorgerekend: Ln₂₀₅₀, Ld₂₀₅₀, Hn₂₀₅₀, Hd₂₀₅₀, Hn₂₁₀₀ en Hd₂₁₀₀. In totaal gaat het om $3 \times (1+6) = 21$ modellen.
Voor meteorologische invoer hebben we gebruik gemaakt van representatieve klimaatreeksen van neerslag en referentiegewasverdamping (van den Brink & de Valk, 2023) in plaats van (getransformeerde) tijdreeksen van observaties. De referentiegewasverdamping voor alle klimaatscenario's is gecorrigeerd met een CO₂-correctiefactor van 0,97, zoals voorgesteld door Witte et al. (2008). Tevens hebben we de verdampingsreeksen voor de noord- en zuidhelling gecorrigeerd met respectievelijk een factor 0,86 en 1,1 (Witte et al., 2008). De correctiefactor voor de noordhelling wijkt iets af van door Witte et al. (2008) is gebruikt en is gebaseerd op een langjarige correctiefactor die is berekend op basis van gegevens van station Valkenburg voor de periode 1988-2014. Directe correctie van de neerslagreeksen voor hellingshoek en expositie (de Lima, 1990; Bartholomeus et al., 2012) bleek niet mogelijk, aangezien de benodigde informatie over de windrichting niet in de klimaatreeksen is opgenomen. Om toch het effect van hellingshoek en expositie voor verschillen in neerslag mee te nemen, hebben we deze factoren eveneens afgeleid uit meetgegevens (1988-2014) van station Valkenburg. De afgeleide correctiefactoren zijn 1,02 voor de zuidhelling en 0,87 voor de noordhelling. We gaan er dus van uit dat de windrichting in de toekomst grosso modo gelijk verdeeld blijft. Het is belangrijk te beseffen dat Witte et al. (2008) geen correctiefactor voor de neerslag hebben toegepast.
- 2 Uit de modelresultaten voor alle locaties en klimaatscenario's hebben we het potentieel vochttekort berekend over de gehele modelperiode van drie maal 30 jaar¹ rond 2050 en 2100. Voor elk toekomstscenario hebben we tevens het verschil in potentieel vochttekort met het referentiescenario berekend.
- 3 Met behulp van de empirische relatie [3.1] hebben we het voor de drie representatieve locaties (duintop, noordhelling en zuidhelling) de bedekking in het referentiescenario afgeleid.
- 4 De berekende verschillen in potentieel vochttekort voor de toekomstscenario's (stap 2) en de bedekking in het referentiescenario (stap 3) hebben we ingevuld in vergelijking [3.2] om per toekomstscenario de bedekking af te leiden.
- 5 De 21 modellen uit stap 1 zijn vervolgens nogmaals doorgerekend, maar dan met de afgeleide bedekking, waarbij de overige 'gewaseigenschappen' gelijk zijn gehouden aan de eerdere berekeningen met het

¹ Een aandachtspunt bij het gebruik van representatieve klimaatreeksen is dat voor ieder klimaatscenario acht maal een representatieve reeks van 30 jaar is geproduceerd, die onderling aanzienlijk kunnen verschillen. Voor een keuze uit de ensembles sluiten we aan bij de methode die is gekozen voor het berekenen van de Basisprognoses voor de nieuwste Deltascenario's Janssen, G., America-van den Heuvel, I., Meeusen, R., van Strien, C., Prinsen, G., Mes, E., Marth, I., Weiler, O., & Bijlsma, A. (2024). *Vertaling van de Deltascenario's 2024 naar invoer voor het Nationaal Water Model*. Deltares. De Deltascenario's zijn doorgerekend op basis van een combinatie van drie van de acht varianten, dus voor een periode van $3 \times 30 = 90$ jaar. Voor onze modelberekeningen hebben we dezelfde ensembles geselecteerd als worden genoemd in ibid. bij de desbetreffende klimaatscenario's.

standaardgewas voor het referentiescenario (stap 3) en de toekomstscenario's (stap 4). Zo hebben we voor alle modellen de grondwateraanvulling per jaar berekend (neerslag minus de berekende werkelijke verdamping).

4.2 KNMI'23 Klimaatscenario's en potentieel neerslagoverschot

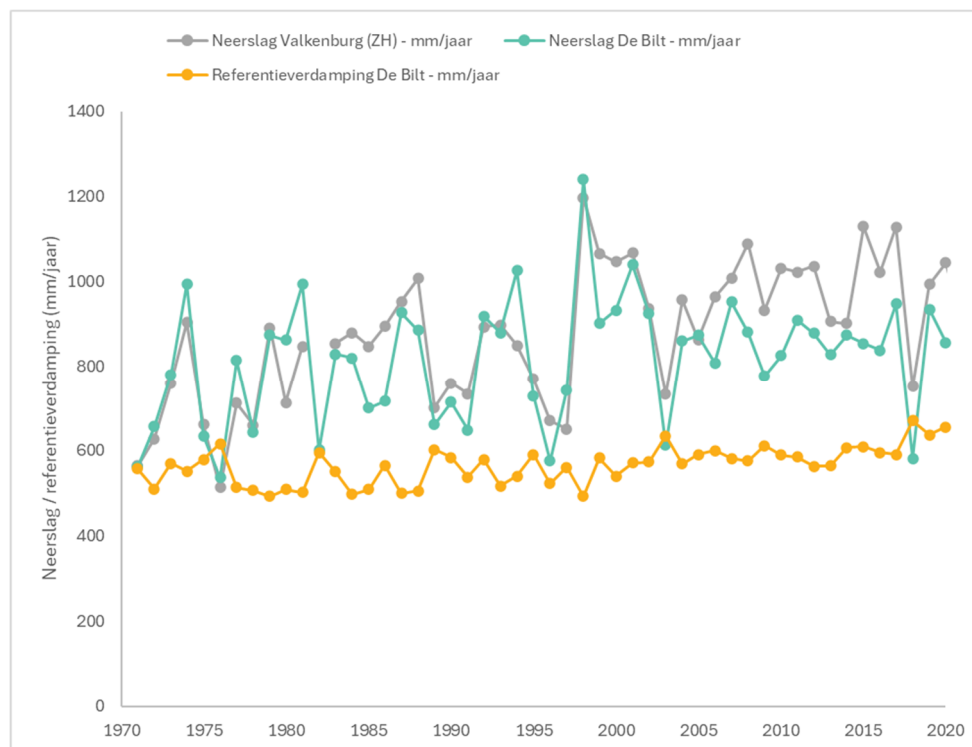
De nieuwste KNMI Klimaatscenario's voorspellen dat in de duinstreek de hoeveelheid neerslag op jaarbasis kan toenemen of afnemen, met de grootste toename in het scenario Hn₂₁₀₀ en de grootste afname in Hd₂₁₀₀. De neerslag in de winter neemt in alle scenario's toe, ook in de droge varianten, terwijl de zomerneerslag in alle scenario's afneemt. De referentieverdamping neemt in alle scenario's toe ten opzichte van de referentieperiode. Netto betekent dit dat het potentiële neerslagoverschot in de meeste scenario's afneemt, behalve in scenario Hn. De afname in Hd₂₁₀₀ is volgens de KNMI-scenario's ongeveer 40%.

Tabel 4-1: Het potentiële neerslagoverschot in de Hollandse duinen voor het referentiescenario en de verschillende klimaatscenario's van het KNMI. Voor zomer (juni-augustus), winter (december-februari) en het hele jaar zijn gegeven: neerslag P, referentieverdamping ET_{ref}, potentieel neerslagoverschot P-ET_{ref} en verandering van het potentiële neerslagoverschot ten opzichte van het referentiescenario, Δ(P-ET_{ref}). De getallen zijn gebaseerd op 3x30 jaar klimaatreeksen rond de zichtjaren 2050 en 2100 uit de KNMI'23 Klimaatscenario's.

Scenario							
		2050				2100	
	Referentie	Ln	Ld	Hn	Hd	Hn	Hd
P (mm)							
Zomer	256	242	218	231	215	216	165
Winter	240	246	246	280	249	292	272
Jaar	941	951	933	980	914	1013	909
ET_{ref} (mm)							
Zomer	292	304	310	308	313	323	346
Winter	33	36	37	35	36	38	38
Jaar	615	648	655	646	656	680	711
P-ET_{ref} (mm)							
Zomer	-36	-62	-92	-77	-98	-108	-180
Winter	206	210	209	244	213	255	233
Jaar	325	303	278	334	258	333	198
Δ(P-ET_{ref}) (%)							
Zomer		-74	-157	-115	-174	-200	-402
Winter		2	1	18	3	23	13
Jaar		-7	-15	3	-21	2	-39

Uit neerslagmetingen op de KNMI-stations Valkenburg en De Bilt valt op te maken dat het de afgelopen decennia gestaag natter is geworden (Figuur 4-1). Deze stijging is hoger aan de kust (Valkenburg) dan in het binnenland (De Bilt) (Philip et al., 2020; Cirkel & Aggenbach, 2024). Met name sinds het begin van deze eeuw ligt de jaarlijkse neerslag op station Valkenburg systematisch hoger dan op De Bilt, terwijl dat aan het eind van de vorige eeuw nog wel eens verschilde. Uit de analyse van de verschillende klimaatperiodes (Tabel 4-2) valt op te maken dat station Valkenburg altijd al iets natter was dan De Bilt, maar dat dit verschil de laatste decennia groter is geworden. De toename van klimaatperiode 1971-2000 (811 mm) naar 1991-2020 (943 mm) betreft op Valkenburg maar liefst 16%. Dit betekent ook dat sinds de studie van Witte et al. (2008) de hoeveelheid neerslag in de duinen aanzienlijk is toegenomen. In de vorige studie werd nog gerekend met een jaarlijkse neerslag van ongeveer 800 mm, gebaseerd

op metingen tussen 1960 en 2006. De referentieverdamping op De Bilt is de afgelopen decennia ook toegenomen, zij het minder snel, met een stijging van 7% tussen 1971-2000 en 1991-2020. Dit alles betekent dat het potentiële neerslagoverschot sinds de vorige studie is toegenomen.



Figuur 4-1: Jaarlijkse neerslag op weerstations Valkenburg en De Bilt en jaarlijkse referentieverdamping op station De Bilt gedurende periode 1971-2020

Tabel 4-2: Gemiddelde jaarlijkse neerslag en referentieverdamping op weerstations Valkenburg en De Bilt gedurende drie klimaatperiodes. Tussen haakjes de verschillen met de voorgaande klimaatperiode.

Klimaatperiode	Neerslag Valkenburg (mm)	Neerslag De Bilt (mm)	Referentieverdamping De Bilt (mm)
1971-2000	811	793	543
1981-2010	900 (+89)	833 (+40)	559 (+16)
1991-2020	943 (+43)	855 (+22)	581 (+22)

4.3 Resultaten

4.3.1 Toekomstige bedekking en grondwateraanvulling

De resultaten van de SWAP-berekeningen voor de toekomstige grondwateraanvulling zijn samengevat in Tabel 4-3. De resultaten zijn tevens grafisch weergegeven in Figuur 4-2 t/m Figuur 4-4.

Het potentiële vochttekort TK is in de referentiesituatie het hoogst op de zuidhelling (177 mm/jaar) en het laagst op de noordhelling (113 mm/jaar). TK neemt op alle plots onder alle klimaatscenario's toe (Figuur 4-2). Het patroon van toename is vergelijkbaar tussen de plots, maar de toename is relatief het grootst op de noordhelling, met een toename van maar liefst 86% in de droge variant Hd_{2100} . Zelfs in de natte variant Hn_{2100} wordt een toename van het potentiële vochttekort van 44% berekend.

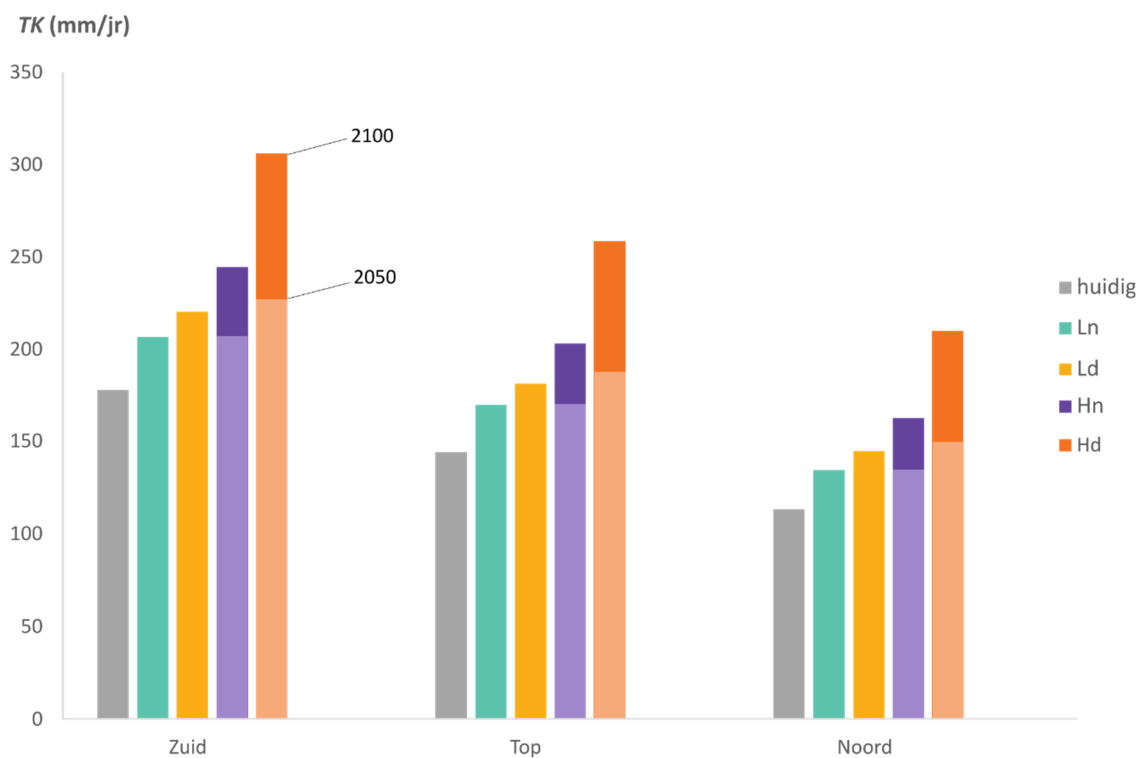
De vaatplantbedekking is in de referentiesituatie het laagst op de zuidhelling (51%) en het hoogst op noordhelling (80%). Onder alle klimaatscenario's wordt een afname van de vaatplantbedekking verwacht (Figuur 4-3). De grootste afname wordt berekend voor Hd₂₁₀₀, waarbij de bedekking van vaatplanten op de zuidhelling afneemt tot slechts 6%. Op de noordhelling is de afname geringer, maar neemt de bedekking nog steeds af tot 34% onder Hd₂₁₀₀.

De berekende grondwateraanvulling (Figuur 4-4) is in de referentiesituatie het hoogst op de zuidhelling (490 mm) en het laagst op de noordhelling (390 mm). Het verschil tussen noord- en zuidhelling was in de studie van Witte et al. (2008) juist andersom (hogere aanvulling op de noordhelling), hoewel de verschillen tussen de plots kleiner waren. Het verschil tussen beide studies wordt met name veroorzaakt doordat in de eerdere studie geen neerslagcorrectie voor de hellingen is toegepast. In het algemeen is de berekende grondwateraanvulling in de huidige studie aanmerkelijk hoger dan in de vorige studie, tot wel 100 mm/jaar. De grondwateraanvulling neemt op alle drie de plots onder alle klimaatscenario's toe, waar dit in de vorige studie nog voornamelijk op de zuidhelling was vastgesteld. De toename van de grondwateraanvulling lijkt aanvankelijk (zichtjaar 2050) nog beperkt. Echter, we zien voor het zichtjaar 2100 een opvallende toename van rond de 30%. Dit lijkt te maken te hebben met de sterk afgenomen bedekking van vaatplanten en een toename van het berekende percentage kaal zand. Er treedt weinig verschil op tussen de natte en droge variant van het H-scenario in 2100. Dit is opvallend, want de verschillen in potentieel neerslagoverschot tussen deze varianten is aanzienlijk (resp. 333 en 198 mm/jaar, zie Tabel 4-1). Sowieso volgt uit de berekeningen dat in een natte duinvallei, waar de grondwateraanvulling gelijk is aan het potentiële neerslagoverschot, de grondwateraanvulling in alle scenario's afneemt behalve in scenario Hn. De sterkste afname treedt op onder Hd₂₁₀₀ (39%). Samengevat betekent dit dat de hydrologische effecten van klimaatverandering in het duingebied behoorlijk kunnen verschillen per locatie en op de langere termijn worden uitvergroot.

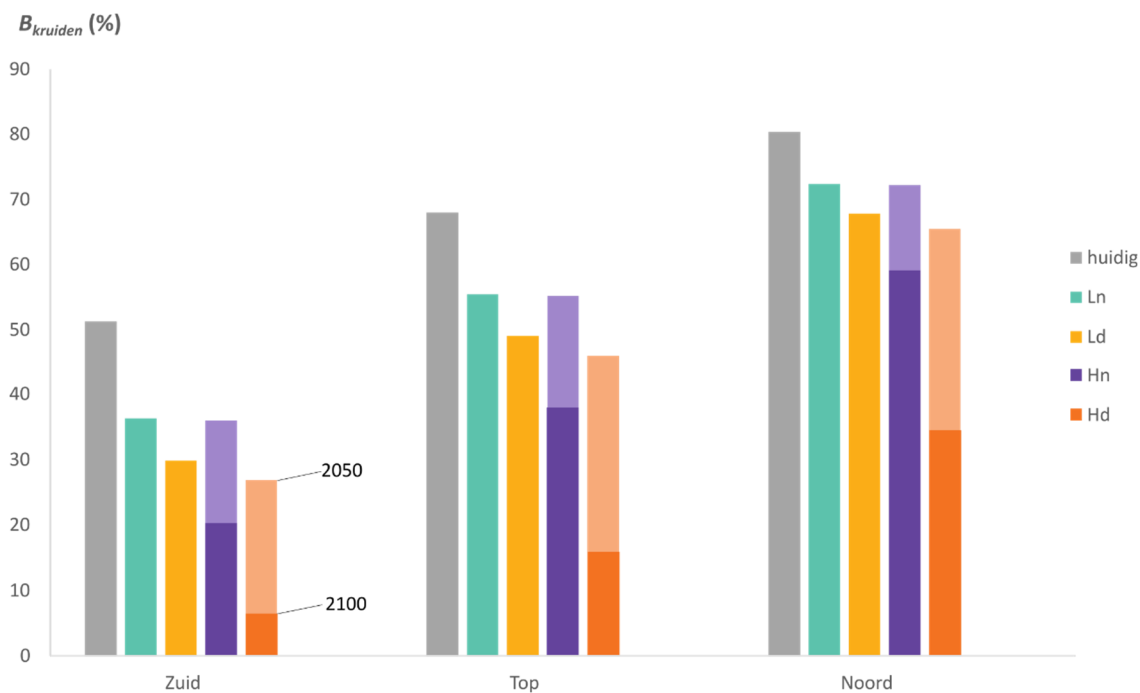
Tabel 4-3: Berekende potentieel vochttekort TK, vaatplantbedekking B en grondwateraanvulling R voor een fictieve zuidhelling, duintop en noordhelling. De procentuele veranderingen in potentieel vochttekort en grondwateraanvulling ten opzichte van de referentiesituatie zijn cursief weergegeven.

Scenario							
	Referentie	2050				2100	
		Ln	Ld	Hn	Hd	Hn	Hd
Zuid							
TK (mm/jr)	177	207	220	207	227	245	306
ΔTK (mm/jr)		29	43	30	50	67	129
ΔTK (%)		16	24	17	28	38	72
B (%)	51	36	30	36	27	20	6
R (mm/jr)	490	532	533	561	530	651	635
ΔR (%)		9	9	14	8	33	30
Top							
TK (mm/jr)	144	170	182	170	188	203	259
ΔTK (mm/jr)		25	37	26	44	59	115
ΔTK (%)		18	26	18	30	41	79
B (%)	68	55	49	55	46	38	16
R (mm/jr)	470	493	489	523	481	591	577
ΔR (%)		5	4	11	2	26	23
Noord							
TK (mm/jr)	113	134	145	135	149	162	210

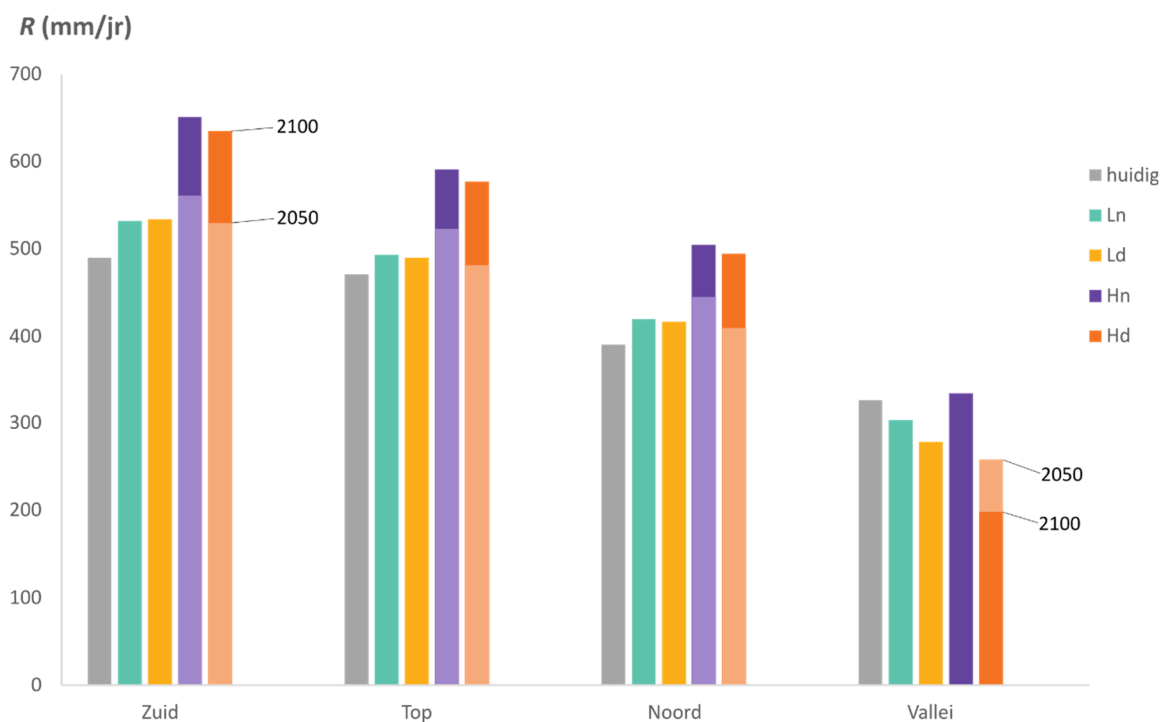
ΔTK (mm/jr)		21	31	22	36	49	97
ΔTK (%)		19	28	19	32	44	86
B (%)	80	72	68	72	65	59	34
R (mm/jr)	390	420	416	445	409	505	494
ΔR (%)		8	7	14	5	29	27
Vallei							
R (mm/jr)	325	303	278	334	258	333	198
ΔR (%)		-7	-15	3	-21	2	-39



Figuur 4-2: Potentieel vochttekort TK op de drie plots (zuidhelling, top, noordhelling) voor de huidige situatie en de klimaatscenario's. Voor de scenario's Hn en Hd is zowel het zichtjaar 2050 (licht) als 2100 (donker) weergegeven; binnen de scenario's Ln en Ld zijn de zichtjaren identiek.



Figuur 4-3: Berekende vaatplantbedekking op de drie plots (zuidhelling, top, noordhelling) voor de huidige situatie en de klimaatscenario's. Voor de scenario's Hn en Hd is zowel het zichtjaar 2050 (licht) als 2100 (donker) weergegeven; binnen de scenario's Ln en Ld zijn de zichtjaren identiek.



Figuur 4-4: Grondwateraanvulling R op de drie plots (zuidhelling, top, noordhelling) en een natte duinvallei, voor de huidige situatie en de klimaatscenario's. Voor de scenario's Hn en Hd is zowel het zichtjaar 2050 (licht) als 2100 (donker) weergegeven; binnen de scenario's Ln en Ld zijn de zichtjaren identiek.

4.3.2 Correctiefactor voor toekomstig klimaat

De grondwatermodellen van de duinwaterbedrijven houden bij het berekenen van de toekomstige grondwateraanvulling geen rekening met terugkoppelingen van de vegetatie op het klimaat. Hierdoor zal de berekende grondwateraanvulling lager uitvallen dan waarschijnlijk het geval zal zijn. Op basis van onze modelberekeningen hebben we factoren afgeleid die per klimaatscenario kunnen worden toegepast om de door het bodemvochtmodel (bijvoorbeeld ONZAT) berekende grondwateraanvulling te corrigeren (zie ook Witte et al., 2008). Hiertoe zijn nog extra SWAP-berekeningen gedaan met de klimaatreeksen, waarbij de vaatplantbedekking gelijk is gehouden aan de referentiesituatie (51% op de zuidhelling, 68% op de duintop, 80% op de noordhelling; zie ook Tabel 4-3). De correctiefactor per plot is vervolgens bepaald als de verhouding tussen de grondwateraanvulling R bij aangepaste bedekking (Tabel 4-3) en de grondwateraanvulling bij bedekking in de referentiesituatie.

Uit de resultaten volgt dat de benodigde correctiefactor op zowel zuid- als noordhellingen hoger is dan op duintoppen (Tabel 4-4). Deze bevinding wijkt af van Witte et al. (2008), die vaststelden dat de benodigde correctiefactor op de noordhelling het laagst was. Dit verschil wordt met name veroorzaakt doordat we in onze studie rekening houden met een correctie van de neerslag op de noordhelling (0,87; zie paragraaf 4.1), hetgeen in de eerdere studie niet is gedaan. Hierdoor komt de terugkoppeling tussen vegetatie en klimaat op de noordhelling in onze studie sterker naar voren. Witte et al. (2008) berekenden vervolgens de algemene correctiefactor door die van de noord- en zuidhelling te middelen. Wij hebben ervoor gekozen deze 'netto correctiefactor' te berekenen als het gemiddelde tussen de drie verschillende plots. Voor de natte varianten Ln en Hn van de klimaatscenario's voor 2050 is een factor van 1,06 nodig om de toekomstige grondwateraanvulling in de grondwatermodellen te corrigeren; voor de droge varianten is dat 1,09-1,11. De correctiefactor voor de droge variant Hd in 2100 is met 1,30 aanzienlijk: dit betekent dat de grondwateraanvulling door vegetatieterugkoppeling 30% hoger kan zijn dan door de grondwatermodellen zonder de vegetatieterugkoppeling wordt berekend.

Tabel 4-4: Correctiefactoren voor grondwateronafhankelijke duinbodems per klimaatscenario

Scenario						
	2050				2100	
	Ln	Ld	Hn	Hd	Hn	Hd
Zuidhelling	1,08	1,11	1,07	1,14	1,17	1,33
Duintop	1,04	1,06	1,04	1,08	1,10	1,26
Noordhelling	1,07	1,09	1,06	1,11	1,13	1,30
Netto correctiefactor	1,06	1,09	1,06	1,11	1,13	1,30

4.3.3 Mos versus kaal zand

In de berekeningen van de toekomstige grondwateraanvulling hebben we noodgedwongen geen rekening gehouden met de eventuele aanwezigheid van mos, aangezien een moslaag niet rechtstreeks kan worden gemodelleerd in SWAP (een omweg zorgt vooralsnog voor lange rekentijden en kans op numerieke instabiliteit). We zijn ervan uitgegaan dat het gedeelte van de plots dat niet wordt bedekt door vaatplanten, uit kaal zand bestaat. In werkelijkheid bestaat een deel van dit kale zand in de referentiesituatie uit mos en zal een afname van vaatplantbedekking deels leiden tot een toename in de mosbedekking. De vraag is nu wat deze aanname voor effect heeft op de berekende grondwateraanvulling. Voortman et al. (2017) hebben in hun studie wel berekeningen gedaan aan het effect van mos op bodemverdamping en transpiratie en dus op de grondwateraanvulling. Hiertoe hebben zij mos in Hydrus 1D gesimuleerd als een bodemlaagje, gebaseerd op eerder afgeleide bodemfysische

eigenschappen van verschillende soorten mos (Voortman et al., 2014). Uit de berekeningen concludeerden ze dat mos zowel tot een toename als een afname van de grondwateraanvulling kan leiden. Het precieze effect hangt onder andere af van de soort mos en de mate van bodemvorming. Zo bleek *Hypnum cupressiforme* ((duin)klauwtjesmos), dat in een groot deel van de plots met enige bodemvorming werd aangetroffen, gemiddeld een positief effect te hebben op de grondwateraanvulling. *Syntrichia ruralis* (Duinsterretje), dat vooral werd aangetroffen op jonge duinbodems met nauwelijks bodemontwikkeling, bleek juist een negatief effect te hebben op de grondwateraanvulling.

Op basis van de achterliggende gegevens uit Voortman et al. (2017) hebben we een inschatting gemaakt van de bandbreedte van de berekende grondwateraanvulling, op basis van de aanname dat het berekende percentage kaal zand op de drie plots geheel zou worden ingenomen door mos. Daartoe zijn de resultaten uit de genoemde studie vertaald naar een effect per procent kale grond. Voor de onderkant van de bandbreedte (negatief effect; netto minimale grondwateraanvulling) zijn we uitgegaan van een mosbedekking door *S. ruralis*, voor de bovenkant van de bandbreedte (positief effect; maximale aanvulling) van bedekking door *H. cupressiforme*. Uit onze inschatting volgt dat de bandbreedte rondom de met SWAP berekende grondwateraanvulling aanzienlijk kan zijn, met het grootste effect op de zuidhelling (lagere bedekking door vaatplanten, meer kale grond en/of mos). In de referentiesituatie kan de berekende grondwateraanvulling van 490 mm/jaar op de zuidhelling ook 12 mm lager of 28 mm hoger uitvallen (478-518 mm/jaar). De bandbreedte is het grootst onder het droge scenario Hd₂₁₀₀: de berekende grondwateraanvulling van 635 mm/jaar zou ook 22 mm lager of 53 mm hoger kunnen uitvallen (613-688 mm/jaar), een afwijking van -3% tot +8%. Het is duidelijk dat de aan- of afwezigheid van mos een belangrijke factor van onzekerheid is in het berekenen van de regionale grondwateraanvulling, in de huidige maar zeker ook in de toekomstige situatie. Er is meer onderzoek nodig om het effect van klimaatverandering op mosbedekking en daarmee de grondwateraanvulling beter te kunnen kwantificeren, ook gezien de bevindingen in paragraaf 3.4 en de relatie met verstuiwingsdynamiek in de duinen.

Tabel 4-5: Berekende percentage kaal zand / mos, grondwateraanvulling R en bandbreedte van de grondwateraanvulling voor een fictieve zuidhelling, duintop en noordhelling. De berekende grondwateraanvulling R gaat uit van enkel kaal zand; de bandbreedte is gebaseerd op de aanname dat al het kale zand wordt vervangen door mos.

Scenario							
	Referentie	2050				2100	
		Ln	Ld	Hn	Hd	Hn	Hd
Zuid							
Kaal zand of mos (%)	49	64	70	64	73	80	94
R (mm/jr)	490	532	533	561	530	651	635
R_min-max (mm/jr)	478-518	517-568	517-574	546-597	512-571	632-696	613-688
Top							
Kaal zand of mos (%)	32	45	51	45	54	62	84
R (mm/jr)	470	493	489	523	481	591	577
R_min-max (mm/jr)	463-489	483-519	478-519	512-548	468-512	576-626	557-625
Noord							
Kaal zand of mos (%)	20	28	32	28	35	41	66
R (mm/jr)	390	420	416	445	409	505	494
R_min-max (mm/jr)	386-402	413-436	409-435	439-461	401-429	495-528	479-532

5 Synthese en discussie

5.1 Synthese

In deze studie hebben we de methode van Witte et al. (2008) voor het bepalen van de toekomstige grondwateraanvulling in het duingebied aangescherpt en geactualiseerd met nieuwe gegevens over vegetatiebedekking en vervolgens toegepast op de nieuwe KNMI '23 scenario's. We hebben de door Witte et al (2008) afgeleide empirische relatie tussen vegetatiebedekking en droogtegraad verbeterd met nieuwe veldmetingen, met name in het bereik van lage bedekkingsgraden. Wel hebben we vastgesteld dat deze empirische relatie beter is af te leiden voor vaatplantbedekking dan voor totale bedekking.

Een update van het werk van Witte et al. (2008) was nodig, aangezien deze studie sterk verkennend van aard was. De empirische relatie was een eerste aanzet, waarbij de auteurs benadrukten dat deze met extra gegevens zou moeten worden getoetst. Intussen zijn er meer datasets beschikbaar gekomen waarmee de relatie beter kan worden onderbouwd. Voorts is uit meteorologische meetgegevens gebleken dat er de afgelopen decennia substantieel meer neerslag valt in de duinstreek dan ten tijde van de eerste studie. De vernattende trend is ook in het binnenland te zien, maar minder sterk dan aan de kust. Daarnaast volgt nu ook uit de nieuwste klimaatscenario's dat klimaatverandering in de kustgebieden anders verloopt dan in het binnenland. De veranderingen in de neerslag, verdamping en potentieel neerslagoverschot verschillen tussen de klimaatscenario's: in enkele scenario's wordt het op jaarbasis natter, in andere scenario's juist droger. Wel neemt in alle scenario's de hoeveelheid neerslag in de winter toe en in de zomer af.

Op basis van SWAP-berekeningen concluderen we dat de terugkoppeling tussen vegetatie en klimaat een niet te verwaarlozen invloed heeft op de grondwateraanvulling in de grondwateronafhankelijke delen van de duinen. De grondwateraanvulling is anders op duinhellingen dan op vlak terrein, met de hoogste aanvulling op zuidhellingen en de laagste aanvulling op noordhellingen. Dit inzicht wijkt af van Witte et al. (2008), doordat we in onze studie een correctie voor de hoeveelheid neerslag op hellingen hebben toegepast, zoals geïntroduceerd in Bartholomeus et al. (2012).

Onder invloed van klimaatverandering zal de grondwateraanvulling in grondwateronafhankelijke delen van het duingebied toenemen. De mate waarin verschilt per klimaatscenario, maar de toename ten opzichte van de referentiesituatie treedt in alle scenario's en zichtjaren op. Een vergelijking tussen een natte duinvallei (grondwaterafhankelijk) en de grondwateronafhankelijke plots laat zien dat een verandering in vegetatiebedekking het klimaatsignaal dempt en in veel gevallen zelfs omkeert. De grondwateraanvulling in duinvalleien neemt in de meeste scenario's af, terwijl de grondwateraanvulling in grondwateronafhankelijke gebieden in de meeste scenario's toeneemt als gevolg van de vegetatieterugkoppeling. Welk effect dit zal hebben op het duingebied als geheel hangt sterk af van de uitgangssituatie en de verhouding tussen natte en droge delen, maar een stijging van de grondwaterstand in het duingebied op de lange termijn is waarschijnlijk, zeker in combinatie met zeespiegelstijging (Cirkel & Aggenbach, 2024).

De gevolgen van klimaatverandering voor de ecologie van het duinsysteem zijn reeds vrij uitgebreid beschreven (Witte et al., 2008; Cirkel & Aggenbach, 2024). De resultaten uit onze studie ondersteunen deze beschrijving en bieden een nadere kwantificering van het effect. Zo lijkt de bedekking door vaatplanten in de toekomst af te nemen, zeker nu we ook hebben vastgesteld dat de vaatplantbedekking op noordhellingen sterk kan afnemen. In hoeverre dit zal leiden tot een toename van de hoeveelheid kaal zand en tot een hogere gevoeligheid voor verstuiving, hangt sterk af van de mate waarin (korst)mossen de plek van vaatplanten zullen overnemen. Er is meer onderzoek nodig om het effect van klimaatverandering op bedekking van (korst)mossen nader te kwantificeren, onder andere in combinatie met andere factoren die daarop van invloed zijn, zoals verstuiving.

5.2 Aandachtspunten en onzekerheden

De methode in deze studie is sterk empirisch van aard en is zodoende met een aantal onzekerheden omgeven. We benoemen hier puntsgewijs de belangrijkste onzekerheden en overige aandachtspunten die uit de resultaten naar voren komen.

- De relatie tussen vegetatiebedekking en droogtegraad is in sterke mate empirisch. De grote spreiding van punten in Figuur 3-2 geeft aan dat vegetatiebedekking ook door andere factoren wordt bepaald en/of dat de berekende droogtegraad ook onzekerheid kent. Deze is immers berekend. Daarnaast is het meten van de vegetatiebedekking niet exact;
- Het effect van zeer droge jaren op de bedekkingsgraad in de aanloop naar het moment van vegetatieopname is uiteindelijk niet in de berekeningen meegenomen, onder andere omdat we gebruik hebben gemaakt van (kunstmatige) klimaatreeksen. Het effect is niettemin wel vastgesteld in andere studies, dus het weglaten ervan zal de resultaten hebben beïnvloed;
- We hebben de berekeningen van toekomstige vegetatiebedekking uitgevoerd met behulp van klimaatreeksen, niet met daadwerkelijke metingen of transformaties daarvan. Het voordeel hiervan is dat kan worden aangesloten bij klimaatprojecties voor de specifieke locaties, zodat het verschil tussen kust en binnenland ook daadwerkelijk wordt meegenomen. Een nadeel is dat klimaatreeksen, inclusief in het referentiescenario ('huidige situatie'), kunstmatig zijn en dus geen direct verband hebben met de vegetatieopnamen;
- De terugkoppeling tussen (korst)mossen en klimaat is nog niet goed in beeld. De mate van bedekking door (korst)mossen kan echter aanzienlijke invloed hebben op de toekomstige grondwateraanvulling. We hebben in de huidige studie het effect van mos enkele met eenvoudige berekening bepaald, om gevoel te krijgen bij de bandbreedte van het effect. Het zou nauwkeuriger zijn dit effect direct te modelleren (Voortman et al., 2014);
- De correctiefactor voor toekomstige grondwateraanvulling in het duingebied is nu tijdsonafhankelijk. Een nauwkeurige correctie is idealiter wel tijdsafhankelijk, zodat de invloed van voorafgaande droge of natte jaren op het bodemvocht ook worden meegenomen.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

In deze paragraaf worden puntsgewijs de conclusies beschreven die volgen uit de resultaten.

Relatie tussen bedekking en droogtegraad:

- Vaatplantbedekking is betere maat voor de toestand van duinvegetatie onder invloed van droogte dan de totale bedekking (inclusief (korst)mossen). Dit komt onder andere door de verschillende methoden van vegetatieopname die per dataset zijn gehanteerd.
- In de huidige studie hebben we de empirische relatie tussen vaatplantbedekking en droogtegraad, zoals geïntroduceerd in Witte et al. (2008), aangevuld met gegevens in het bereik van lage vaatplantbedekking. Na toevoeging blijkt de empirische relatie nog steeds geschikt om de bedekkingsgraad onder toekomstige klimaatomstandigheden te benaderen, maar de relatie is nu wel beter onderbouwd.
- De lengte van de aanlooperperiode, dat wil zeggen de periode voorafgaand aan vegetatieopname waarover de droogtegraad wordt berekend, beïnvloedt de relatie droogte-bedekking enigszins, maar het verschil is niet groot. Het gebruik van een lange aanlooperperiode (ca. 30 jaar), zoals noodzakelijk bij het gebruik van klimaatreeksen voor het berekenen van de toekomstige droogtegraad, is plausibel.
- Er lijkt een positieve relatie te bestaan tussen (korst)mosbedekking en droogtegraad, maar de spreiding van punten is te groot om hier duidelijke conclusies uit te trekken. Bovendien bevatten de gebruikte datasets geen opnamen in het extreem droge spectrum ('woestijnsituatie'), waardoor de verwachte afname in mosbedekking bij extreme droogte niet kon worden vastgesteld.

Klimaatverandering in het duingebied en effect op vegetatiebedekking:

- Uit neerslagmetingen van de afgelopen decennia komt een vernattende trend naar voren. Deze trend is zowel zichtbaar in het binnenland als langs de kust, maar is aan de kust nog sterker. Voor neerslagstation Valkenburg is een stijging van 16% t.o.v. 2000 geconstateerd.
- De nieuwe KNMI Klimaatscenario's laten zien dat het de duinstreek op jaarbasis zowel natter als droger kan worden, afhankelijk van het scenario. De winters worden natter, de zomers droger. De referentieverdamping neemt over het algemeen toe.
- Als gevolg van de veranderingen in neerslag en referentieverdamping neemt het potentiële neerslagoverschot in de meeste scenario's af. In de droge variant Hd₂₁₀₀ is de afname ongeveer 40%.
- In de huidige situatie is het potentiële vochttekort het hoogst op de zuidhelling en het laagst op de noordhelling. Onder alle klimaatscenario's wordt een toename van het potentiële vochttekort verwacht op alle drie de onderzochte oppervlakken. De grootste procentuele toename zal optreden op de noordhelling.
- Als gevolg van klimaatverandering neemt de vaatplantbedekking in alle scenario's af op alle onderzochte oppervlakken. In de droge variant Hd₂₁₀₀ is voor de zuidhelling een vaatplantbedekking van slechts 6% berekend.

Effect op grondwateraanvulling:

- De grondwateraanvulling in grondwateronafhankelijke delen van het duin is het hoogst op de zuidhelling en het laagst op de noordhelling, zowel in de referentiesituatie als in de klimaatscenario's. In Witte et al. (2008) werd juist het tegenovergestelde vastgesteld. Het verschil tussen beide studies wordt veroorzaakt doordat we in onze studie wel een neerslagcorrectie toepassen op hellingen, in tegenstelling tot de eerdere studie.
- De grondwateraanvulling neemt in alle klimaatscenario's toe, maar vooral in de scenario's voor zichtjaar 2100. Dit is het gevolg van veranderingen in de bedekkingsgraad van de vegetatie. De terugkoppeling tussen vegetatie en klimaat heeft zodoende een niet te verwaarlozen invloed op de grondwateraanvulling in de grondwateronafhankelijke delen van de duinen.

- De grondwateraanvulling neemt in vrijwel alle scenario's juist af in (grondwaterafhankelijke) duinvalleien, in lijn met de verwachte afname van het potentiële neerslagoverschot.
- De hydrologische effecten van klimaatverandering verschillen per locatie in het duingebied. Deze verschillen worden op langere termijn uitvergroot.
- Om rekening te houden met het effect van vegetatierugkoppeling, is in de grondwatermodellen van de duinbedrijven een globale correctiefactor nodig voor toekomstige grondwateraanvulling in de grondwateronafhankelijke delen. Voor het zichtjaar 2050 bedraagt de factor 1,06-1,11 (6-11% meer aanvulling als gevolg van vegetatierugkoppeling). In de droge variant Hd₂₁₀₀ is de factor maar liefst 1,30 (30% meer aanvulling).
- Een verandering in bedekking door (korst)mos in plaats van kaal zand kan leiden tot zowel een hogere als een lagere grondwateraanvulling, afhankelijk van de soort mos en de mate van bodemontwikkeling. In de droge variant Hd₂₁₀₀ bedraagt de berekende afwijking in de grondwateraanvulling op de zuidhelling tussen de -3 en +8%.
- Al met al lijkt een stijging van de grondwaterstand in duingebieden als gevolg van klimaatverandering aannemelijk.

6.2 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

Nader onderzoek wordt aanbevolen op de volgende onderwerpen:

- Klimaatverandering en (korst)mosbedekking: In de huidige studie hebben we niet kunnen vaststellen dat bij extremere droogtegraad ook de bedekking door (korst)mossen zal afnemen, al zijn er in Zuid-Europese duingebieden wel aanwijzingen voor. Kennis van deze terugkoppeling is belangrijk om nauwkeuriger inzicht te krijgen in het effect van klimaatverandering op de grondwateraanvulling en zoetwatervoorraad in de duinen. De ontwikkeling van de (korst)moslaag is namelijk zowel van invloed op de bodemverdamping, en daarmee de grondwateraanvulling, als op de successie. Daarnaast heeft een afname van (korst)mosbedekking en een toename van de hoeveelheid kaal zand gevolgen voor de verstuiwingsdynamiek in het duin, waarbij mogelijk ook de Natura 2000-doelen worden beïnvloed. In vervolgonderzoek kan onder andere worden uitgezocht hoe (korst)mosvegetatie beter kan worden gemodelleerd in bodemvochtmodellen zoals SWAP. Daarnaast kan aansluiting worden gezocht bij internationale gradiëntenstudies (Aggenbach et al., *in voorb.*), waarbij ook de wisselwerking tussen klimaatverandering en andere factoren inzichtelijk kan worden gemaakt.
- Correctie van grondwateraanvulling in bestaande grondwatermodellen: In de huidige studie hebben we een set tijdsafhankelijke correctiefactoren afgeleid voor verschillende klimaatscenario's met behulp van berekeningen aan de onverzadigde zone. Deze correctiefactoren kunnen worden gebruikt om de grondwateraanvulling onder korte duinvegetaties in de bestaande modellen van de duinwaterbedrijven te corrigeren. In de nieuwe generatie hydrologische modellen zal de onverzadigde zone in meer detail meegenomen worden. Dit kan alsnog in de vorm van relatief eenvoudige bakjesmodellen, maar ook door expliciete modellering van onverzadigde stroming en gewasgroei. Ons onderzoek laat zien dat de bedekkingsgraad van de vegetatie belangrijk is om mee te nemen in de berekening van de grondwateraanvulling. De bedekkingsgraad hangt af van de droogtegraad, die varieert in ruimte en tijd. Onderzocht moet worden op welke manier deze aspecten meegenomen kunnen worden in de regionale grondwatermodellering voor het duin. Daarbij kan (weer) gedacht worden aan correctiefactoren, maar ook aan expliciete modellering van de vegetatiedynamiek in modellen met gekoppelde verzadigde en onverzadigde zone. Dit laatste vergt echter aanzienlijk meer rekenkracht.

7 Bronnenlijst

- Aggenbach, C. J. S., Clevers, S. H. P., de Wit, J. A., & Krajenbrink, H. J. (2020). *Evaluatie van effecten begrazing van damherten op duingraslanden in de Luchterduinen* (KWR 2020.042). KWR, Nieuwegein.
- Aggenbach, C. J. S., Remke, E., & Kooijman, A. (in voorbereiding). *Kalkarme Grijze duinen of Duinheide? De rol van wortelbiomassa, P-beschikbaarheid en plantstrategieën bij kleinschalige verstuing in kalkarme en kalkrijke duinen*. Kennisnetwerk OBN, Driebergen.
- Bartholomeus, R. P., Witte, J. P. M., & Runhaar, J. (2012). Drought stress and vegetation characteristics on sites with different slopes and orientations. *Ecohydrology*, 5(6), 808-818. <https://doi.org/10.1002/eco.271>
- Bartholomeus, R. P., Witte, J. P. M., van Bodegom, P. M., van Dam, J. C., & Aerts, R. (2011). Climate change threatens endangered plant species by stronger and interacting water-related stresses. *Journal of Geophysical Research*, 116. <https://doi.org/10.1029/2011jg001693>
- Bos-Burgering, L., Weerts, A., Pouwels, J., Jacobs, C., & Jansen, F. (2020). *Deltafact Verdamping*. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA), Amersfoort.
- Cirkel, D. G., & Aggenbach, C. J. S. (2024). *Gevolgen zeespiegelstijging en klimaatverandering op zoetwaterbel en duinvalleien. Literatuurstudie* (KWR 2024.073). KWR, Nieuwegein.
- de Lima, J. L. M. P. (1990). The effect of oblique rain on inclined surfaces: a nomograph for the rain-gauge correction factor. *Journal of Hydrology*, 115(1-4), 407-412. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(90\)90218-M](https://doi.org/10.1016/0022-1694(90)90218-M)
- Janssen, G., America-van den Heuvel, I., Meeusen, R., van Strien, C., Prinsen, G., Mes, E., Marth, I., Weiler, O., & Bijlsma, A. (2024). *Vertaling van de Deltascenario's 2024 naar invoer voor het Nationaal Water Model*. Deltares.
- KNMI. (2023). *KNMI'23-klimaatsscenario's voor Nederland* (23-03). KNMI, De Bilt. https://cdn.knmi.nl/system/ckeditor/attachment_files/data/000/000/357/original/KNMI23_klimaatsscenario's_gebruikersrapport_23-03.pdf
- Moors, E., van Ellen, W., Mol, J., & Swart, B. (2002). *Hydrologische woordenlijst*. Nederlandse Hydrologische Vereniging (NHV).
- Philip, S. Y., Kew, S. F., van der Wiel, K., Wanders, N., & van Oldenborgh, G. J. (2020). Regional differentiation in climate change induced drought trends in the Netherlands. *Environmental Research Letters*, 15(9), 094081. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab97ca>
- Šúri, M., & Hofierka, J. (2004). A New GIS-based Solar Radiation Model and Its Application to Photovoltaic Assessments. *Transactions in GIS*, 8(2), 175-190. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2004.00174.x>
- van den Brink, H. W., & de Valk, C. F. (2023). *Guidance on the use of meteorological time series constructed to match the KNMI'23 climate scenarios* (TR 408). KNMI, De Bilt.
- Voortman, B. R., Bartholomeus, R. P., van Bodegom, P. M., Gooren, H., van der Zee, S. E. A. T. M., & Witte, J. P. M. (2014). Unsaturated hydraulic properties of xerophilous mosses: Towards implementation of moss covered soils in hydrological models. *Hydrological Processes*, 28(26), 6251-6264. <https://doi.org/10.1002/hyp.10111>
- Voortman, B. R., Fujita, Y., Bartholomeus, R. P., Aggenbach, C. J. S., & Witte, J. P. M. (2017). How the evaporation of dry dune grasslands evolves during the concerted succession of soil and vegetation [Article in Press]. *Ecohydrology*, 10(4), art. no. e1848. <https://doi.org/10.1002/eco.1848>
- Witte, J. P. M., Bartholomeus, R. P., Cirkel, D. G., & Kamps, P. W. T. J. (2008). *Ecohydrologische gevolgen van klimaatverandering voor de kustduinen van Nederland* (KWR 08.006). Kiwa Water Research, Nieuwegein.