

Effecten van klimaatverandering op korte vegetaties en de waterhuishouding in de kustduinen

Henk Krajenbrink, Gijsbert Cirkel en Ruud Bartholomeus

Klimaatverandering heeft grote invloed op de waterhuishouding en natuur in onze kustduinen. Een goed beeld van de langetermijnontwikkeling van de grondwateraanvulling is noodzakelijk voor beslissingen over ingrepen in de duinwaterhuishouding en voor inzicht in mogelijke risico's voor duinwaterwinningen. Langjarige meteorologische meetreeksen laten een vernattende trend zien, hoewel de nieuwste klimaatscenario's een afname van het potentiële neerslagoverschot voorspellen. De terugkoppeling tussen vegetatie en klimaat heeft een niet te verwaarlozen invloed op de grondwateraanvulling onder korte vegetaties in de grondwateronafhankelijke delen van de duinen. We hebben een empirische relatie tussen droogte en vegetatiebedekking uit 2008 uitgebreid met extra datasets en ingezet om de toekomstige grondwateraanvulling in grondwateronafhankelijke delen van het duin te voorspellen. Een toename van het potentieel vochttekort leidt bij korte vegetaties tot een aanzienlijke afname van de vaatplantbedekking onder alle onderzochte klimaatscenario's. Hierdoor neemt de grondwateraanvulling op deze standplaatsen fors toe, met wel 30% in 2100. Voor een accurate schatting van toekomstige grondwateraanvulling moeten processen als de terugkoppeling tussen droogte en bedekking goed in grondwatermodellen worden opgenomen. Nader onderzoek is nodig naar wat de toename van grondwateraanvulling betekent voor het zoetwatervolume in de duinen en voor de vegetatie-ontwikkeling in de duinen, alsook naar de rol van zeespiegelstijging en drinkwaterproductie hierin.

Artikel

Inleiding

Klimaatverandering beïnvloedt de hydrologie en de ecologie van onze kustduinen. Er zijn sterke aanwijzingen dat het weer aan de kust anders en sneller verandert dan in het binnenland (Philip e.a., 2020; KNMI, 2021). In de laatste KNMI-klimaat-scenario's is dit ook onderkend (KNMI, 2023). Meteorologische veranderingen beïnvloeden de grondwateraanvulling, wat gevolgen heeft voor de grondwaterstanden en waterbeschikbaarheid in het duin. Langjarige meetreeksen laten op verschillende plekken een stijgende grondwaterstand zien, zodat vanuit hydrologisch oogpunt sprake lijkt van vernatting (afname van grondwaterdroogte) van het duin. Tegelijkertijd leiden langere periodes zonder neerslag en met hogere temperaturen in de zomer tot (bovengronds) afsterven van (hogere) planten en tot meer kale grond, zodat terreinbeheerders juist spreken over toename van droogte (toename van bodemvochtdroogte) – het extreem natte jaar 2024 daargelaten. Interessant is dat het beeld van zowel hydrologen als terreinbeheerders klopt en de bodemvochtdroogte via vegetatieterugkoppelingen zelfs bijdraagt aan de afname van grondwaterdroogte.

Stijging van grondwaterstanden is een potentieel risico voor de waterwin-infrastructuur in de duinen. Door te dunne onverzadigde zones kan bijvoorbeeld de kans op herbesmetting van in de duinen geïnfiltreerd water toenemen. Ook kunnen de Natura 2000-doelstellingen mogelijk niet worden gehaald door te lange of zelfs permanente inundatie van vochtige duinvalleien. Draineren en afvoeren van duinwater om grondwaterstanden te verlagen, kan in combinatie met zeespiegelstijging echter negatieve gevolgen hebben voor de omvang van de zoetwaterlens op de lange termijn. Goed zicht op de langetermijntwikkeling van de grondwateraanvulling is dan ook nodig voor beslissingen over de ingrepen in de duinwaterhuishouding.

Ruim 15 jaar geleden presenteerden Witte e.a. (2008) in een verkennende studie inzichten in de relatie tussen droogte en vegetatieontwikkelingen en de terugkoppelingen tussen vegetatiebedekking en grondwateraanvulling die in die relatie zitten. Op basis van destijds beschikbare datasets leidden zij een empirische relatie af tussen droogtegraad en vegetatiebedekking en gebruikten die relatie om inzicht te krijgen in verandering in de vegetatie en grondwateraanvulling voor de toen beschikbare klimaatscenario's. In de afgelopen jaren is de kennis over klimaatverandering en droogte sterk toegenomen en zijn meer gegevens verzameld over bodemopbouw en vegetatie in het duin (Bartholomeus e.a., 2012; Voortman e.a., 2017; Aggenbach e.a., 2020). In het kader van het collectieve onderzoeksprogramma van de duinwaterbedrijven (DPWE) hebben we de bestaande empirische relatie tussen droogte en vegetatie aangevuld met nieuwe data. Vervolgens hebben we ingeschat hoe klimaatverandering doorwerkt op de bedekkingsgraad van grondwateronafhankelijke duinvegetaties en de grondwateraanvulling onder korte duinvegetaties. Onze studie biedt hiermee een doorzichtige kijk naar de mogelijke toekomstige ontwikkeling van onze duingebieden.

Klimaatverandering in de kustduinen

In onze studie richten we ons op de directe effecten van klimaatverandering: verandering in neerslag en werkelijke verdamping, en zodoende in de grondwateraanvulling. Het mogelijke effect van zeespiegelstijging (een indirect effect) komt bij de discussie kort aan de orde.

Om inzicht te krijgen in de wijze waarop het klimaat verandert in de kustduinen, hebben we allereerst gekeken of er trends zijn te ontdekken in meetreeksen van neerslag. Op basis van neerslagmetingen op KNMI-stations (zowel automatische weerstations als handmatige neerslagstations) concluderen we dat de neerslag in de kustgebieden de afgelopen decennia is toegenomen. Dit geldt vooral voor de winterperiode, maar ook enigszins voor de zomer (Cirkel en Aggenbach, 2024). Deze stijging blijkt, in lijn met eerdere studies zoals Sluijter e.a. (2018) en Philip e.a. (2020), aan de kust groter dan in het binnenland. Bij neerslagstations aan de kust nam de gemiddelde jaarlijkse neerslagsom tussen klimaatperiode 1971-2000 en 1991-2020 toe met 7-16%. Bij station De Bilt in het binnenland is de toename in die periode 7%. De jaarlijkse referentiegewasverdamping lijkt in deze periode iets minder toe te nemen (4-7%). Hieruit leiden we voorzichtig af dat het potentiële neerslagoverschot aan de kust de afgelopen decennia is gestegen.

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. De uitkomsten van de klimaatscenario's zijn door het KNMI beschikbaar gesteld in de vorm van vlakdekkende *bias-corrected* klimaatreeksen van neerslag en referentiegewasverdamming (van den Brink en de Valk, 2023). Om te onderzoeken of de trend uit neerslagmetingen ook in de klimaatscenario's terugkomt, hebben we klimaatreeksen voor de rastercel ter hoogte van de Amsterdamse Waterleidingduinen geanalyseerd en vergeleken met de meetreeksen van weerstations. Uit de klimaatscenario's komt naar voren dat in dit gebied de hoeveelheid neerslag op jaarbasis kan toe- of afnemen, met de grootste toename in het scenario Hn₂₁₀₀ (+8%) en de grootste afname in Hd₂₁₀₀ (-3%). De neerslag in de winter neemt in alle scenario's toe (3-22%), ook in de droge varianten, terwijl de zomerneerslag in alle scenario's afneemt (5-36% afname). De referentieverdamming neemt in alle scenario's toe ten opzichte van de referentieperiode. Netto betekent dit dat het potentieel neerslagoverschot in de meeste scenario's afneemt, behalve in scenario Hn. De afname in scenario Hd₂₁₀₀ is zelfs ongeveer 40%.

Het lijkt erop dat de positieve trend in neerslag en potentieel neerslagoverschot, zoals zichtbaar in meetreeksen, niet terugkomt of althans niet doorzet in de klimaatscenario's. Het verschil tussen metingen en modellen lijkt vooral op te treden bij zomerneerslag. Het is bekend dat klimaatmodellen moeite hebben met het reproduceren van trends langs de kust (Philip e.a., 2020). Tegelijkertijd zou de toename in zomerneerslag maar tijdelijk kunnen zijn geweest en zouden we in de toekomst inderdaad te maken kunnen krijgen met drogere zomers aan de kust. Voor de inpassing van de drinkwaterfunctie in het landschap is het wel belangrijk hier goed inzicht in te krijgen.

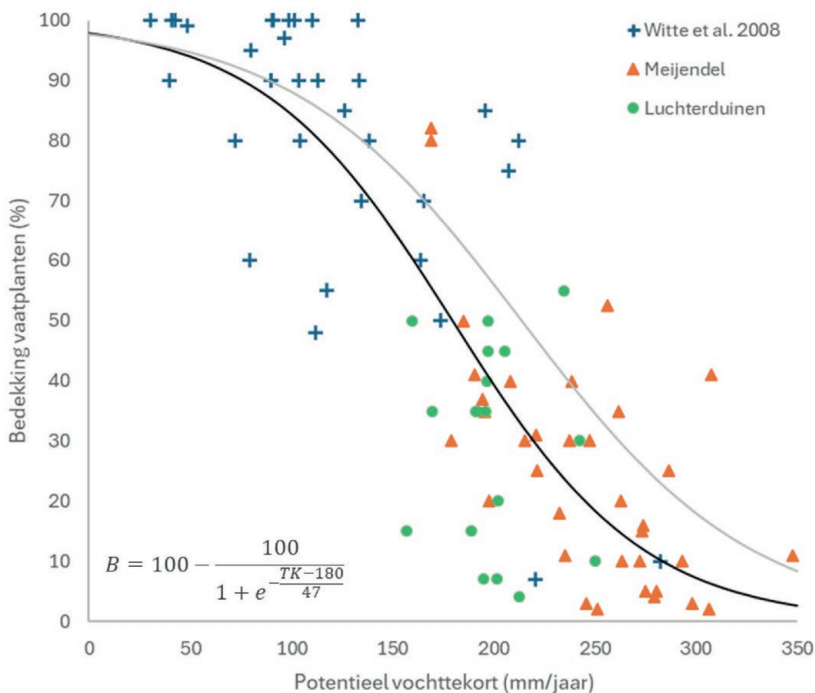
Terugkoppeling tussen droogte en vegetatie en het effect op grondwateraanvulling

Methode

Een flink deel van de vegetatie in de Nederlandse kustduinen is grondwateronafhankelijk (duinhellingen en duintoppen), zoals grijze duinvegetaties (circa 15.000 ha). In deze grondwateronafhankelijke delen van het duin moeten we bij het kwantificeren van de grondwateraanvulling rekening houden met de terugkoppeling tussen droogte en vegetatiebedekking. In het kort betekent dit dat de samenstelling van de vegetatie zich aanpast aan standplaatscondities en hierdoor de potentiële verdamping op droge standplaatsen minder is dan op nattere standplaatsen. Hierdoor is op jaarbasis een groter deel van de neerslag beschikbaar voor grondwateraanvulling. Witte e.a. (2008) voerden een eerste verkennende studie uit naar deze terugkoppelingen. Zij leidden een empirische relatie af tussen droogtegraad en totale vegetatiebedekking op basis van een beperkte dataset met vegetatieopnamen, gekoppeld aan berekeningen van vochttransport in de onverzadigde zone met het model SWAP (Kroes e.a., 2017). Als droogtegraad hanteerden zij het 'potentieel vochttekort', gedefinieerd als het gemiddelde verschil tussen de jaarlijkse potentiële en werkelijke transpiratie van een standaardgewas, berekend over een periode van volledige jaren voorafgaand

aan de vegetatieopname. Deze empirische relatie is vervolgens gebruikt om verandering in de bedekking van de duinvegetatie, de werkelijke verdamping en uiteindelijk de grondwateraanvulling voor verschillende klimaatscenario's te voorspellen. Zwak punt van deze eerste relatie was het beperkte aantal vegetatieopnamen in het droge bereik van de relatie.

Recent (Krajenbrink en Cirkel, 2025) hebben wij deze empirische relatie aangevuld met extra metingen uit het duingebied, afkomstig van Meijendel (Voortman e.a., 2017) en Luchterduinen (Aggenbach e.a., 2020). We richtten ons hierbij vooral op het toevoegen van datapunten van droge standplaatsen. Daarnaast hebben we, anders dan in Witte e.a. (2008), de relatie gebaseerd op vaatplantbedekking in plaats van totale bedekking, onder andere omdat bedekking door (korst)mossen niet op dezelfde wijze in alle studies is gehanteerd. De aanvullende metingen bleken goed in lijn met de oorspronkelijke dataset, waardoor we eenzelfde type functie (S-functie) door de data konden fitten (*Afbeelding 1*). De verbeterde empirische relatie hebben we vervolgens toegepast op drie fictieve duinlocaties: een duintop, een noordhelling en een zuidhelling. Voor deze locaties hebben we met SWAP, aan de hand van klimaatreeksen van neerslag en referentieverdamping (gecorrigeerd voor hellingshoek en -richting), veranderingen in vaatplantbedekking en grondwateraanvulling voor verschillende klimaatscenario's geschat. Onze methode bestaat uit vijf stappen (zie Krajenbrink en Cirkel (2025) voor een gedetailleerde beschrijving):

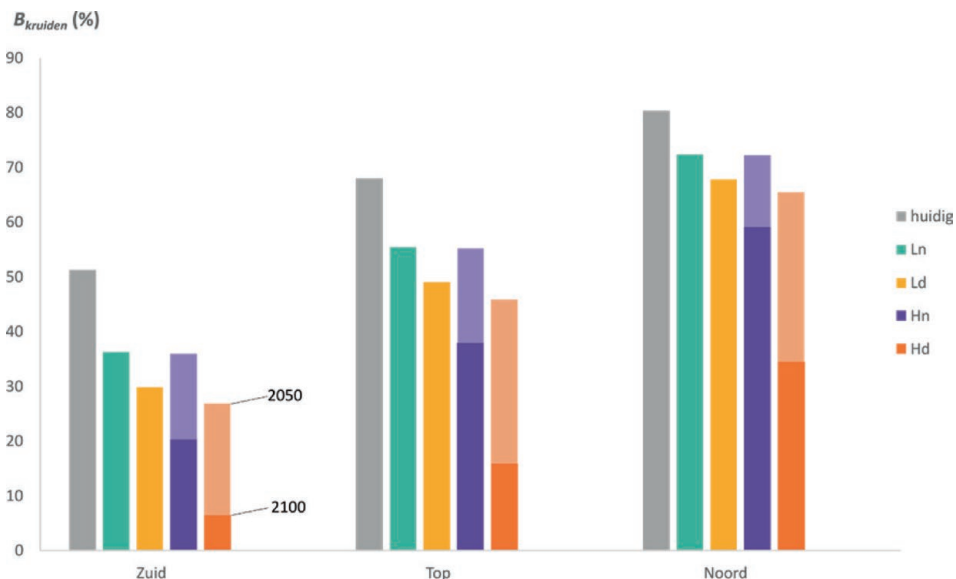


Afbeelding 1 Relatie tussen vaatplantbedekking en droogtegraad (uitgedrukt als potentieel vochttekort), inclusief de afgeleide S-functie (zwarte kromme). Ter vergelijking is de S-functie uit de studie uit 2008 in het grijs weergegeven.

1. Per fictieve locatie hebben we in SWAP het referentiescenario (huidige situatie) en zes klimaatscenario's doorgerekend voor een volledig gesloten korte grasmat (in totaal 21 modellen). Voor de meteorologische invoer hebben we gebruikgemaakt van klimaatreeksen van neerslag en referentiegewas-verdamping (van den Brink en de Valk, 2023).
2. Uit de modelresultaten voor alle locaties en klimaatscenario's hebben we het potentieel vochttekort geschat in de referentiesituatie en de toekomstscenario's. Voor elk toekomstscenario hebben we tevens het verschil in potentieel vochttekort met het referentiescenario geschat.
3. Met behulp van de empirische relatie (*Afbeelding 1*) hebben we het voor de drie representatieve locaties (duintop, noordhelling en zuidhelling) de bedekking in het referentiescenario afgeleid.
4. De geschatte verschillen in potentieel vochttekort (stap 2) en de bedekking in het referentiescenario (stap 3) hebben we gebruikt om per toekomstscenario de bedekking af te leiden, via substitutie in de empirische relatie.
5. Met de afgeleide bedekking (stap 4) zijn de modellen uit stap 1 nogmaals doorgerekend om de werkelijke grondwateraanvulling te voorspellen.

Effect op grondwateraanvulling

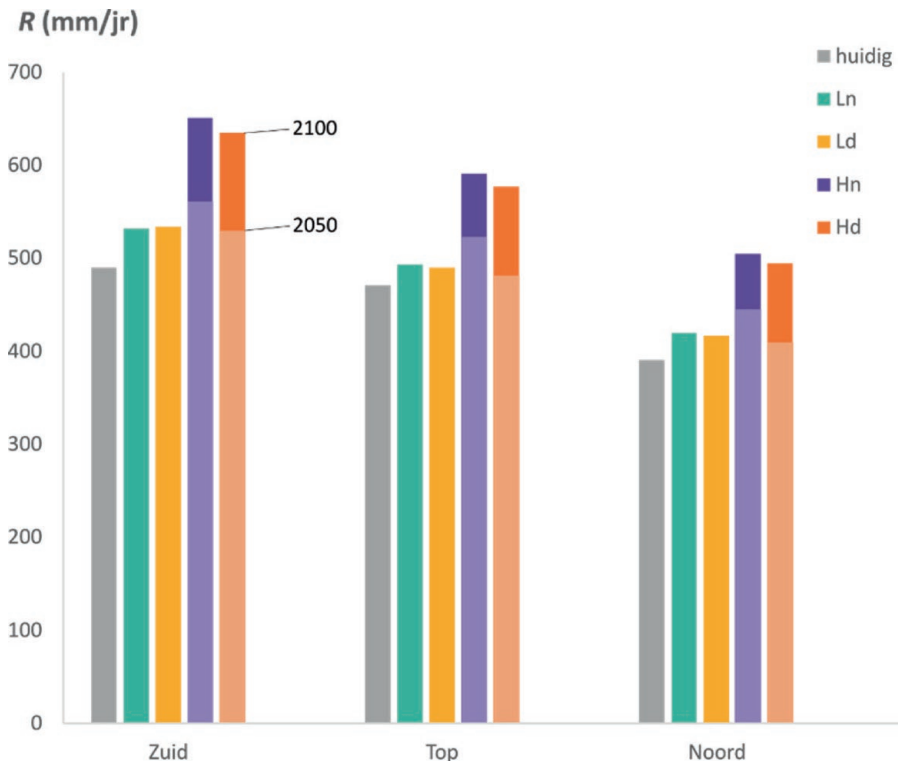
Het potentiële vochttekort (*Tabel 1*) is in de referentiesituatie het hoogst op de zuidhelling (177 mm/jaar) en het laagst op de noordhelling (113 mm/jaar) en neemt op alle plots onder alle klimaatscenario's toe. Het patroon van toename is vergelijkbaar tussen de plots, maar de toename is relatief het 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 voorspeld van het potentiële vochttekort van 44%. De toename van het potentiële vochttekort heeft volgens onze empirische relatie flinke gevolgen voor de vaatplantbedekking. De bedekking



Afbeelding 2 Geschatte vaatplantbedekking op de drie plots 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.

is in de referentiesituatie het laagst op de zuidhelling (51%) en het hoogst op de noordhelling (80%). Onder alle klimaatscenario's wordt een afname van de vaatplantbedekking verwacht (Afbeelding 2, Tabel 1). De grootste afname wordt voorspeld voor Hd₂₁₀₀, waarbij de bedekking van vaatplanten op de zuidhelling afneemt tot slechts 6%. Op de noordhelling is de afname geringer, maar ook hier neemt de bedekking nog steeds fors af tot 34% onder Hd₂₁₀₀.

De voorspelde grondwateraanvulling (Afbeelding 3, Tabel 1) is in de referentiesituatie het hoogst op de zuidhelling (490 mm) en het laagst op de noordhelling (390 mm). De geschatte grondwateraanvulling in de nieuwe analyse is aanzienlijk hoger dan destijds berekend door Witte e.a. (2008); op de zuidhelling loopt het verschil ruim 100 mm/jaar in de referentiesituatie en ruim 200 mm/jaar onder de H-scenario's in 2100. De grondwateraanvulling neemt op alle drie de fictieve locaties onder alle klimaatscenario's toe. De toename van de grondwateraanvulling lijkt aanvankelijk (zichtjaar 2050) nog beperkt (2-14%, afhankelijk van het scenario en type plot). Echter, we zien voor het zichtjaar 2100 een opvallende toename van rond de 30% in het H-scenario. Dit lijkt te maken te hebben met de sterk afgenomen bedekking van vaatplanten en een toename van het percentage kaal zand. Er treedt weinig verschil op tussen de natte en droge variant van het H-scenario in 2100. Dit is opvallend, want het verschil in potentieel neerslagoverschot tussen Hn en Hd is aanzienlijk (resp. 333 en 198 mm/jaar).



Afbeelding 3 Voorspelde grondwateraanvulling op de drie plots 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.

Correctie voor vegetatieterugkoppeling in grondwatermodellen

De schatting van de toekomstige grondwateraanvulling met grondwatermodellen bevat nog geen terugkoppelingen van de vegetatie. Hierdoor valt de grondwateraanvulling in die modellen lager uit dan in werkelijkheid waarschijnlijk het geval zal zijn. Dit heeft gevolgen voor de voorspelde zoetwater voorraad en grondwaterstanden in het duin, en zodoende voor de natuur en infrastructuur van de drinkwaterwinning. We hebben onze modelresultaten gebruikt om per klimaatscenario factoren af te leiden waarmee de resultaten uit de grondwatermodellen voor de duingebieden kunnen worden gecorrigeerd. Hiertoe hebben we aanvullende berekeningen gedaan met de klimaatreeksen, waarbij we de vaatplantbedekking gelijk hielden aan de referentiesituatie. De verhouding in geschatte grondwateraanvulling tussen beide varianten zijn de correctiefactoren. Uit de berekeningen volgt dat de benodigde correctiefactor op zowel zuid- als noordhellingen hoger is dan op duintoppen. Deze hogere correctiefactor op noordhellingen is op het eerste gezicht verrassend, maar wordt veroorzaakt door de toegepaste correctie van de neerslag op de noordhelling (regenschaduw), die vervolgens de terugkoppeling tussen droogte en vegetatie beïnvloedt. Wij hebben een netto correctiefactor afgeleid 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 jaarlijkse 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 voorspeld.

Kaal zand of mos?

In onze methode zijn we 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. Recente onderzoeken naar het effect van mos op bodemverdamping en transpiratie (Voortman e.a., 2014; Voortman e.a., 2017) concludeerden dat mos zowel tot toe- als afname van de grondwateraanvulling kan leiden, afhankelijk van onder andere de soort mos en de mate van bodemvorming. We hebben de achterliggende gegevens uit deze studies gebruikt om een inschatting te maken van de effecten op de door ons voorspelde grondwateraanvulling, op basis van de aanname dat het berekende percentage kaal zand op de drie plots geheel zou worden ingenomen door mos. In de referentiesituatie kan de voorspelde grondwateraanvulling (490 mm/jaar) op de zuidhelling door verandering in mosbedekking 2% lager of 6% hoger uitvallen. De bandbreedte is het grootst op de zuidhelling (meer kale grond en/of mos) onder het droge scenario Hd2100: de geschatte grondwateraanvulling van 635 mm/jaar zou ook 3% lager of 8% hoger kunnen uitvallen. Het is duidelijk dat de aan- of afwezigheid van mos een belangrijke factor van onzekerheid is in het schatten van de regionale grondwateraanvulling, in de huidige maar zeker ook in de toekomstige situatie.

Implicaties voor het duingebied

We concluderen dat de terugkoppeling tussen vegetatie en klimaat een niet te verwaarlozen invloed heeft op de grondwateraanvulling onder korte vegetaties in de grondwateronafhankelijke delen van de duinen. Dit vereist een aanpassing in grondwatermodellen, niet alleen in duingebieden maar ook voor grondwateronafhankelijke profielen in het binnenland. De grondwateraanvulling is anders op duinhellingen dan op vlak terrein, met de hoogste aanvulling op zuidhellingen en de laagste aanvulling op noordhellingen. De grondwateraanvulling in grondwateronafhankelijke delen van het duingebied zal in een toekomstig klimaat toenemen. De mate waarin verschilt per klimaatscenario, maar de toename ten opzichte van de referentiesituatie treedt in alle scenario's en zichtjaren op.

Zeespiegelstijging

Om te kunnen bepalen wat klimaatverandering betekent voor de zoetwatervoorraad in het hele duingebied, moeten we ook de effecten van zeespiegelstijging beschouwen. In het Kennisprogramma Zeespiegelstijging wordt rekening gehouden met een stijging tot 0,5-1,0 meter tot 2100. Recentelijk is met analytische oplossingen (Cirkel en Aggenbach, 2024) en numerieke analyses (Oude Essink en Nogueira, 2024) verkend wat zeespiegelstijging betekent voor het volume zoet grondwater onder het duin. Beide studies leverden deels tegengestelde conclusies op: de zoetwaterbel zou zowel enigszins kunnen groeien als krimpen. De onzekerheid komt voort uit diverse natuurlijke en kunstmatige processen die hierin meespelen en in verschillende mate waren meegenomen in de analyses, waaronder zandsuppletie, bodemdaling en de aanwezigheid van infrastructuur van drinkwaterwinning. Nadere modelanalyses van zeespiegelstijging in samenhang met deze processen zijn gewenst.

Mogelijke ontwikkelingen in het duinlandschap

Gezien de terugkoppeling tussen droogte en vegetatie is de grote vraag welke autonome ontwikkelingen in het duinlandschap we als gevolg van klimaatverandering kunnen verwachten. Witte e.a. (2008) verwachtten een toename van warmteminnende en droogte resistente soorten als gevolg van meer kale grond. Tegelijkertijd wezen ze erop dat door de toegenomen grondwaterdynamiek, dieper wortelende soorten zoals bomen en struiken in het voordeel kunnen zijn ten opzichte van kwetsbare soorten die gebaat zijn bij weinig variatie. Ze schetsten een toekomstbeeld van enkele overgebleven houtige soorten, omringd door kale grond en mossen, vergelijkbaar met semi-aride gebieden. Cirkel en Aggenbach (2024) stelden dat de uitwerking van klimaatverandering verschilt tussen landschapsonderdelen: de lage delen zullen vernatten, terwijl de droge delen toenemende invloed van droogtestress zullen ondervinden, met waarschijnlijk meer verstuiwing als gevolg.

De vochtige duinvalleien (habitattype H2190) in de Nederlandse kustduinen zijn van internationaal belang en moeten daarom in stand worden gehouden. Ze omvatten jonge tot oude successiestadia in een diverse range van open water, lage moerasvegetaties, vochtige graslanden en rietlanden voorkomend in (min of meer) natuurlijke laagten in het duin. Kenmerkend voor vochtige duinvalleien is de sterke dynamiek van de grondwaterstand die jaren achtereen ver boven of

juist onder het gemiddelde niveau ligt. Bovendien zijn fluctuaties binnen jaren groot en kan door de dikke onverzadigde zone in de omringende duinen de reactie van de grondwaterstand in de valleien aanzienlijk achterlopen op de grondwateraanvulling. De grondwaterstandsdynamiek is medebepalend voor de opbouw van organische stof en daarmee de successie van vegetaties van duinvalleien.

De vernattende trend zal waarschijnlijk positief uitpakken voor vochtige duinvalleivegetaties, onder andere doordat huidige droge valleien door de stijgende grondwaterstanden mogelijk geschikt worden voor vochtige duinvalleivegetaties. Huidige laaggelegen valleien kunnen echter langduriger of zelfs permanent inunderen en kunnen, als er verbindingen ontstaan naar de zee of het achterland, het duin gaan draineren. Bij ondiep gelegen zoet-zoutgrensvlakken is verbrakking van valleien door *upconing* mogelijk. Ecologisch gezien hoeft dit geen negatieve ontwikkeling te zijn, gezien het feit dat dit type valleien nog maar weinig voorkomt in de duinen van het vaste land. Tevens kunnen duinvalleien in (oppervlakkig) ontkalkte duingebieden beter gebufferd worden tegen verzuring, door de kwel die met de toenemende aanvulling samenhangt. Wel is nog onduidelijk hoe de freatische grondwaterstandsdynamiek in de valleien zich zal ontwikkelen bij toenemende kwelfluxen in combinatie met toenemende verdamping in voorjaar en zomer in de valleien. De doorwerking van verandering in de grondwaterstandsdynamiek en langdurige inundatie op de vegetatie is ook nog niet goed bekend. Onderzoek naar de gevolgen van het zeer natte jaar 2024 kan hier misschien meer duidelijkheid over verschaffen. Of vochtige duinvalleivegetaties zich daadwerkelijk kunnen uitbreiden, wordt mede bepaald door de mate waarin successie wordt teruggezet, nutriëntenarme condities ontstaan dan wel worden gerealiseerd, en of er voldoende dispersie van soorten kan plaatsvinden naar nieuwe geschikte standplaatsen.

Conclusie

We stellen vast dat er de afgelopen decennia sprake is geweest van een vernattende trend in de duinen. Volgens de recente klimaatscenario's neemt het toekomstige potentiële neerslagoverschot (neerslag - referentieverdamping) in de duinen echter af. Of hier sprake is van een trendbreuk, of met het feit dat klimaatmodellen moeite hebben met reproduceren van trends aan de kust, dient nader onderzocht te worden. De terugkoppeling tussen droogte en vegetatiebedekking leidt tot een aanzienlijke toename van de werkelijke grondwateraanvulling in de grondwateronafhankelijke delen van het duin, tot wel 30% rond 2100. Voor een accurate schatting van toekomstige grondwateraanvulling is het van belang om processen als de terugkoppeling tussen droogte en bedekking goed in grondwatermodellen op te nemen. In welke mate een hogere grondwateraanvulling leidt tot groei van het zoetwatervolume in de duinen, hangt nauw samen met zeespiegelstijging, drainage van het duin en de aanwezigheid van infiltratiesystemen voor drinkwaterproductie in het duin. Nadere modelanalyses van deze processen zijn gewenst. De invloed van klimaatverandering op het duinlandschap is nog ongewis. In de toekomst kan door droogtestress de bedekking van vaatplanten sterk afnemen in de grondwateronafhankelijke delen. Het is nog onzeker in hoeverre door deze afname (korst)mossen of kaal zand zullen toenemen. Vegetaties in vochtige duinvalleien kunnen mogelijk juist positief worden beïnvloed door de vernatting, maar ook hiervoor is nader onderzoek gewenst.

Literatuur

- Aggenbach, C.J.S., S.H.P. Clevers, J.A. de Wit en H.J. Krajenbrink** (2020) Evaluatie van effecten begrazing van damherten op duingraslanden in de Luchterduinen. KWR 54p.
- Bartholomeus, R.P., J.P.M. Witte en J. Runhaar** (2012) Drought stress and vegetation characteristics on sites with different slopes and orientations; in: *Ecohydrology*, vol 5, no 6, pag 808-818.
- Cirkel, D.G. en C.J.S. Aggenbach** (2024) Gevolgen zeespiegelstijging en klimaatverandering op zoetwaterbel en duinvalleien. Literatuurstudie. KWR 41.
- KNMI** (2021) KNMI Klimaatsignaal'21: hoe het klimaat in Nederland snel verandert. KNMI 72.
- (2023) KNMI'23-klimaatscenario's voor Nederland. KNMI.
- Krajenbrink, H.J. en D.G. Cirkel** (2025) Effecten van klimaatverandering op vegetatiebedekking en grondwateraanvulling in kustduinen. KWR 30.
- Kroes, J.G., J.C. van Dam, R.P. Bartholomeus, P. Groenendijk, M. Heinen, R.F.A. Hendriks, H.M. Mulder, I. Supit en P.E.V. van Walsum** (2017) SWAP version 4; Theory description and user manual. Wageningen Environmental Research 244.
- Oude Essink, G.H.P. en G.E.H. Nogueira** (2024) Effecten zeespiegelstijging op zoetwater in de Nederlandse duinen; 65.
- Philip, S.Y., S.F. Kew, K. van der Wiel, N. Wanders en G.J. van Oldenborgh** (2020) Regional differentiation in climate change induced drought trends in the Netherlands; in: *Environmental Research Letters*, vol 15, no 9, pag 094081.
- Sluijter, R., M. Plieger, G.J. van Oldenborgh, J. Beersma en H. de Vries** (2018) De droogte van 2018. Een analyse op basis van het potentiële neerslagtekort. KNMI.
- van den Brink, H.W. en C.F. de Valk** (2023) Guidance on the use of meteorological time series constructed to match the KNMI'23 climate scenarios. KNMI.
- Voortman, B.R., R.P. Bartholomeus, P.M. van Bodegom, H. Gooren, S.E.A.T.M. van der Zee en J.P.M. Witte** (2014) Unsaturated hydraulic properties of xerophilous mosses: Towards implementation of moss covered soils in hydrological models; in: *Hydrological Processes*, vol 28, no 26, pag 6251-6264.
- Voortman, B.R., Y. Fujita, R.P. Bartholomeus, C.J.S. Aggenbach en J.P.M. Witte** (2017) How the evaporation of dry dune grasslands evolves during the concerted succession of soil and vegetation; in: *Ecohydrology*, vol 10, no 4, pag art. no. e1848.
- Witte, J.P.M., R.P. Bartholomeus, D.G. Cirkel en P.W.T.J. Kamps** (2008) Ecohydrologische gevolgen van klimaatverandering voor de kustduinen van Nederland. Kiwa Water Research 65.

Tabel 1 Geschatte 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							
		2050				2100	
	Referentie	Ln	Ld	Hn	Hd	Hn	Hd
Zuid							
TK (mm/jr)	177	207	220	207	227	245	306
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 (%)		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 (%)		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

Summary Impact of Climate Change on Low-growing Vegetation and Hydrological Processes in Coastal Dune Systems

Climate change has a significant impact on the water balance and nature in the Dutch coastal dunes. A clear understanding of the long-term development of groundwater recharge is essential for making decisions about interventions in dune water management and for assessing potential risks to drinking water production. Long-term meteorological records show a trend towards wetter conditions, although the latest climate scenarios predict a decrease in the potential precipitation excess. The feedback between vegetation and climate has a considerable impact on groundwater recharge under short vegetation in groundwater-independent parts of the dunes. We have expanded an empirical relationship between drought and vegetation cover from 2008 with additional datasets and used it to estimate future groundwater recharge in groundwater-

independent dune areas. An increase in potential moisture deficit leads to a significant reduction in vascular plant cover under short vegetation across all climate scenarios studied. As a result, actual groundwater recharge at these locations will increase substantially, with an increase of up to 30% by 2100. For accurate estimates of future groundwater recharge, processes such as the feedback between drought and vegetation cover must be properly incorporated into groundwater models. Further research is needed to understand what the increase in actual groundwater recharge means for the freshwater resources in the dunes and for vegetation in wet dune slacks. In addition, the role of sea level rise and drinking water production in this context must be examined.

Auteurs

HENK KRAJENBRINK
KWR Water Research
henk.krajenbrink@kwrwater.nl

GIJSBERT CIRKEL
KWR Water Research
gijsbert.cirke@kwrwater.nl

RUUD BARTHOLOMEUS
KWR Water Research
ruud.bartholomeus@kwrwater.nl