

KWR 08.006

Februari 2008

Ecohydrologische gevolgen van klimaatverandering voor de kustduinen van Nederland



KWR 08.006

Februari 2008

Ecohydrologische gevolgen van klimaatverandering voor de kustduinen van Nederland

© 2008 Kiwa WR

Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag
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, zonder
voorafgaande schriftelijke
toestemming van de
uitgever.

Opdrachtgevers

Duinwaterbedrijf Zuid-Holland, PWN
Waterleidingbedrijf Noord-Holland en
Waternet

College van opdrachtgevers van Kiwa Water
Research

Projectnummers

30.7275.030

11.1614.030

Kiwa Water Research

Groningenhaven 7

Postbus 1072

3430 BB Nieuwegein

Telefoon 030 60 69 511

Fax 030 60 61 165

Internet www.kiwawaterresearch.eu



Duinwaterbedrijf Zuid-Holland



Colofon

Titel

Ecohydrologische gevolgen van klimaatverandering voor de
kustduinen van Nederland

Projectnummers

30.7275.030

11.1614.030

Projectmanager

H. van Oene

Kwaliteitsborger

C. Maas

Auteurs

J.P.M. Witte, R.P. Bartholomeus, D.G. Cirkel & P.W.T.J Kamps

Dit rapport is niet openbaar en slechts verstrekt aan de opdrachtgevers van het Contractonderzoekproject/adviesproject.
Eventuele verspreiding daarbuiten vindt alleen plaats door de opdrachtgever zelf.

Voorwoord

In Nederland zijn drinkwaterbedrijven verantwoordelijk voor het beheer van een groot areaal aan natuur. Dit geldt vooral voor de drie bedrijven die water winnen in de duinen: Duinwaterbedrijf Zuid-Holland, PWN Waterleidingbedrijf Noord-Holland en Waternet. Deze bedrijven hebben Kiwa Water Research de opdracht gegeven een verkennend onderzoek te verrichten naar de ecologische effecten van klimaatverandering. Bovendien werd vanuit het BTO-project Klimaat bijgedragen aan het onderzoek.

Doel van het onderzoek is niet alleen de mogelijke ecologische effecten van klimaatverandering te schetsen, maar vooral ook om leemten in kennis te signaleren. Dichten van deze leemten is nodig om tijdig via beleid en beheer te kunnen reageren op klimaatverandering.

Het onderzoek werd begeleid door een stuurgroep van de volgende personen:

Michiel Hootsmans (voorzitter; Waternet)
Hubert Kivit (PWN)
Leo van Breukelen (Waternet)
Harrie van der Hagen (DZH)
Karin Rood (DZH)

Daarnaast maakten de auteurs dankbaar gebruik van het deskundige commentaar van Philip Nienhuis, Theo Olsthoorn en Mark van Til, allen Waternet.

De lezer die alleen geïnteresseerd is in de resultaten van deze studie kan volstaan met de zelfstandig leesbare paragrafen 5.3 en 5.4.

De auteurs,
Nieuwegein, februari 2008

Inhoudsopgave

Voorwoord

Inhoudsopgave

Samenvatting

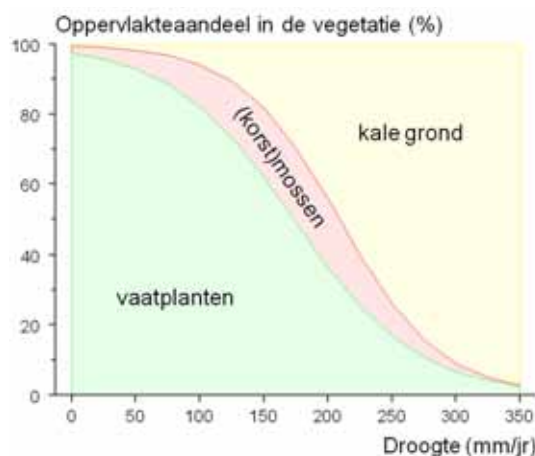
1	Inleiding	1
1.1	Aanleiding en doel van deze studie	1
1.2	Opzet rapport	2
2	Meteorologische gevolgen	3
2.1	Inleiding	3
2.2	Klimaatverandering in de duinen afwijkend?	4
2.3	Neerslag en referentieverdamping in 2050	9
3	Gevolgen voor het topsysteem	13
3.1	Inleiding	13
3.2	Droogte en kale grond in de duinen: waarnemingen	13
3.3	Een empirische relatie tussen droogte en bedekking	16
3.4	Droogte, bedekking en grondwateraanvulling in 2050	20
4	Gevolgen voor het grondwater	27
4.1	Inleiding	27
4.2	Correctiefactor c_3	27
4.3	Simulatie van de grondwaterhuishouding	29
4.4	Resultaten	30
4.5	Slot	31
5	Discussie	39
5.1	Inleiding	39
5.2	Evaluatie van de berekeningen	39
5.3	Gevolgen van klimaatverandering voor het duinecosysteem	45
5.4	Aanbevelingen voor nader onderzoek	48
	Geraadpleegde literatuur	53

Samenvatting

Door toename van de concentratie broeikasgassen in de atmosfeer zal, zo is de algemene opvatting onder wetenschappers, het klimaat op aarde veranderen. In deze verkennende studie is nagegaan wat de gevolgen daarvan zouden kunnen zijn voor de waterhuishouding en de vegetatie van de Nederlandse kustduinen. Tevens is geïnventariseerd wat de belangrijkste leemten in kennis zijn.

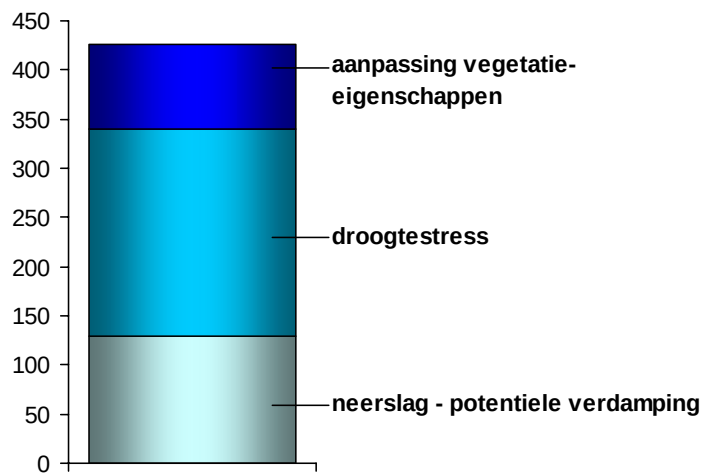
In de duinen blijkt er een nauwe wisselwerking te bestaan tussen bodem, water, atmosfeer en vegetatie. De door het KNMI voorspelde drogere zomers zullen mogelijk zorgen voor een stijging van zowel het aandeel kale grond, als het aandeel niet wortelende planten (mossen en korstmossen), zo blijkt uit de studie. Deze terugkoppeling van het weer op de vegetatie kan grote consequenties hebben voor, achtereenvolgens, de werkelijke verdamping, de grondwateraanvulling, en de stroming van grondwater. Dit heeft, op zijn beurt, gevolgen voor de erosie van duinen via verstuiving en de haalbaarheid van natuurdoelen. Indicatieve berekeningen in deze studie tonen aan dat in een van de KNMI klimaatscenario's (W+), het aandeel kale grond op zuidhellingen in 2050 zal zijn gestegen van 30% tot meer dan 80%. De duinvalleien zullen in 2050 waarschijnlijk iets natter zijn dan nu.

Het samenspel van klimaat, bodem, water en vegetatie is echter nauwelijks begrepen, laat staan goed gekwantificeerd. Dit betekent dat effecten op waterhuishouding en ecosystemen van natuurlijke variaties in het weer, nog niet goed kunnen worden voorspeld. Dit geldt nog meer voor de effecten van klimaatverandering. Onderzoek naar de relatie tussen weersgesteldheid, vegetatie-eigenschappen en verdamping wordt daarom dringend aanbevolen. Niet alleen om onder het huidige klimaat de juiste grondwateraanvulling te kunnen berekenen, zulk onderzoek is ook noodzakelijk om de hydrologische en ecologische gevolgen van klimaatverandering te kunnen voorspellen.



Het in deze studie gebruikte provisorische verband tussen de droogtegraad van de bodem en het aandeel in de vegetatie aan vaatplanten, korstmossen en mossen, en kale grond.

Grondwateraanvulling op zuidhelling (mm/jr)



De grondwateraanvulling onder scenario W+ op zuidhellingen in de Amsterdamse Waterleidingduinen. Volgens dit scenario zal in 2050 de jaarlijkse neerslag min potentiële verdamping 130 mm bedragen. Door droogtestress reduceert de verdamping zodat de grondwateraanvulling oploopt tot 340 mm/jaar. Twee aanpassingen van de vegetatie aan het nieuwe klimaat zorgen dat de grondwateraanvulling vervolgens stijgt tot 430 mm/jaar: een vermindering van de transpiratie ten gevolge van een hogere koolzuurgasconcentratie in de atmosfeer, en een daling van het aandeel (wortelende) vaatplanten.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en doel van deze studie

Door toename van de concentratie broeikasgassen in de atmosfeer zal, zo is de algemene opvatting onder wetenschappers, het klimaat op aarde veranderen. Voor Nederland publiceerde het KNMI onlangs vier klimaatscenario's die betrekking hebben op het jaar 2050 (Van den Hurk *et al.*, 2006). Deze scenario's verschillen in de mate van verandering, maar hebben gemeen dat de temperatuur en de potentiële verdamping stijgt en dat de hoeveelheid neerslag in de winter toeneemt. De voorspelde veranderingen kunnen grote gevolgen hebben voor de maatschappij en dan nopen tot aanpassingen in het landgebruik en het waterbeheer.

Wat klimaatverandering voor de natuur betekent, is nog verre van duidelijk. Op een globaal schaalniveau zal klimaatverandering natuurlijk leiden tot het verschuiven in de arealen van soorten: soorten van een warmer klimaat zullen toenemen terwijl soorten van een kouder klimaat, op de langere termijn, zullen verdwijnen. Voor de hogere planten in Nederland zijn zulke gevolgen van klimaatverandering onderzocht door Tamis (2005), terwijl 't Lam (2006) de gevolgen van temperatuurstijging heeft beschreven voor hogere planten, dagvlinders en libellen in de Nederlandse duinen. Volgens 't Lam (2007) is uitbreiding in noordelijke richting (+) of vestiging (*) in de Nederlandse duinen door temperatuurstijging inmiddels aannemelijk voor Bokkenorchis⁺, Dodemansvingers^{*}, Dwergvlas⁺, Franse silene⁺, Grijsz mosterd^{*}, Kleine majer⁺, Korenbloem⁺, Kuifhyacint⁺, Noordse rus⁺, Postelein⁺, Rond kaasjeskruid^{*}, Zeekool^{*} en Zeelathyrus^{*} (hogere planten), Aardbeivlinder⁺, Bont zandoogje⁺, Koninginnepage⁺, Landkaartje⁺ en Oranjetipje⁺ (dagvlinders), Zuidelijke glazenmaker^{*} en Zwervende heidelibel⁺ (libellen). Verdwenen door temperatuurstijging zouden zijn: Blauw kweldergras (plant), Grote vos (vlinder) en Noordse winterjuffer (libel). Zulke veranderingen hebben te maken met de directe invloed van temperatuur op het functioneren van organismen, bijvoorbeeld op de bestendigheid van planten tegen vorst en hitte, of op het uitlopen van bloemknoppen na het bereiken van een bepaalde temperatuursom (Noest *et al.*, 1995).

Het is echter aannemelijk dat de grootste effecten van klimaatverandering op de biodiversiteit optreden via wijzigingen in de waterhuishouding (Bazzaz *et al.*, 1996; Van Oene & Berendse, 2001). De hoeveelheid water die beschikbaar is voor transpiratie verandert, de hoeveelheid regen die doorzijpelt naar het grondwater (de grondwateraanvulling), en de kwel naar de duinvalleien. Deze veranderingen beïnvloeden op hun beurt de nutriëntenkringloop en de zuurgraad in de wortelzone.

Het is de vraag of natuurdoelen die via Europese wetgeving een verplichtend karakter hebben, nog wel kunnen worden gehaald (Vogel- en Habitatrichtlijn, Kaderrichtlijn Water). Mogelijk kunnen bedreigingen worden opgevangen en kansen voor natuurontwikkeling benut, indien tijdig, via beleid en beheer, op klimaatverandering wordt ingespeeld. Te denken valt aan het aanleggen van

hydrologische bufferzones tegen verdroging, het verplaatsen van winningen, berging van water in natte perioden, of het uitbreiden van het natuurareaal ter verhoging van de dispersiekansen van soorten.

In Nederland zijn drinkwaterbedrijven verantwoordelijk voor het beheer van een groot areaal aan natuur. Dit geldt vooral voor de drie bedrijven die water winnen in de duinen: Duinwaterbedrijf Zuid-Holland, PWN Waterleidingbedrijf Noord-Holland en Waternet. Deze bedrijven hebben Kiwa Water Research de opdracht gegeven een verkennend onderzoek te verrichten naar de ecologische effecten van klimaatverandering. Doel van dit onderzoek is niet alleen de mogelijke ecologische effecten van klimaatverandering te schetsen, maar vooral ook om leemten in kennis te signaleren. Inzicht in zulke leemten kan aanleiding zijn voor verder onderzoek. Uiteindelijk willen de bedrijven op een onderbouwde manier kunnen anticiperen op veranderingen in het klimaat, zowel ten behoeve van de waterproductie als de biodiversiteit in hun terreinen.

1.2 Opzet rapport

In dit onderzoek besteden we vooral aandacht aan te verwachten veranderingen in de waterhuishouding van duinen, en de effecten daar weer van op de duinvegetatie. Bovendien bestuderen we hoe de vegetatie via klimaatverandering de waterhuishouding van de duinen beïnvloedt. De studie hebben we in de titel daarom als ‘ecohydrologisch’ aangeduid.

In de volgende drie hoofdstukken bespreken we achtereenvolgens de compartimenten waarin watertransport plaats vindt: de atmosfeer, het ‘topsysteem’ en het grondwater. Effecten van klimaatverandering op de atmosfeer zijn onderzocht door het KNMI en worden door ons nader uitgewerkt voor de duinen (Hoofdstuk 2). Het gaat vooral om veranderingen in neerslag en in referentiegewasverdamping. Die referentiegewasverdamping hangt, het woord zegt het al, natuurlijk af van gewaseigenschappen, maar zegt toch vooral iets over de ‘atmosferische vraag’ en daarom wordt hij in Hoofdstuk 2 behandeld.

Het topsysteem (Hoofdstuk 3) bestaat uit de bovenste bodemlaag, waaruit planten water onttrekken, en de vegetatie. Deze laag fungeert als een huid van de aarde die de verdamping reguleert en die uiteindelijk bepaalt hoeveel van de neerslag overblijft om het grondwater aan te vullen. De stroming van grondwater en de hoogte van de grondwaterspiegel (Hoofdstuk 1) worden gedreven door deze grondwateraanvulling, maar ook door de afvoer van grondwater naar kwelgebieden, kanalen of winputten.

Na deze drie hydrologisch georiënteerde hoofdstukken zullen we in Hoofdstuk 5 bespreken wat de mogelijke gevolgen van klimaatverandering zijn voor de biodiversiteit van het duinecosysteem. In dit afsluitende discussiehoofdstuk vatten we tevens de belangrijkste resultaten samen en doen we aanbevelingen voor nader onderzoek.

2 Meteorologische gevolgen

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt onderzocht hoe klimaatverandering invloed kan hebben op neerslag en referentiegewasverdamping in de kustduinen van Nederland. Als eerste wordt, in § 2.2, verkend of klimaatverandering in de duinen anders zal uitpakken dan in de rest van Nederland. Bij ecologen van de DPW-bedrijven bestaat namelijk de indruk dat de vegetatie steeds meer dichtgroeit, ondanks klimaatverandering en een recente reeks van warme jaren (2003-2006). Vanuit deze indruk is de vraag ontstaan of klimaatverandering voor de duinen anders zal verlopen dan voor de rest van Nederland. Indien dit het geval is, kunnen de klimaatscenario's van het KNMI niet zo maar worden toegepast op de duinen.

Daarna, in § 2.3, onderzoeken we wat klimaatverandering betekent voor neerslag en verdamping in de duinen. Het KNMI heeft in 2006 vier klimaatscenario's gepresenteerd, met veranderingen in temperatuur, neerslag P en referentieverdamping ET_{ref} . De afkorting ET komt van 'evapotranspiratie', een term die aangeeft dat de verdamping is samengesteld uit twee termen: de verdamping vanuit de bodem en van natte oppervlakken, zoals regendruppels op bladeren, de evaporatie, en de verdamping via de huidmondjes en (een beetje) de cuticula van de planten, de transpiratie. In dit rapport wordt, wanneer dit geen aanleiding tot misverstanden kan geven, de term 'verdamping' soms gebruikt als synoniem voor 'evapotranspiratie'.

Het KNMI berekent voor verscheidene weerstations in Nederland de Makkink-verdamping. Deze referentiegewasverdamping komt overeen met de verdamping van een ziektevrije korte grasmate die voorzien wordt van voldoende nutriënten en zoet water; het is per definitie de potentiële verdamping van een dergelijk hypothetische grasmate. De potentiële verdamping van andere vegetaties (c.q. gewassen) wordt verkregen door de referentiegewasverdamping te vermenigvuldigen met een gewasfactor:

$$ET_p = g \times ET_{ref} \quad [2.1]$$

waarin (tussen haakjes de gangbare eenheid):

ET_p potentiële evapotranspiratie van de vegetatie (mm d⁻¹)

g gewasfactor (-)

ET_{ref} referentiegewasverdamping volgens Makkink (mm d⁻¹)

In de scenario's van het KNMI is de verandering in ET_{ref} volledig gebaseerd op de verwachte temperatuurstijging. Waar we in deze studie echter ook rekening mee willen houden, is dat de vegetatie bij hogere CO₂-concentraties minder water verliest via transpiratie. We komen daar straks, in § 2.3, op terug. In de voor een klimaatscenario berekende potentiële verdamping dient met beide effecten rekening te worden gehouden, dus zowel met het door het KNMI berekende temperatuureffect, als met het zogenaamde CO₂-effect. Voor de hydrologische modellering kan dit als volgt worden gedaan:

$$ET_p^* = c_1 \times c_2 \times g \times ET_{ref} \quad [2.2]$$

Waarin:

ET_p^* potentiële evapotranspiratie van de vegetatie, gecorrigeerd voor zowel het temperatuureffect als het CO₂-effect (mm d⁻¹)

c_1 factor voor het temperatuureffect (-)

c_2 factor voor het CO₂-effect (-)

In § 2.3 worden waarden voor beide correctiefactoren (c_1 en c_2) gegeven.

2.2 Klimaatverandering in de duinen afwijkend?

2.2.1 Aanpak

Dat het weer in de kuststrook afwijkt van de rest van Nederland, is genoegzaam bekend: aan de kust schijnt langer de zon, waait het harder en is de potentiële verdamping navenant hoger. Waar het om echter om gaat, is of de klimatologische verandering in de duinen anders uitpakt dan in de rest van Nederland. Of bijvoorbeeld de 2.8% toename in zomerneerslag die het KNMI voorspelt in een van haar scenario's, ook 2.8% is voor de duinen, of een ander percentage, bijvoorbeeld 1% of 5%. Indien er sprake is van zulke systematische verschillen, dienen de klimaatscenario's van het KNMI hiervoor te worden gecorrigeerd alvorens ze toe te passen op de duinen.

Voor de beantwoording van deze vraag zouden aan klimaatsverandering toegeschreven structurele trends in langjarige meetreeksen van weerstations in de duinen kunnen worden vergeleken met die in het binnenland. Over het signaleren van structurele trends breken wetenschappers zich echter al het hoofd, en om dan te proberen verschillen te vinden in trends tussen stations, is te veel van het goede binnen deze beknopte studie. De inzet van ruimtelijke klimatologische modellen is binnen dit onderzoek volstrekt onhaalbaar. We zullen de vraag daarom op een andere wijze moeten zien te beantwoorden.

Wat we in dit hoofdstuk doen, is onderzoeken of de variaties tussen de jaren in de duinen systematisch verschillen van die in het binnenland: of bijvoorbeeld een droge zomer te De Bilt, ook een droge zomer in de Amsterdamse waterleidingduinen (AWD) betekent, of juist een natte zomer. Tevens beoordelen we 'op het oog' of het klimaat in het binnenland steeds droger wordt, terwijl het in de duinen juist natter wordt, een veronderstelling die ten grondslag ligt aan de in § 2.1 genoemde indruk van de duinecologen.

2.2.2 Meetgegevens

Voor de studie maken we gebruik van meetgegevens, uit de periode 1960-2006, van neerslag en referentieverdamping bij zowel De Bilt als bij de AWD. De neerslagmeter van de AWD ligt ten westen van de hoofdingang, enkele honderden meters van het strand (kilometercoördinaten 594.45, 484.75). De referentieverdamping voor de AWD is door Waternet kunstmatig samengesteld uit metingen te Vlissingen en te De Kooy (Den Helder) (namelijk 2/5 Vlissingen + 3/5 De Kooy).

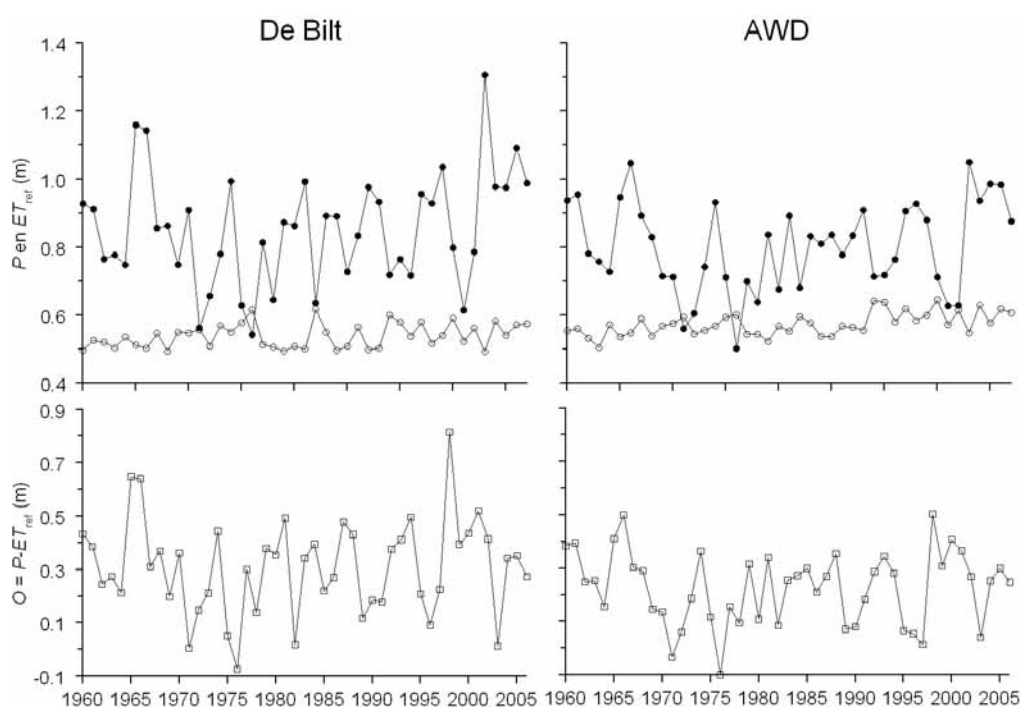
De verdampingsreeks van de AWD bestaat in de periode 1960-1986 uit waarden volgens Penman (benadering voor de verdamping van open water) en in de periode daarna uit waarden volgens Makkink (voor de potentiële verdamping van een grasland). De 'De Bilt reeks' bevat alleen waarden volgens Makkink. De Penman waarden uit de AWD reeks zijn omgezet in Makkink waarden via deling door een factor 1.27 (Hooghart & Lablans, 1988):

$$ET_{\text{ref}} = ET_{\text{Penman}} / 1.27 \quad [2.3]$$

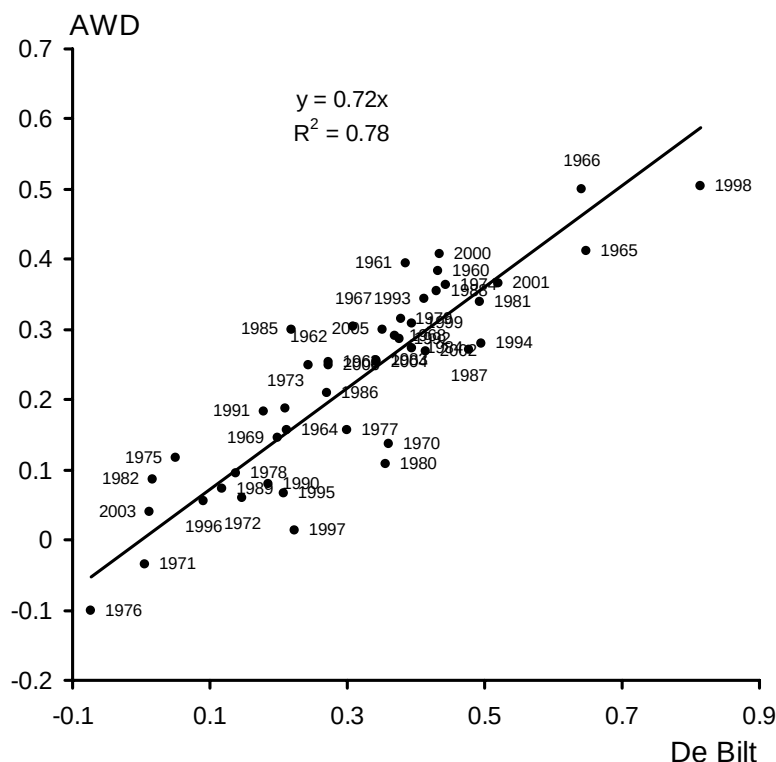
2.2.3 Analyse en resultaten

Voor ieder jaar is eerst, door sommatie, de totale neerslag P en verdamping ET_{ref} bepaald, zowel voor het hele jaar, de zomer (juni, juli augustus) als de winter (december, januari, februari) (indeling in zomer en winter volgt die van de KNMI-scenario's; Van den Hurk *et al.*, 2006). Daarna is voor ieder van deze drie perioden het potentiële neerslagoverschot O berekend, $O = P - ET_{\text{ref}}$. Het potentiële neerslagoverschot is een maat voor de droogtegraad van een periode: hoe lager dit getal, des te droger.

Figuur 2-1 toont het tijdsverloop over de jaren 1960-2006 van de jaarsommen van de drie grootheden P , ET_{ref} en O , zowel voor De Bilt als de AWD. In Figuur 2-2 is het jaarlijkse neerslagoverschot van De Bilt uitgezet tegen dat van de AWD. De AWD blijkt, op jaarbasis, een droger klimaat te hebben. Dit komt zowel doordat er te De Bilt meer neerslag valt (gemiddeld 853 mm /jr tegenover 804 mm /jr voor de AWD), als doordat de referentieverdamping er lager is (543 mm /jr versus 578 mm /jr).



Figuur 2-1. Neerslag P en referentieverdamping ET_{ref} (boven) en potentieel neerslagoverschot $O = P - ET_{\text{ref}}$ (beneden) voor De Bilt (links) en de AWD (rechts) over de jaren 1960-2006.

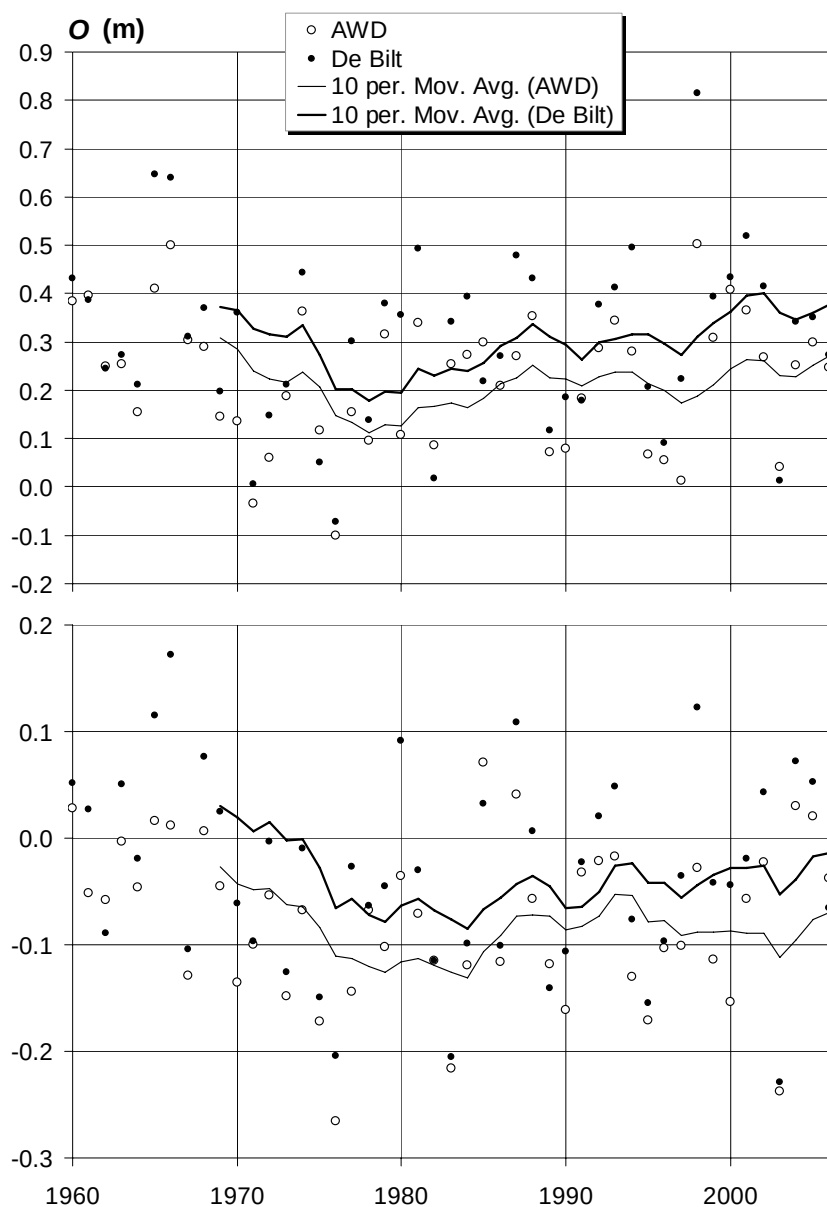


Figuur 2-2. Vergelijking tussen het potentiële neerslagoverschot $O = P - ET_{ref}$ (m) op jaarbasis van De Bilt en de AWD.

Gemiddeld valt het neerslagoverschot in de AWD 28% lager uit dan in De Bilt ($O_{AWD} = 0.72 \times O_{Bilt}$, $R^2 = 0.78$). In de rangorde van jaren is echter geen systematisch verschil aanwezig: 1971, 1976 en 2003 waren voor beide locaties zeer droog, en 1965, 1966 en 1998 voor beide locaties zeer nat. Spearmans correlatiecoëfficiënt tussen de locaties op basis van het neerslagoverschot is dan ook hoog: $R_s = 0.87$. De variatie in het neerslagoverschot in de AWD is wat kleiner dan te De Bilt, wat logisch is gezien de nabijheid van de kust (gematigder klimaat, minder landklimaat).

Ook als we zomer en winter apart beschouwen blijkt dat de AWD een systematisch droger klimaat heeft, maar dat er geen systematisch verschil met De Bilt bestaat in de rangorde der jaren (zomer: $O_{AWD} = 0.72O_{Bilt} - 0.05$, $R^2 = 0.78$, $R_s = 0.89$; winter: $O_{AWD} = 0.70O_{Bilt} + 0.03$, $R^2 = 0.82$, $R_s = 0.90$).

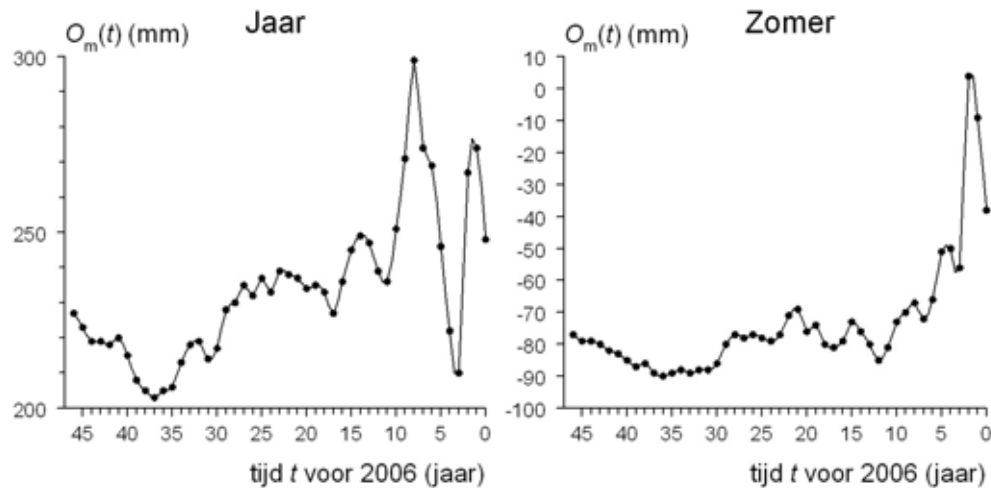
Of er een trend is waar te nemen in de droogtegraad der jaren, beoordelen we alleen visueel aan de hand van tijdreeksen van het potentieel neerslagoverschot, zie Figuur 2-3. Vanaf de zeventiger jaren van de vorige eeuw is er sprake van een geleidelijke toename van het neerslagoverschot, zowel te De Bilt als te AWD en zowel in de zomer als over het hele jaar bezien. Het tienjarig voortschrijdend gemiddelde in Figuur 2-3 wordt de laatste jaren echter naar beneden getrokken door het extreem droge jaar 2003. Dat laat onverlet dat het steeds natter lijkt te worden in de duinen.



Figuur 2-3. Potentiële neerslagoverschot $O (=P - ET_{ref})$ (m) op jaarbasis (boven) en in de zomer (juni, juli, augustus) (onder) van De Bilt en de AWD (1960-2006). De doorgetrokken lijnen zijn de tienjarig-voortschrijdend gemiddelden.

Het is bekend dat een vegetatie de weerslag vormt van weerscondities over meerdere jaren, maar hoe lang de periode is om een voor de vegetatie karakteristiek gemiddelde te berekenen, is nimmer onderzocht. Vanuit de vegetatie van 2006 kunnen we echter terug redeneren welk overschot deze gemiddeld heeft 'ervaren' over het voorgaande jaar, de voorgaande twee jaren, de voorgaande drie jaren, etc. Deze aanpak is gekozen voor Figuur 2-4, waarin het gemiddelde potentiële neerslagoverschot O_m is uitgezet tegen het aantal jaren, voorafgaand aan 2006, waarover dit gemiddelde is berekend. Figuur 2-4 biedt de mogelijkheid het gemiddelde overschot in perioden van verschillende lengten voorafgaand aan 2006 af te lezen, variërend van 0 jaar

(2006) tot en met 47 jaar (gemiddelde over 1960-2006). Natuurlijk nemen de fluctuaties toe naarmate het overschot over een kortere periode t wordt berekend, maar berekeningen op jaarbasis (linker figuur) tonen een stijgende trend in het overschot, die alleen onderbroken wordt door 2003. Beschouwen we de gemiddelden van de zomer (rechter figuur), dan is de trend nog sterker: voor de vegetatie is het steeds natter geworden. Zie ook Tabel 2-1.



Figuur 2-4. Gemiddeld potentieel neerslagoverschot $O_m = P - ET_{ref}$ berekend over een periode t jaar voor 2006, voor het hele jaar (links) en voor de zomermaanden (juni, juli, augustus) (rechts).

Tabel 2-1. Gemiddeld potentieel neerslagoverschot $O = P - ET_{ref}$ (mm) van de AIVD, zowel op jaarbasis als voor de zomer (juni, juli, augustus), gebaseerd op meetreeksen van verschillende lengte: 47 jaar (1960-2006), de afgelopen 10 jaar (1997-2006) en de afgelopen 5 jaar (2002-2006). Negatieve waarden (zomer) duiden op een verdampingsoverschot.

	Jaar	Zomer (JJA)
1960-2006	227	-77
1997-2006	271	-70
2002-2006	222	-50

2.2.4 Conclusies

Er is geen reden aan te nemen dat klimaatsverandering in de duinen anders zal uitpakken dan in de rest van Nederland. Klimaatscenario's kunnen dus voorlopig (deze studie was beperkt) ongecorrigeerd worden toegepast.

Dat de duinen aan het dichtgroeien lijken te zijn (waarneming ecologen DPW-bedrijven) kan best te maken hebben met het natter worden van het klimaat, sinds de jaren zeventig van de vorige eeuw. Andere verklaringen zijn echter ook denkbaar, zoals bodemsuccesie en de afname van de graasdruk van konijnen.

2.3 Neerslag en referentieverdamping in 2050

2.3.1 KNMI scenario's

Het KNMI heeft in 2006 vier nieuwe klimaatscenario's voor 2050 gepubliceerd (Van den Hurk *et al.*, 2006). Deze zijn gedefinieerd aan de hand van twee criteria, waarbij elk criterium twee toestanden kan aannemen (Figuur 2-5): ten eerste wereldwijde temperatuurstijging, die gematigd kan zijn, G (1 °C) of 'warm, W (2 °C) en ten tweede verandering in de luchtcirculatie, die zwak kan zijn of sterk, +. In het laatste geval krijgt Nederland te maken met meer oostenwind. Als referentie dient de periode 1976-2006, aangeduid als '1990'.

De gevolgen van deze scenario's voor onder andere temperatuur, neerslag en potentiële verdamping zijn onderzocht aan de hand van wereldwijde en 'regionale' klimaatmodellen en gemeten tijdreeksen. De auteurs hebben voor de drie zomer- en de drie wintermaanden verandering in neerslag en potentiële verdamping van alle vier de scenario's gegeven, zie Tabel 2-2. Voor de scenarioanalyses die we in deze studie willen uitvoeren zijn echter meteorologische gegevens over het hele jaar nodig, het liefst op dagbasis.

		temperatuurstijging 1990 t.o.v. 2050	
		1 °C	2 °C
luchtcirculatie	veranderd	G +	W +
	onveranderd	G	W

Figuur 2-5. Definitie van vier klimaatscenario's (Van den Hurk *et al.*, 2006).

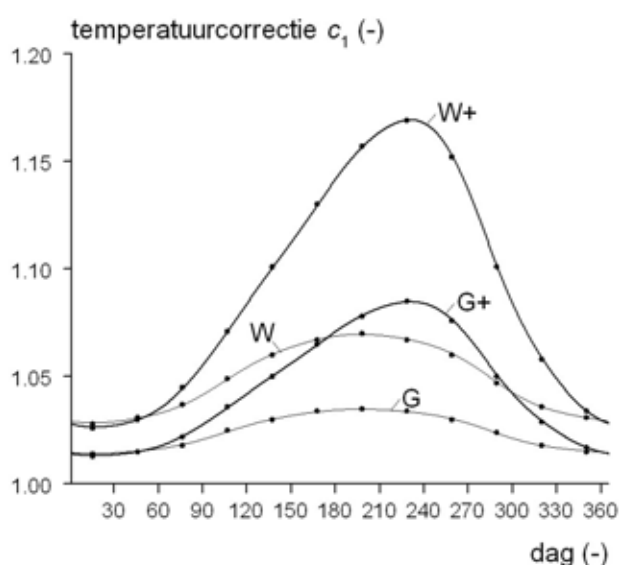
Tabel 2-2. Gevolgen, uitgedrukt als factoren ten opzichte van de huidige waarde, van de vier klimaatscenario's (2050) voor neerslag en potentiële verdamping in Nederland, uitgesplitst naar drie zomermaanden (juni, juli en augustus) en drie wintermaanden (december, januari, februari) (Van den Hurk *et al.*, 2006, p. 59).

		KNMI scenario			
		G	W	G ⁺	W ⁺
Zomer (JJA)					
	neerslag	1.028	1.055	0.905	0.810
	potentiële verdamping (c _i)	1.034	1.068	1.076	1.152
Winter (DJF)					
	neerslag	1.036	1.073	1.070	1.142

Door Alexander Bakker van het KNMI werd een computerprogramma beschikbaar gesteld dat ons in staat stelde neerslagreeksen te transformeren naar reeksen voor het toekomstige klimaat (Anonymus, 2007). Bij deze transformatie wordt niet alleen rekening gehouden met veranderingen in de hoeveelheid neerslag, maar ook met veranderingen in de verdeling van de intensiteit van neerslagbuien. De in § 2.2.2 besproken neerslagreeksen hebben we getransformeerd naar reeksen voor de vier scenario's. In de reeks 1960-2006 (aangeduid als H, van 'huidig'), en de daarvan afgeleide reeksen (voor G, W, G+ en W+) zit dus alle weersvariatie binnen een jaar en tussen de jaren besloten.

Recent zijn door het KNMI correctiefactoren c_1 uitgebracht om de verandering van de potentiële verdamping voor de vier scenario's per maand te berekenen (Lenderink, 2006). Deze maandfactoren hebben we geïnterpoleerd tot dagfactoren. Het resultaat, correctiefactoren c_1 voor het temperatureffect van klimaatverandering op de verdamping, is weergegeven in Figuur 2-6.

Door klimaatsverandering zal de zeespiegel in 2050 ten opzichte van 1990 zijn gestegen met 15-25 cm (G) tot 20-35 cm (W), aldus Van den Hurk *et al.* (2006).



Figuur 2-6. Verandering, uitgedrukt als factor c_1 ten opzichte van de waarde in de referentieperiode (1990) van de potentiële verdamping voor de vier klimaatscenario's van het KNMI. Maandelijks waarden (punten) ontleend aan Lenderink (2006).

2.3.2 Directe effecten van CO₂ op verdamping; factor c_2

In de berekeningswijze van de verdamping door het KNMI is geen rekening gehouden met het feit dat de vegetatie bij hogere CO₂-concentraties anders met water omgaat. Enerzijds gaan door een hogere CO₂-concentratie planten meer biomassa produceren, waardoor hun bladoppervlak (Leaf Area Index of LAI) toeneemt en daarmee hun verdamping. Anderzijds kunnen planten bij hogere CO₂-concentraties makkelijker voldoen aan hun C-behoefte, zodat zij hun huidmondjes minder hoeven te openen of minder huidmondjes hoeven aan te maken en hun transpiratie wordt gereduceerd. Beide effecten

gecombineerd noemen wij het CO₂-effect van klimaatverandering op de verdamping, afgekort CO₂-effect.

Het CO₂-effect is onlangs gekwantificeerd voor verschillende begroeiingstypen (Witte *et al.*, 2006; Kruit *et al.*, 2007), zie Tabel 2-3. Het Leaf-Area-Index-effect bleek verwaarloosbaar te zijn, zodat toename van CO₂ alleen leidt tot een reductie van de verdamping. Voor de duinen is in Tabel 2-3 vooral de begroeiingscategorie 'Grasland, voedselarme droge gebieden' van belang, met een gemiddelde correctie van $c_2 = 0.98$.

Tabel 2-3. Factor c_2 voor de correctie van de potentiële verdampingscijfers ET_p (volgens vergelijking [2.2]) voor 2050 (CO₂-concentratie 150 ppm hoger). Gegeven zijn de geschatte minimale (min), gemiddelde (gem) en maximale verdampingsreductie (max). Bron: Witte *et al.* (2006).

	jaar			zomer			winter		
	min	gem	max	min	gem	max	min	gem	max
1. Grasland, voedselarme droge gebieden*	0.99	0.98	0.97	0.99	0.98	0.97	0.99	0.98	0.97
2. Loofbos, struweel, C ₄ -gewas	0.98	0.96	0.94	0.98	0.95	0.92	1.00	0.99	0.99
3. Overige akker, naaldbos	0.98	0.97	0.95	0.97	0.96	0.94	1.00	0.99	0.99
4. Overige natuur	0.97	0.96	0.94	0.97	0.96	0.94	0.97	0.96	0.94

*droge hei, duinen.

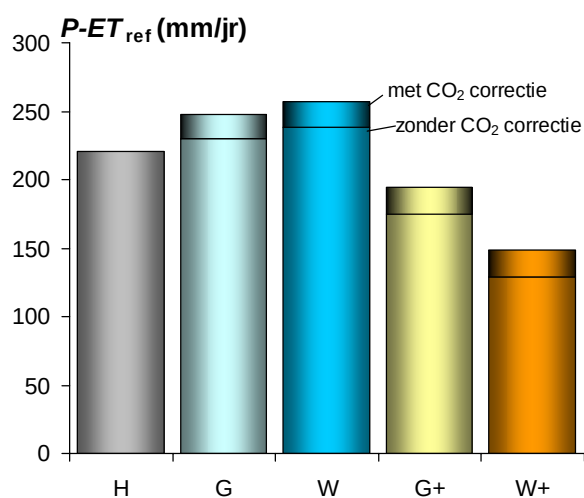
2.3.3 Samenvattend overzicht van 8 scenario's

We hebben voor deze studie dagcijfers voor neerslag en verdamping over 1960-2006 gebruikt. De herkomst van deze gegevens is in § 2.2.2 besproken. Deze reeksen van 47 jaar lang zijn getransformeerd naar reeksen voor het klimaat in 2050 voor in totaal 8 scenario's. Dit zijn de 4 scenario's van het KNMI, aangevuld met een maximale correctie voor het CO₂-effect ($c_2 = 0.97$, zie § 2.3.2). De resultaten van deze exercitie zijn samengevat in Tabel 2-4. Het jaarlijkse potentiële neerslagoverschot is tevens weergegeven in Figuur 2-7.

KNMI-scenario W+ zonder correctie voor het CO₂-effect ($c_2 = 1.00$) is volgens de tabel het droogste scenario, met een gemiddelde afname van het potentiële neerslagoverschot van maar liefst 42%. Wat voor de grondwateraanvulling en dus de toestroming van kwelwater naar de duinvalleien het natste scenario is, kan niet uit Tabel 2-4 worden opgemaakt. Op basis van Tabel 2-4 lijkt de combinatie W-0.97 het natste scenario, omdat dit de hoogste toename van het gemiddelde potentiële overschot geeft: +16%. Het werkelijke overschot zou echter bij de combinatie W-1.00 hoger uit kunnen pakken. De afname van het neerslagoverschot in de zomer met 11% zorgt er immers voor dat het percentage kale grond gaat toenemen. Daardoor daalt de werkelijke verdamping en stijgt het werkelijke neerslagoverschot op jaarbasis met meer dan de 8% die in de tabel vermeld staat, misschien wel met meer dan 16%. In § 3.4 zullen we voor alle scenario's het werkelijke neerslagoverschot berekenen.

Tabel 2-4. Het potentiële neerslagoverschot in de AWD voor de vier klimaatscenario's van het KNMI (G, G+, W, W+) en twee opties voor het CO₂-effect: geen verdampingsreductie ($c_2 = 1.00$) en maximale verdampingsreductie ($c_2 = 0.97$). Voor zowel het hele jaar als zomer (juni, juli, augustus) en winter (december, januari, februari) zijn gegeven, van onder naar boven: neerslag P , referentieverdamping E_{ref} , potentieel neerslagoverschot $P - E_{\text{ref}}$ en verandering van het potentieel neerslagoverschot ten opzichte van de huidige situatie, $\Delta(P - E_{\text{ref}})$. Gebaseerd op tijdreeksen van 1960 t/m 2006.

		Scenario							
		$c_2 = 1.00$				$c_2 = 0.97$			
	Huidig	G	W	G+	W+	G	W	G+	W+
P (mm)									
zomer	197	202	207	178	158	202	207	178	158
winter	191	197	204	204	218	197	204	204	218
jaar	803	829	854	791	780	829	854	791	780
E_{ref} (mm)									
zomer	279	288	298	300	321	280	289	291	311
winter	31	32	32	32	32	31	31	31	31
jaar	582	599	616	616	651	581	597	598	631
$P - E_{\text{ref}}$ (mm)									
zomer	-82	-86	-90	-122	-163	-77	-82	-113	-153
winter	160	166	172	172	186	167	173	173	187
jaar	221	230	238	175	129	248	257	194	149
$\Delta(P - E_{\text{ref}})$ (%)									
zomer	0	-5	-11	-49	-99	5	0	-38	-87
winter	0	4	8	8	16	4	8	9	17
jaar	0	4	8	-21	-42	12	16	-12	-33



Figuur 2-7. Potentiële neerslagoverschot (neerslag P minus referentieverdamping E_{ref}) op jaarbasis van de klimaatscenario's, met en zonder correctie voor het CO₂-effect. Ter vergelijking is ook het overschot voor de huidige situatie H gegeven.

3 Gevolgen voor het topsysteem

3.1 Inleiding

In het vorige hoofdstuk is beschreven hoe neerslag P en referentie-verdamping ET_{ref} in 2050 kunnen zijn veranderd. De werkelijke verdamping van de vegetatie hangt niet alleen af van de atmosferische vraag, zoals die tot uitdrukking komt in ET_{ref} , maar ook van het type vegetatie en de hoeveelheid water die beschikbaar is om te kunnen verdampen. Deze hoeveelheid wordt bepaald door de grondwaterstand en bodemfysische eigenschappen. De bovenste bodemlaag, waaruit planten hun wortels halen, en de vegetatie fungeren als één systeem, het topsysteem, dat de verdamping reguleert.

Door te droge omstandigheden reduceert de vegetatie de transpiratie door het sluiten van de huidmondjes of het afsterven van plantendelen. Hier willen we echter ook nog een verandering van de vegetatie door klimaatverandering onderzoeken: de vorming van kale grond. Kale grond verdampt veel minder dan een gesloten vegetatie: de verdamping van een gesloten en ‘gezonde’ grasmat bedraagt ongeveer 550 mm/jr, terwijl kaal duinzand circa 200 mm/jr aan de atmosfeer verliest (Peña, 2003, in een analyse van de lysimeters van Castricum, 1942-1971). Mochten de zomers door klimaatverandering veel droger gaan worden, dan zou een toename van het aandeel kale grond in de duinen wel eens van grote invloed kunnen zijn op de werkelijke verdamping, en daarmee ook op de grondwateraanvulling en dus de grondwaterhuishouding. In § 3.3 doen we een poging het aandeel kale grond te beschrijven als functie van meteorologische en bodemfysische condities.

De werkelijke verdamping kan alleen berekend worden met bodemvochtmodellen, zoals SWAP (Van Dam, 2000; Van Dam *et al.*, 1997; Kroes & Van Dam, 2003). Dit zal worden gedaan in § 3.4.

3.2 Droogte en kale grond in de duinen: waarnemingen

Een van de gevolgen van meer droogte kan zijn dat het aandeel kale grond in de vegetatie toeneemt. In extreme vorm zien we het effect van droogte in zandwoestijnen terug, waar het zo droog is dat begroeiing nagenoeg ontbreekt. Op het oog kunnen we waarschijnlijk de effecten van droogte op het aandeel kale grond echter ook in de huidige duinen waarnemen: de zuidhellingen ontvangen meer straling, verdampen dus meer en zijn daardoor kaler (Figuur 3-1, Figuur 3-2). Het gaat hier weliswaar om een relatie tussen bedekking en microklimaat, maar voor de vegetatie maakt dat weinig uit.

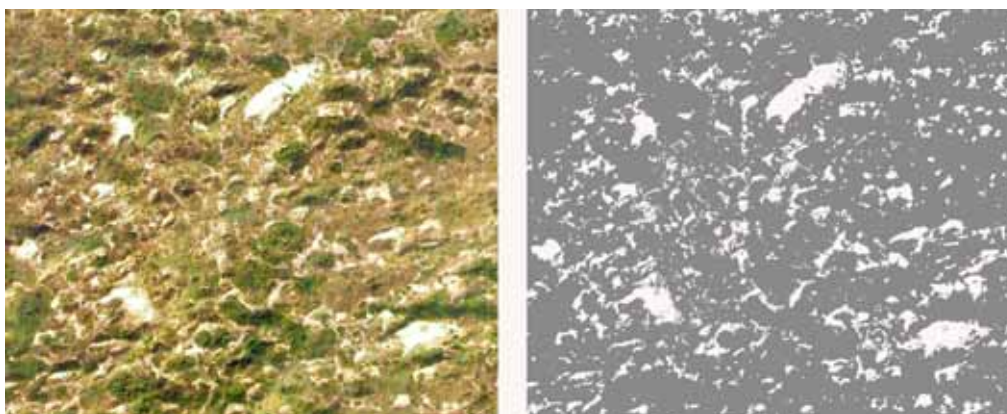
Ook waarnemingen in de tijd ondersteunen de hypothese dat er in de duinen een relatie bestaat tussen droogte en bedekking: ecologen van de drie DPW-bedrijven zien dat de duinen de afgelopen tien jaar steeds dichter zijn gegroeid, wat correspondeert met een toename van het neerslagoverschot. In maanden van droogte ontstaat, vooral in het voorduin, al snel wat

kleinschalige dynamiek, aldus Harrie van der Hagen en Hans Lucas van DZH.

Het effect van het (micro)klimaat op vegetatiebedekking blijkt ook uit een door ons uitgevoerde analyse van 324 vegetatieopnamen in de AWD (Van Til & Mourik, 1999). Bij deze opnamen hebben de veldonderzoekers niet alleen de totale bedekking vermeld, maar ook de expositie ten opzichte van de zon aangegeven op een schaal van 16 windrichtingen: N, NNO, NO, ONO, etc. Uit deze gegevens berekenden wij de gemiddelde bedekking per windrichting, zie Tabel 3-1. Onderscheid is daarbij gemaakt tussen alle opnamen, en opnamen met een korte structuur. Op basis van Tabel 3-1 is de bedekking ook weergegeven in de vorm van een windroos (Figuur 3-3). Omdat sommige windrichtingen te weinig waarnemingen bevatten zijn klassen in Tabel 3-1 samengevoegd: NNW en NNO bij N, ONO en OZO bij O, ZZO en ZZW bij Z, en ten slotte WZW en WNW bij W. De klassen NO, ZW, ZW en NW werden dus ongemoeid gelaten. Op basis van de vegetatiebeschrijvingen bij de veldwaarnemingen zijn opnamen met een korte vegetatiestructuur geselecteerd, waarvan apart de gemiddelde bedekking is berekend (Tabel 3-1) en in de windroos weergegeven (Figuur 3-3).



Figuur 3-1. Twee foto's in de AWD, vlak na elkaar genomen vanaf dezelfde plek: links naar het zuiden gericht zodat de noordhellingen zichtbaar zijn, rechts naar het noorden gericht, met zicht op de zuidhellingen. Foto: Ruud Bartholomeus, 5 juni 2007.

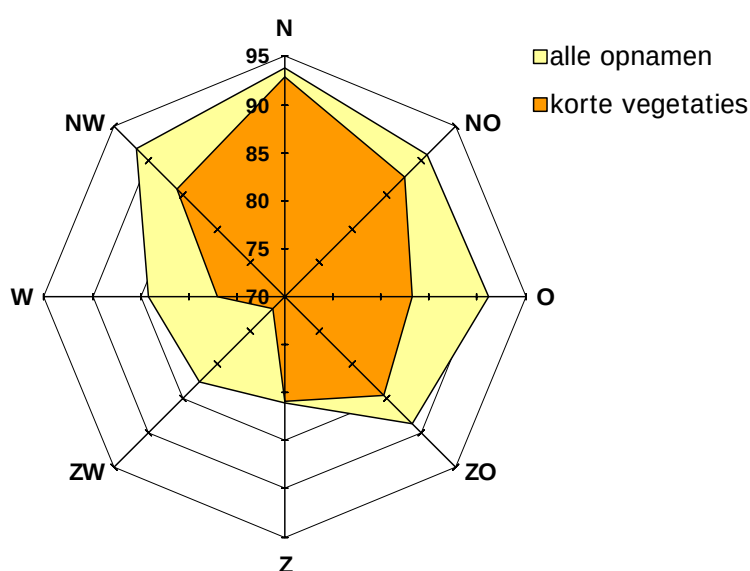


Figuur 3-2. Links: luchtfoto van een gebied ter grootte van 700×600 m in het zuiden van de AWD, ontleend aan GoogleEarth. Rechts: op het oog zijn met Photoshop de pixels volledig kaal zand geclassificeerd (met 'toverstafje', tolerantie op 50%). Het bleek om 14% van de ruim 130 000 pixels te gaan, aan de schaduwen te zien vooral ten zuiden van de heuvels.

Tabel 3-1. Gemiddelde totale bedekking $\bar{B}$ (in procenten) als functie van de windrichting WR, gebaseerd op alle 324 vegetatieopnamen met windrichtingaanduiding in de AWD (Alle), en alleen de 158 opnamen met een korte vegetatiestructuur (Kort).

WR	Alle		Kort		WR	Alle		Kort	
	#	$\bar{B}$ (%)	#	$\bar{B}$ (%)		#	$\bar{B}$ (%)	#	$\bar{B}$ (%)
N	66	93	32	92	Z	23	81	14	81
NNO	6	95	3	98	ZZW	0		0	
NO	15	91	8	88	ZW	24	83	13	72
ONO	3	97	3	97	WZW	1	90	1	90
O	28	90	13	80	W	37	83	20	75
OZO	2	98	0		WNW	2	98	1	100
ZO	27	89	16	85	NW	73	92	26	86
ZZO	3	82	3	82	NNW	14	97	5	94

Zoals mocht worden verwacht is in Figuur 3-3 de bedekking van de vegetatie op de zuidhellingen lager dan die van de noordhellingen. Bedacht moet daarbij worden dat de locaties van de vegetatieopnamen niet 'random' zijn geselecteerd en dat volledig kale plekken (duidelijk zichtbaar in Figuur 3-1, rechts, en Figuur 3-2) zullen zijn overgeslagen door de vegetatiekundigen. Dat betekent dat de werkelijke gemiddelde bedekking op zuidhellingen lager zal zijn dan volgens Figuur 3-3.

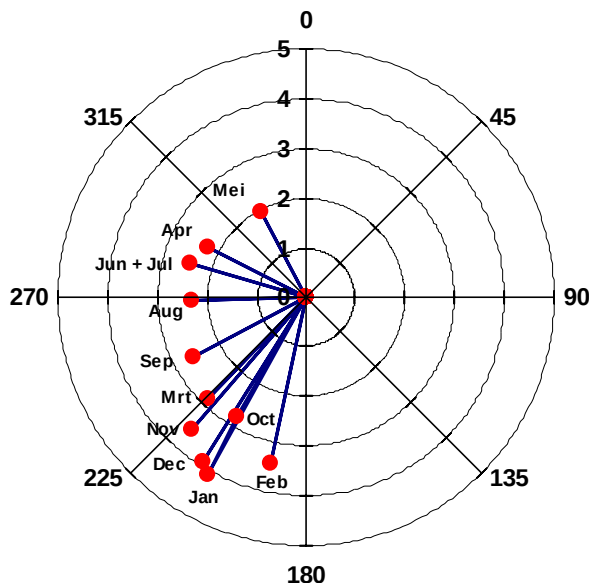


Figuur 3-3. Bedekking als functie van windrichting, gebaseerd op 324 opnamen uit de AWD ('alle opnamen') en een selectie daaruit van 158 opnamen met een korte vegetatiestructuur ('korte vegetaties').

Figuur 3-3 lijkt ook te suggereren dat niet alleen de zuidhellingen relatief droog zijn, maar ook de west- en zuidwesthellingen. Dit kan verklaard worden uit de overheersende windrichting in de zomermaanden, die dan westelijk is (Figuur 3-4). Wind verhoogt de verdamping doordat het vochtige lucht afvoert. De expositie ten opzichte van de wind kan ook van invloed zijn op de verdeling van de neerslag over de lij- en de loefzijde van het duin, maar we hebben niet kunnen achterhalen op welke manier. Bestaande modellen voor het bodem-water-plant-atmosfeer-systeem, houden geen rekening met dergelijke kleinschalige variatie in klimatologische omstandigheden, die echter ecologisch relevant kunnen zijn.

Een andere verklaring voor het hogere aandeel kaal zand op de zuid- en zuidwesthellingen, is dat van die hellingen meer zand erodeert. Het is dan niet de droogte die voor kale grond zorgt, maar de overheersende windrichting. Het geërodeerde zand sedimenteert echter aan de lijzijde van het duin, op de noord- en noordwesthellingen, waar dan vervolgens ook kaal zand zou moeten ontstaan (omdat noordhellingen steiler zijn, is hun oppervlakte echter kleiner). Bovendien kan droogte positief terug koppelen op de vorming van kale grond: droogte zorgt voor kale grond; kale grond wakkert de erosie aan, wat tot nog meer kale grond leidt.

Hoe kale grond tot stand komt is, al met al, niet eenvoudig op te maken. In deze studie nemen we gemakshalve aan dat droogte de hoofdoorzaak is.



Figuur 3-4. Maandgemiddelde windrichting (in graden ten opzichte van N) en windsnelheid (als vector, in m/s) in de duinen. Berekend uit gemiddelde cijfers van de weerstations Vlissingen en De Kooy (1971-2000). Bron: www.knmi.nl/klimatologie/normalen1971-2000.

3.3 Een empirische relatie tussen droogte en bedekking

We vroegen prof. dr. ir. Wim van der Putten, die internationaal onderzoek heeft gedaan aan de duinen, of er iets bekend is over de relatie tussen droogtegraad en aandeel kale grond in duinen. Hij kon zich geen onderzoek voor de geest halen, maar wel meldde hij dat de duinen in Portugal

beduidend kaler zijn dan bij ons, en dat daar in natte jaren veel meer Helm groeit in de binnenduinrand, dan in droge jaren. Tevens hebben we dr. ir. Jos van Dam geraadpleegd, een expert aan de WUR op het gebied van bodemvochtmodellen, betrokken bij veel internationale studies. Ook hem waren geen studies bekend naar de relatie tussen droogte en bedekking.

Bij gebrek aan gepubliceerde studies zullen we de relatie tussen droogtegraad en kale grond zelf proberen te kwantificeren. Dat doen we aan de hand van gezamenlijk onderzoek van de sectie Waterhuishouding en Alterra, beide WUR. In dit onderzoek werd een maat voor de droogtegraad van de standplaats gerelateerd aan de vochtindicatie van de vegetatie, zoals afgeleid uit vegetatieopnamen. De droogtegraad van de standplaats werd daarbij berekend met het bodemvochtmodel SWAP (Van Dam *et al.*, 1997). Dit model berekent het vochttransport in de bodem op basis van onder meer: (1) neerslag en referentieverdamping, en de verdeling van beide posten over het jaar, (2) bodemfysische eigenschappen (die de hoeveelheid hangwater en de capillaire nalevering uit het grondwater bepalen) en (3) gewaseigenschappen.

De droogtegraad werd in het onderzoek gedefinieerd als het gemiddelde verschil (1980-1987) tussen de jaarlijkse potentiële transpiratie (T_p) en de jaarlijkse werkelijke transpiratie (T_a) van een volledig gesloten ($B = 100\%$) en korte grasmat:

$$TK = \frac{1}{8} \sum_{i=1980,1987} T_{p,i} - T_{a,i} \quad | \text{ korte grasmat, } B = 100\% \quad [3.1]$$

Het getal dat deze berekening oplevert, het potentiële vochttekort TK , drukt uit hoe droog een bodem zou zijn als hij begroeid zou zijn met kort gras. Door in de SWAP-berekening uit te gaan van een standaardgewas wordt een maat verkregen die alleen afhangt van de bodem en ruimtelijke verschillen in het weer binnen Nederland. De werkelijke vegetatie heeft mechanismen om het vochttekort te onderdrukken, bijvoorbeeld door de vorming van kale grond, en is daardoor niet geschikt om de droogtegraad van de standplaats te typeren.

De berekende potentiële vochttekorten hebben we uit de publicaties van het hiervoor beschreven onderzoek afgelezen en daarbij, vaak via achterliggende gegevensbestanden, de totale bedekking van de vegetatieopname gezocht. Alleen resultaten van grondwateronafhankelijke vegetatieopnamen ($GLG > 2 \text{ m} - \text{m.v.}$) werden voor onze analyse gebruikt:

- Afstudeeronderzoek van De Jong (1997): 6 vegetatieopnamen, genomen tussen 2 mei en 2 juni 1997, op zowel zandgrond als klei.
- Onderzoek van Jansen *et al.* (2000): 17 opnamen (12 mei – 24 juni 1998) op verschillende soorten grond (grof zand, zand, keileem, leem, löss, klei).
- Afstudeeronderzoek van Bartholomeus (2004): 19 opnamen (waaronder 5 in Meijndel), genomen in de periode 4 juli – 22 juli 2004, op hellingen van dijken, duinen en stuwwallen (klei en zand).

In dit onderzoek werd SWAP aangevuld met een module die de verdamping aanpast aan de ontvangen zonnestraling, die afhangt van de helling en de stand ten opzichte van de zon (expositie). Omdat

Bartholomeus (2004) het vochttekort van de werkelijke vegetatie had berekend, zijn de berekeningen voor deze studie overgedaan met het standaardgewas. In tegenstelling tot de vorige twee studies werd SWAP alleen gevoed met meteorologische gegevens uit Wageningen, en niet met gegevens van dichtbij gelegen weerstations.

Bij elkaar zijn dit 42 opnamen, waarvoor zowel TK als totale bedekking B bekend zijn. In Figuur 3-5 zijn beide grootheden voor deze opnamen tegen elkaar uitgezet. Bovendien is er nog een punt toegevoegd, namelijk voor kaal zand (▼). Kaal zand (bedekking 0%) verdampt jaarlijks ongeveer 200 mm, terwijl de Makkink verdamping ongeveer 550 mm/jr bedraagt, zodat het potentiële vochttekort van kaal zand neerkomt op ca. 350 mm/jr.

Door de punten in Figuur 3-5 is een sigmoïde gefit met als horizontale asymptoten 0% en 100%:

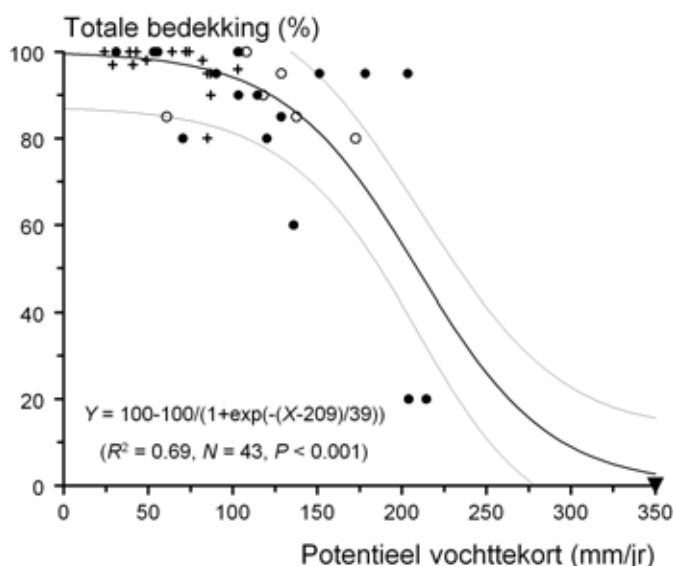
$$B = 100 - \frac{100}{1 + \exp(-(TK - 209)/39)} \quad [3.2]$$

Waarin:

B totale bedekking (%)

TK potentieel vochttekort (mm/jr)

Op Figuur 3-5 is natuurlijk heel wat aan te merken. De spreiding in de punten is groot en deels komt dat door systematische verschillen tussen de studies. Er zijn verschillen in de manier waarop TK is berekend, maar vooral verschillen in het moment waarop de totale bedekking is geschat zal de nodige ruis hebben veroorzaakt. De bedekking hangt sterk af van de weersgesteldheid van het jaar, maar ook binnen een jaar kan deze grootheid sterk variëren. Verder kan kale grond ook door andere oorzaken dan droogte



Figuur 3-5. Relatie, inclusief standaardafwijking van de voorspelling, tussen de totale bedekking van de vegetatie B en het met SWAP gesimuleerde gemiddelde potentiële vochttekort TK (1980-1987). Bronnen: ○ De Jong (1998); + Jansen et al. (2000); ● Bartholomeus (2004), aangepast voor deze studie; ▼ kaal zand.

worden veroorzaakt, zoals overstuiving en betreding. Mogelijk bestaat er ook een oorzakelijk verband tussen bodemtemperatuur en bedekking: de bedekking zou dan in de eerste plaats laag kunnen zijn doordat planten bezwijken onder de hitte (in droge omstandigheden met een expositie naar de zon, kan de temperatuur oplopen tot boven 40 °C).

De vorm van de gefitte sigmoïde in Figuur 3-5 wordt sterk bepaald door enkele punten bij hoge vochttekorten. Laten we vier waarnemingen met $TK > 200$ mm/jr buiten beschouwing en fitten we door de resterende punten een lineair verband, dan levert dat weer een dalende functie op ($B = 103 - 0.11TK$) die weliswaar zeer significant is, maar waarvan de verklarende variantie stukken lager ligt ($R^2 = 27\%$ i.p.v. 68%). Van de andere kant weten we dat onder zeer droge omstandigheden de grond vegetatieloos is, kijk maar naar de Sahel of naar een grinddak boven een fietsschuur. Dat zijn extreme ‘waarnemingen’ die aan de figuur zouden kunnen worden toegevoegd waardoor de verklaarde variantie van de sigmoïde, of een andere passende functie, zou stijgen.

Het is al met al duidelijk dat meer onderzoek nodig is naar de relatie tussen droogte en het aandeel kale grond. Dit onderzoek is niet alleen van groot belang voor het voorspellen van ecologische effecten van klimaatverandering op droge gronden, maar ook voor het bepalen van de grondwateraanvulling en dus voor de stroming van grondwater naar kwelgebieden en naar bronnen voor drinkwater. In deze studie, echter, zullen we het met huidige stand van kennis moeten doen. Dat betekent dat we hier in het vervolg zullen uitgaan van vergelijking [3.2].

Om de toekomstige bedekking voor een gebied te voorspellen zou men vlakdekkend en in een voldoende hoge resolutie het vochttekort TK moeten weten. Dat vochttekort hangt van vele factoren af, niet alleen bodemtextuur, maar ook organische-stofgehalte, helling, expositie ten opzichte van de wind en zon, oppervlakkige afvoer ten gevolge van waterafstotende (hydrofobe) bodems, diepte van de grondwaterstand, invloed van zout, etc. Het is welhaast onmogelijk dit soort informatie vlakdekkend te vergaren. Daarom komen we hier met een eenvoudiger oplossing. Daarvoor nemen we aan dat de huidige bedekking volledig wordt bepaald door het vochttekort. Uit [3.2] volgt dan:

$$TK_{1990} = 209 - 39 \ln \left(\frac{100}{100 - B_{1990}} - 1 \right) \quad [3.3]$$

Waarin TK_{1990} en B_{1990} staan voor het tekort en de bedekking in de ‘huidige’ situatie. Wanneer het potentiële vochttekort in 2050 toeneemt met ΔTK :

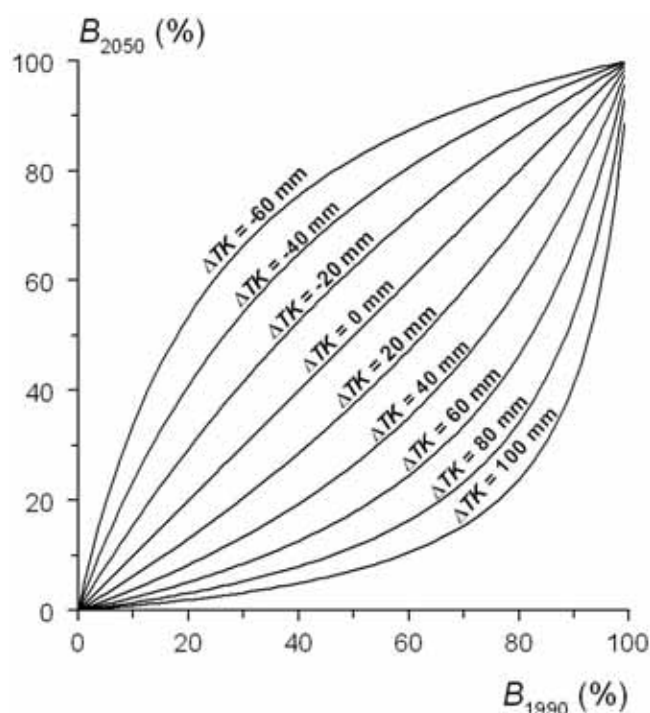
$$TK_{2050} = TK_{1990} + \Delta TK \quad [3.4]$$

En we substitueren vervolgens [3.3] en [3.4] in [3.2], dan krijgen we een uitdrukking voor de bedekking in 2050 (B_{2050}) als functie van B_{1990} en ΔTK :

$$B_{2050} = 100 - \frac{100}{1 + \left(\frac{100}{100 - B_{1990}} - 1 \right) \exp(-\Delta TK/39)} \quad [3.5]$$

Grafisch is deze relatie in Figuur 3-6 weergegeven voor verschillende waarden van ΔTK . Positieve waarden hebben betrekking op een uitdrogend klimaat, negatieve op een vernattend klimaat. Een interessant fenomeen dat ontleend kan worden aan Figuur 3-6, is dat enigszins open vegetaties, met een bedekking van tussen de 20 en 80%, het meest gevoelig voor klimaatverandering lijken te zijn: een verandering in het vochttekort leidt in dit traject tot een relatief grote verandering in de bedekking.

Om [3.5] te kunnen toepassen moeten we de bedekking in de huidige situatie weten, B_{1990} . Mogelijk kan dit in de toekomst worden afgeleid van de vegetatiekaart of uit remote sensing beelden. Ook vegetatieopnamen zijn hiervoor bruikbaar, zoals Figuur 3-3 liet zien voor de AWD. Vervolgens moeten we nog de toename in het potentiële vochttekort kennen, ΔTK . In § 3.4 wordt ΔTK geschat voor de 8 scenario's (§ 2.3.3) aan de hand van modelberekeningen met SWAP.



Figuur 3-6. Bedekking in 2050 (B_{2050}) als functie van de bedekking in 1990 (B_{1990}) en de verandering in het potentiële vochttekort ΔTK .

3.4 Droogte, bedekking en grondwateraanvulling in 2050

3.4.1 Inleiding

In deze paragraaf berekenen we met SWAP voor drie grondwateronafhankelijke locaties het potentiële vochttekort, de bedekking en de grondwateraanvulling voor de huidige situatie ('1990') en voor de 8 scenario's van § 2.3.3. Zoals in § 3.3 uitgelegd berekent dit model het vochttransport in de bodem op basis van onder meer neerslag en referentieverdamping, en de verdeling van beide posten over het jaar. Via

een toename van de referentieverdamping in voor- en najaar houdt het model dus rekening met een door klimaatverandering veroorzaakte verlenging van het groeiseizoen. Ook veranderingen in de intensiteit en frequentie van neerslagbuien komen in de SWAP-resultaten tot uitdrukking.

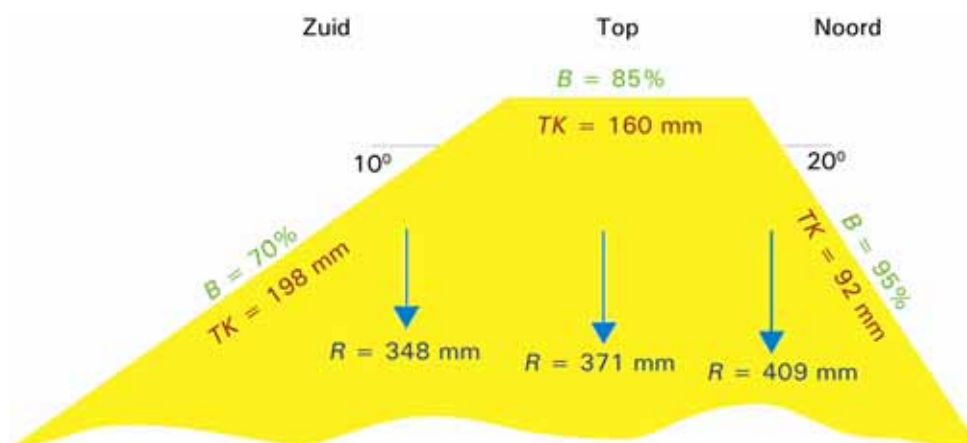
Die drie plots zijn een zuidhelling, een duintop en een noordhelling. Uit informatie bij de vegetatieopnamen van de AWD (Van Til & Mourik, 1999) blijkt dat de zuidhellingen minder steil zijn dan de noordhellingen: de hellingshoek op de zuidhelling bedraagt gemiddeld 12% ($N = 76$, $\sigma = 9.5\%$) en op de noordhelling 22% ($N = 174$, $\sigma = 14.9\%$). Mogelijk heeft dit niet alleen te maken met de overheersende windrichting, maar ook met de invloed van vocht op de stabiliteit van de duinhellingen: hoe vochtiger, des te stabiel.

De hellingshoek is van invloed op de hoeveelheid ingevangen zonnestraling en dus op de verdamping van de vegetatie. Dit uit zich in een andere bedekking, zie Figuur 3-3.

Voor onze berekeningen schematiseren we de plots als volgt:

- Zuidhelling: hellingshoek 10%, bedekking 70%
- Top: hellingshoek 0%, bedekking 85%
- Noordhelling: hellingshoek 20%, bedekking 95%

De bedekking aan de zuidhelling lijkt op grond van Figuur 3-3 misschien aan de lage kant, maar bedacht moet worden dat de geschatte bedekking in deze figuur vrijwel zeker te hoog is omdat kale plekken zand tijdens het maken van vegetatieopnamen zullen zijn overgeslagen.



Figuur 3-7. Schematische weergave van een grondwateronafhankelijk duin, van zuid naar noord. Behalve de opgelegde bedekking B zijn ook de met SWAP berekende grondwateraanvulling R en het potentiële vochttekort TK voor de huidige situatie gegeven (zie § 3.4.3).

3.4.2 Schematisering SWAP

Iedere plot heeft een diepte van 530 cm en is opgedeeld in 34 laagjes met een dikte variërend van 1 cm aan de top tot 50 cm onderin het model. Als gewas is het standaard grasmodel van SWAP gebruikt. De onderrand is een vaste stijghoogte van 500 cm –mv, voldoende diep om capillaire nalevering vanuit

het grondwater uit te sluiten zodat een grondwateronafhankelijk profiel is gegarandeerd. Er wordt geen drainage berekend.

Voor de bepaling van de bodemfysische parameters wordt uitgegaan van een duinvaaggrond (Zd21, fijn leemarm en zwak lemig zand). Het profiel bevat zeer weinig tot geen organische stof. Parameterwaarden uit verschillende studies zijn in Tabel 3-2 opgenomen:

- AWD B en AWD O zijn de bodemfysische parameters zoals nu gebruikt voor de berekening van grondwateraanvulling in de AWD (Van Genuchten, 1999).
- De duinvaaggrond is ontleend aan onderzoek uitgevoerd door de provincie Gelderland aan duinvaaggronden in zandverstuivingen (Provincie Gelderland, 1993).
- De waarden voor Meijndel zijn door ons berekend conform Wösten *et al.* (2001) uit de zandmediaan en fracties organische stof en leem volgens Jansen & Runhaar (2004).

Het bij de AWD vermelde verzadigd vochtgehalte θ_s wordt niet realistisch geacht. De hoogte van dit getal heeft zowel met de pakking van het zandpakket als met het humusgehalte te maken. Over het algemeen zal een (matig) fijnzandige bodem een θ_s van om en nabij de 40% hebben; waarden van onder de 35% worden pas op grote diepten bereikt. Humus leidt juist tot een hogere θ_s .

De waarden voor Meijndel lijken, zie tabel 9.60a in Locher & De Bakker (1990), representatief voor het Nederlands duin. Hun gemiddelden in Tabel 3-2 zijn daarom gebruikt als bodemfysische parameters voor onze simulaties, zie Tabel 3-3.

Tabel 3-2. Bodemfysische grootheden voor duinzand uit verschillende studies. Verklaring symbolen: θ_r en θ_s = residueel en verzadigd vochtgehalte; α , n en l = Van Genuchten parameters; k_s = verzadigde verticale doorlatendheid.

	θ_r (-)	θ_s (-)	α (cm ⁻¹)	k_s (cm / d)	l (-)	n (-)
AWD B	0	0.35	0.03	200	0.6	2.5
AWD O	0	0.33	0.03	200	0.6	3
Duinvaaggrond (gZd21)	0.01	0.36	0.022	15.2	0	2.29
Meijndel 1	0.01	0.41	0.019	260	0.229	2.65
Meijndel 2	0.01	0.44	0.020	188	0.181	2.02
Meijndel 3	0.01	0.42	0.019	217	0.211	2.33
Meijndel 4	0.01	0.43	0.021	156	0.094	2.27
Meijndel 5	0.01	0.42	0.018	213	0.204	2.32

Tabel 3-3. Bodemfysische grootheden gebruikt in de SWAP-simulaties. Symbolen: zie Tabel 3-2.

n (-)	θ_r (-)	θ_s (-)	α (cm ⁻¹)	k_s (cm / d)	l (-)	n (-)
Toplaag (5 cm) (matig humeus = 5% humus)						
	0.0	0.48	0.020	143	0.120	1.76
Ondergrond (humusarm = 0.5 - 1% humus)						
	0.0	0.42	0.019	207	0.184	2.32

Zoals gezegd hangt de verdamping mede af van de stand van de duinhelling ten opzichte van de zon. Bartholomeus (2004) heeft de relatie met duinhelling fysisch gemodelleerd. Op grond hiervan hebben Jansen & Runhaar (2004) een simpele formule afgeleid die een correctiefactor voor de referentieverdamping berekent als functie van expositie (N, NO, O, etc.) en hellingshoek:

$$\text{correctie} = g(1 + \gamma F) \quad [3.6]$$

waarin:

g gewasfactor (-)

γ hellingshoek (-)

F expositie ten opzichte van de zon (Figuur 3-8)

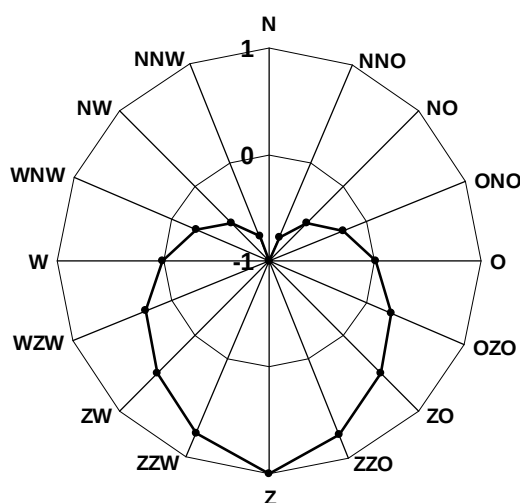
Dit toegepast op onze plots en met $g = 1.00$ geeft de volgende correcties:

Top: 1.00

Noord: 0.80

Zuid: 1.10

De referentieverdamping (voor '1990' én alle 8 scenario's) wordt dus met deze factoren vermenigvuldigd en de aldus ontstane gecorrigeerde reeksen worden ingevoerd in SWAP. Wegens gebrek aan informatie hebben we geen rekening kunnen houden met het in § 3.2 gesignaleerde effect van windexpositie op de verdamping.



Figuur 3-8. Factor F als functie van de expositie ten opzichte van de zon, nodig voor het berekenen van de potentiële verdamping op hellingen volgens vergelijking [3.6].

3.4.3 Resultaten

De resultaten van de SWAP-simulaties zijn samengevat in Tabel 3-4. We zullen deze tabel stapsgewijs bespreken.

Als eerste het vochttekort TK in de huidige situatie (H): dat bedraagt gemiddeld 198, 160 en 92 mm/jaar voor respectievelijk de zuidhelling, de top en de noordhelling van het duin. Deze waarden ingevuld in vergelijking [3.2] geven als voorspelde bedekking waarden van respectievelijk 57, 77 en 95%. Dat komt redelijk overeen met onze eerste en onafhankelijke aannamen op grond van waarnemingen (vegetatieopnamen): 70, 85 en 95% (§ 3.4.1).

In de tabel staat het potentiële vochttekort voor de 8 scenario's vermeld. De tekorten zijn ook grafisch weergegeven in Figuur 3-9. De tekorten blijken in bijna alle scenario's toe te nemen. Vooral in $W+$ is de toename dramatisch, zowel in absolute zin (met een maximale toename van 98 mm/jr op de zuidhelling) als in relatieve zin (met een maximale toename van 68% op de noordhelling).

Van de tekorten in 2050 het tekort van 1990 aftrekken levert het verschil in vochttekort ΔTK . De huidige bedekking (B_{1990}) en ΔTK ingevuld in [3.5] leidt tot de bedekking in 2050, voor verschillende scenario's. Voor de scenario's zonder CO_2 -correctie zijn de resultaten ook grafisch weergegeven, in Figuur 3-10. De bedekking daalt in nagenoeg alle scenario's, zowel op de zuidhelling, de duintop als de noordhelling. De daling onder $W+$ op de zuidhelling, van 70 naar 16%, is dramatisch te noemen.

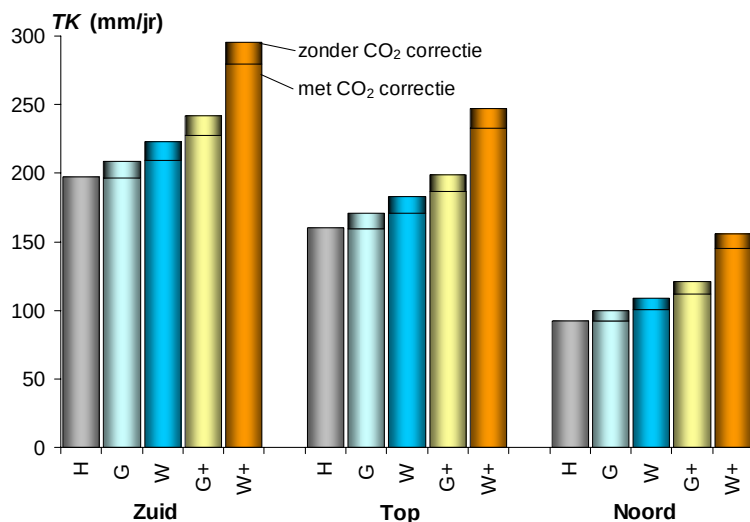
Met de nieuwe bedekking is een nieuwe SWAP berekening gemaakt, wat resulteerde in een berekende werkelijke verdamping, ET_{act} . Uit de neerslag P en ET_{act} is de grondwateraanvulling berekend: $R = P - ET_{act}$. Onderaan de tabel staat ter vergelijking de jaarlijkse grondwateraanvulling van een duinvallei die het hele jaar optimaal van water wordt voorzien. De grondwateraanvulling op het grondwateronafhankelijke duin neemt over het algemeen toe, maximaal met 28% (W , zonder correctie). Alleen op de noordhelling is sprake van een kleine afname bij de scenario's $G+$ en $W+$ van ten laagste 4%. De variatie tussen de scenario's is wat grondwateraanvulling betreft op het duin gedempt ten opzichte van het berekende potentiële neerslagoverschot. Dat geldt natuurlijk niet voor de vallei, waar verandering in grondwateraanvulling gelijk verondersteld is aan $P - ET_{ref}$ en R ligt tussen de uitersten -40% ($W+$) en +16% (W met CO_2 -correctie). Hier zien we dat de terugkoppeling van de vegetatie op de toegenomen droogte op het duin de variatie in grondwateraanvulling tempert: meer droogte leidt niet alleen tot een transpiratiereductie, iets waar bodemvochtmodellen als SWAP al rekening mee houden, maar ook, en dat is nieuw in deze studie, tot minder bedekking. Beide effecten, transpiratiereductie en de vorming van kale grond, zorgen voor een lagere werkelijke verdamping.

Op basis van het vochttekort (Figuur 3-9) zijn de scenario's in de volgorde (huidige situatie), G , W , $G+$ en $W+$ steeds droger. Dat geldt voor zowel de zuidhelling, de top als de noordhelling van het duin. Qua grondwateraanvulling echter, is $W+$ juist het natst op de zuidhelling, en W op zowel top als noordhelling.

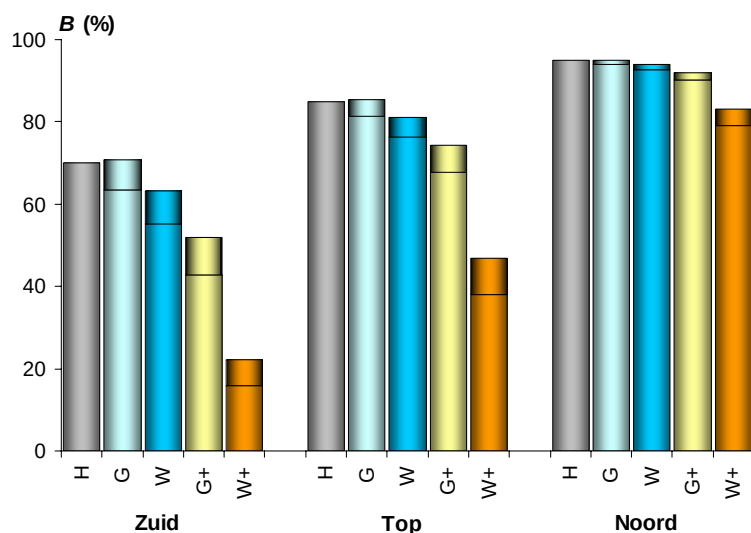
Tabel 3-4. Met SWAP berekende potentiële vochttekort TK, bedekking B en grondwateraanvulling R. Gebaseerd op de meteorologisch gezien gemiddelde jaren 1980-1987. Cursief: procentuele verandering ten opzichte van het huidige klimaat.

		Scenario							
		$c_2 = 1.00$				$c_2 = 0.97$			
1990		G	W	G+	W+	G	W	G+	W+
Zuid									
TK (mm / jr)	198	209	223	242	295	196	209	228	279
ΔTK (mm / jr)		11	25	44	98	-1	12	30	82
ΔTK (%)		6	13	22	50	-1	6	15	41
B (%)	70*	64	55	43	16	71	63	52	22
R (mm / jr)	348	386	415	384	445	386	412	377	428
ΔR (%)		11	19	10	28	11	18	8	23
Top									
TK (mm / jr)	160	170	183	199	247	159	171	187	233
ΔTK (mm / jr)		10	22	39	87	-1	11	26	72
ΔTK (%)		6	14	24	54	-1	7	16	45
B (%)	85*	81	76	68	38	85	81	74	47
R (mm / jr)	371	391	412	370	397	396	416	372	390
ΔR (%)		5	11	0	7	7	12	0	5
Noord									
TK (mm / jr)	92	100	121	109	156	92	112	101	145
ΔTK (mm / jr)		7	28	16	63	0	20	8	53
ΔTK (%)		8	30	18	68	0	21	9	57
B (%)	95*	94	90	93	79	95	92	94	83
R (mm / jr)	409	428	397	447	391	434	402	454	395
ΔR (%)		5	-3	9	-4	6	-2	11	-3
Vallei									
R (mm / jr)	228	237	246	182	137	255	264	201	156
ΔR (%)		4	8	-20	-40	12	16	-12	-32

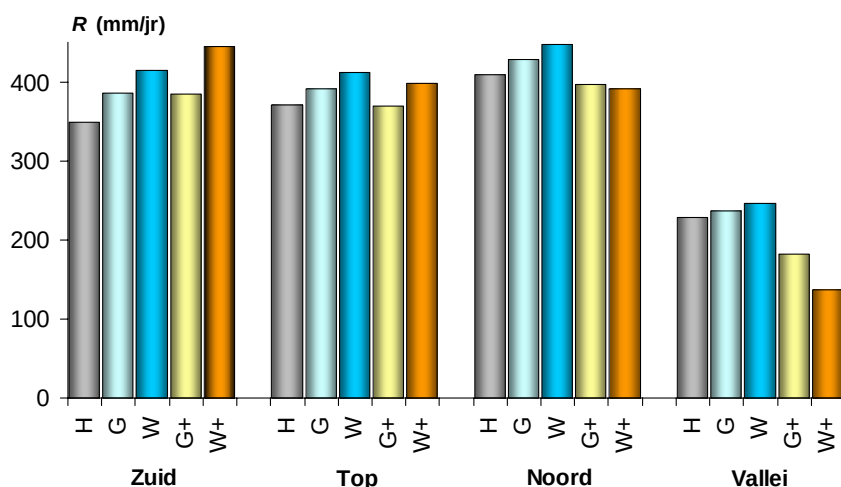
*opgelegd, niet berekend.



Figuur 3-9. Potentieel vochttekort TK op de drie plots voor de huidige situatie (H) en de 8 scenario's.



Figuur 3-10. Berekende bedekking B op de drie plots voor de 8 scenario's. Ter vergelijking is de huidige bedekking (H) opgenomen.



Figuur 3-11. Grondwateraanvulling R op de drie plots en een natte duinvallei, voor de huidige situatie (H) en 4 scenario's zonder CO₂-correctie.

4 Gevolgen voor het grondwater

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de gevolgen van klimaatverandering voor de grondwaterhuishouding gepresenteerd. Uit praktische overwegingen beperken we ons tot twee scenario's: W en W+ (natste en droogste volgens Figuur 2-7). De gevolgen worden berekend met het bestaande numerieke grondwatermodel van de AWD (Kamps & Van Olsthoorn, 2004). Aanpassingen aan dit model, om het klimaatbestendig te maken, worden dus niet gedaan: de berekening wordt eenvoudig gehouden. De grondwateraanvulling van het grondwatermodel wordt vooraf berekend met het onverzadigde zone programma ONZAT (Van Drecht, 1983, 1996). Op basis van neerslag en referentiegewasverdamping berekent die voor verschillende diktes van de onverzadigde zone en voor een aantal begroeiingstypen op een duinbodem, de werkelijke verdamping en de grondwateraanvulling.

In ONZAT wordt geen rekening gehouden met twee terugkoppelingen van de vegetatie op het klimaat: de vorming van kale grond en het CO₂-effect, het eerder sluiten van huidmondjes bij hogere CO₂-concentraties in de atmosfeer. Om het AWD-grondwatermodel nu toch te kunnen gebruiken, leiden wij hier een correctiefactor c_3 voor de grondwateraanvulling af. De met ONZAT berekende aanvulling dient met deze factor te worden vermenigvuldigd.

4.2 Correctiefactor c_3

Eerst is geprobeerd een tijdsafhankelijke correctie uit te voeren op de door ONZAT berekende grondwateraanvulling, een correctie die dus door het jaar heen varieert. Die correctie zou moeten worden afgeleid van de in het vorige hoofdstuk besproken simulaties met SWAP. Bovendien zou rekening moeten worden gehouden met verschillen in de dikte van de onverzadigde tussen SWAP en ONZAT, in verband met verschillen in de reistijd van het bodemvocht naar het grondwater. Een dergelijke tijdsafhankelijke correctie bleek echter niet realiseerbaar binnen dit project, vooral omdat het zou vragen om aanpassingen in de broncode van ONZAT. Daarop is besloten een tijdsafhankelijke correctie te berekenen.

De correctie verschilt tussen grondwateronafhankelijke en grondwaterafhankelijke profielen, omdat alleen in het eerste geval de bedekking zich aanpast aan het klimaat. In ONZAT worden verschillende klassen voor de dikte van de onverzadigde zone onderscheiden. De twee dunste klassen kunnen, afhankelijk van vegetatietype (dikte wortelzone), grondwaterafhankelijk zijn: 0-1 m en 1-2 m.

In Tabel 2-4 staat het potentiële neerslagoverschot onder verschillende scenario's vermeld. Aannemende dat de vegetatie potentieel verdampt op een grondwaterafhankelijk profiel, is de grondwateraanvulling daar gelijk aan het potentiële neerslagoverschot. In scenario W is dit 257 mm/jr zonder, en 238

mm / jr met CO₂-correctie. Voor W bedraagt correctiefactor c_3 derhalve 1.08. Evenzo kan voor W+ een correctie worden berekend van $c_3 = 1.16$.

Voor grondwateronafhankelijke profielen hebben wij in Hoofdstuk 3 beide effecten met SWAP doorerekend voor een duin met een top, een noord- en een zuidhelling. Uit de resultaten leiden we factor c_3 af als de verhouding tussen de totale grondwateraanvulling (1960-2004) van de aangepaste vegetatie en de aanvulling van de huidige vegetatie (met huidige bedekking). Het resultaat is opgenomen in Tabel 4-1.

Voor het grondwatermodel is een onderscheid tussen noordhelling, duintop en zuidhelling overbodig, want die verschillen middelen toch uit in het grondwater. Bovendien heeft het geen zin dit onderscheid aan te brengen zolang we niet ook elders detailleren (rekening houden met hellingshoek, om maar iets te noemen). Voor de simulaties nemen we daarom het gemiddelde van noord- en zuidhelling (laatste rij 'correctie' in Tabel 4-1). Noordhellingen in de AWD zijn ongeveer twee keer zo steil als zuidhellingen (20° en 10°), dus is hun oppervlakteaandeel in het gebied ongeveer twee keer zo klein (om precies te zijn: 2.06). Dat is een argument om zuidhellingen zwaarder mee te laten wegen. Van de andere kant zijn er veel min of meer vlakke oppervlakten, die weer minder terugkoppelingseffect vertonen.

Het lijkt misschien vreemd dat de correctie voor grondwaterafhankelijke bodems groter is dan die voor grondwateronafhankelijke bodems. In het laatste geval heeft de vegetatie zich immers aangepast aan het klimaat door een afname van de bedekking. Grondwateronafhankelijke bodems, echter, hebben ook te maken met droogtestress, het verschijnsel dat de vegetatie niet meer potentieel kan verdampen. Juist door die lagere bedekking is de bodem later in het seizoen uitgedroogd en kan de vegetatie (met die lagere bedekking) langer potentieel verdampen.

Tabel 4-1. Correctiefactor c_3 voor grondwaterafhankelijke en grondwateronafhankelijke duinbodems, voor scenario's W en W+.

	W	W+
Grondwaterafhankelijk		
Correctie	1.08	1.16
Grondwateronafhankelijk		
noordhelling	1.01	1.02
zuidhelling	1.07	1.26
duintop	1.02	1.09
Correctie	1.04	1.14

4.3 Simulatie van de grondwaterhuishouding

Waternet heeft een grondwatermodel van de AWD gebruikt om de gevolgen van klimaatverandering op de grondwaterhuishouding te berekenen (Kamps, 2008). Resultaten van dit onderzoek worden hier besproken.

Het model, AMWADU, is geprogrammeerd in een recente Modflow-versie die kan omgaan met verschillen in dichtheden ten gevolge van verschillen in zoutconcentraties. AMWADU wordt gevoed met de grondwateraanvulling uit ONZAT. Door de aanvulling te vermenigvuldigen met de in de Tabel 4-1 vermelde factoren c_3 wordt gecorrigeerd voor de aanpassing van de vegetatie aan het toekomstige klimaat.

In de studie van Waternet zijn vijf modelsimulaties uitgevoerd:

SH = Huidige klimaat

SW = Scenario W, zonder aanpassing van de vegetatie aan het klimaat

SW c_3 = Scenario W, met aanpassing van de vegetatie (Tabel 4-1)

SW+ = Scenario W+, zonder aanpassing van de vegetatie aan het klimaat

SW+ c_3 = Scenario W+, met aanpassing van de vegetatie (Tabel 4-1)

In alle klimaatscenario's (simulaties SW – SW+ c_3) wordt een stijging van de zeespiegel verondersteld van 25 cm naar NAP +0.25 m (pag. 10); in simulatie SH wordt met het huidige zeepeil (NAP) gerekend.

Het grondwatersysteem van de AWD reageert traag op veranderingen: het duurt circa 8 jaar voordat 90% van een verandering in de grondwaterstand is gerealiseerd. Het instellen van het grensvlak tussen het zoete en zoute grondwater is een nog trager proces. Het nieuwe evenwicht behorende bij het droogmalen van de Haarlemmermeerpolder in 1850, bijvoorbeeld, is nog steeds niet bereikt. Veranderingen in het klimaat zal in het grondwatersysteem van de AWD zeer lang doorwerken. Het grondwatermodel moet daarom ingesteld worden op het nieuwe klimaat. Kamps (2008) heeft daarom de volgende rekenperioden onderscheiden:

Periode 1, inloop 1980-2004. Modelinvoer bestaat uit jaargemiddelden van oppervlaktewaterpeilen, debieten, neerslag en verdamping. Het grensvlak tussen zoet en zoutgrondwater is ingevoerd op basis van chloridemetingen in diepe waarnemingsputten. De rekentijdstap bedraagt 1 jaar.

Periode 2, inloop 2005-2032. In deze periode stelt het zoet-zoutgrensvlak en het freatisch vlak zich in op het nieuwe klimaat en op een stijging van de zeespiegel van 25 cm (pag. 10). Meteorologische invoer bestaat uit de naar het nieuwe klimaat getransformeerde *jaargemiddelden* van de periode 1960-2004. De rekentijdstap is weer 1 jaar.

Periode 3, inloop en analyse 2033-2061. In deze periode bedraagt de rekentijdstap 1 maand om de dynamiek in de grondwaterstand te kunnen berekenen. De getransformeerde neerslag en verdamping uit de periode 1976-2004 dienen als meteorologische invoer. De jaren 2033-2037 dienen om het model in te stellen; de resultaten uit 2038-2061 worden gebruikt als voorspellingen voor het toekomstige klimaat.

4.4 Resultaten

Er kunnen van de scenarioresultaten talloze kaarten, tijdreeksen en andersoortige grafieken worden weergegeven. Wij beperken ons hier tot enkele kaarten en verwijzen voor meer informatie naar Kamps (2008).

Voor natte en vochtige duinvalleien is het vooral van belang of de grondwaterstand zich in de nabijheid van het maaiveld bevindt. Om inzicht te krijgen in verschuivingen in het areaal natte en vochtige duinvalleien, is door Kamps (2008), op basis van de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand GVG, een aantal vochtklassen gedefinieerd. Deze zijn in Tabel 4-2 weergegeven. In deze tabel staan ook de arealen onder het huidige klimaat vermeld, evenals de verschuivingen in deze arealen onder de verschillende scenario's. In het huidige klimaat bedraagt de oppervlakte aan natte en vochtige valleien 157 ha. Die oppervlakte neemt met 30 ha (19%) toe in simulatie SW en met 4 ha (3%) in SW+. Houden we ook rekening met de aanpassing van de vegetatie aan het nieuwe klimaat, dan bedragen de toenames respectievelijk 50 ha (32%) en 39 ha (25%) (SW_c en SW_c⁺). De terugkoppeling van de vegetatie op het klimaat heeft dus een niet te verwaarlozen effect op het areaal natte en vochtige valleien, vooral in het W+ scenario.

Figuur 4-1 en Figuur 4-2 geven de ruimtelijke verdeling van vochtklassen in het gebied weer, in respectievelijk de huidige situatie (SH) en simulatie SW_c. Uitbreiding van de natte en vochtige valleien kunnen vooral worden verwacht in het zuiden van de AWD, beneden de infiltratiepanden (de Luchterduinen). Een indruk van de GVG in de huidige situatie geeft de kaart van Figuur 4-3. In deze figuur is goed te zien dat de infiltratiepanden hoog zijn opgezet. Vandaar uit stroomt grondwater naar de kanalen die het infiltratiegebied omsluiten. In de Luchterduinen zijn geen infiltratiepanden aanwezig; duinwater wordt alleen onttrokken door het aan de oostelijke rand gelegen Oosterkanaal. Hierdoor is het grondwater in dit gebied overwegend onderhevig aan een natuurlijke fluctuatie.

De stijging van de GVG (Figuur 4-1 en Figuur 4-2) is vooral toe te schrijven aan een verhoogde grondwateraanvulling en in mindere mate aan een stijging van de zeespiegel. Dat blijkt uit een vergelijking van simulatie SW+ met de huidige situatie (Figuur 4-4): de stijging van de GVG is beperkt tot een strook van 1 á 2 km langs de kust en klimaatscenario W+ heeft blijkbaar geen invloed, want buiten deze strook verandert de GVG niet.

Voor grondwaterafhankelijke vegetaties is ook de dynamiek in grondwaterstand van belang. Ter illustratie tonen we het verschil tussen GVG en GLG (gemiddeld laagste grondwaterstand) in achtereenvolgens de huidige situatie en in simulatie SW_c; zie Figuur 4-5 en Figuur 4-6.

Tabel 4-2. Op basis van de GVG gedefinieerde vochtklassen, de oppervlakteverdeling van deze klassen onder het huidige klimaat H en de verandering in deze oppervlakten onder verschillende simulaties.

Klasse	GVG (cm – m.v.)	Oppervlakte SH (ha)	Verandering in oppervlakte (ha)			
			SW	SW _{C3}	SW+	SW+c ₃
Open water	<-32	13	1	2	0	1
Nat	-33 – 22	44	13	19	3	16
Vochtig	22-70	113	17	31	1	23
Droog	>70	4199	-31	-52	-4	-40

Samengevat zijn de resultaten van de verschillende simulaties als volgt (naar Kamps, 2008):

Klimaatsscenario W, plus zeespiegelstijging van 25 cm (simulaties SW en SW_{C3})

De GVG stijgt maximaal met 35 cm in simulatie SW. Wanneer de aanpassing van de vegetatie in de simulatie wordt betrokken (SW_{C3}) komt daar nog eens 15 cm bij. De oppervlakte aan natte en vochtige duinvalleien neemt met 19% toe tot 187 ha in simulatie SW en met 32% tot 207 ha in SW_{C3}. De toename vindt vooral plaats in het centrale deel van de Luchterduinen, waar het maaiveld vrij vlak is. De dynamiek in de grondwaterspiegel stijgt, gemiddeld genomen, licht: van 60 cm tot 70 cm in simulatie SW_{C3}.

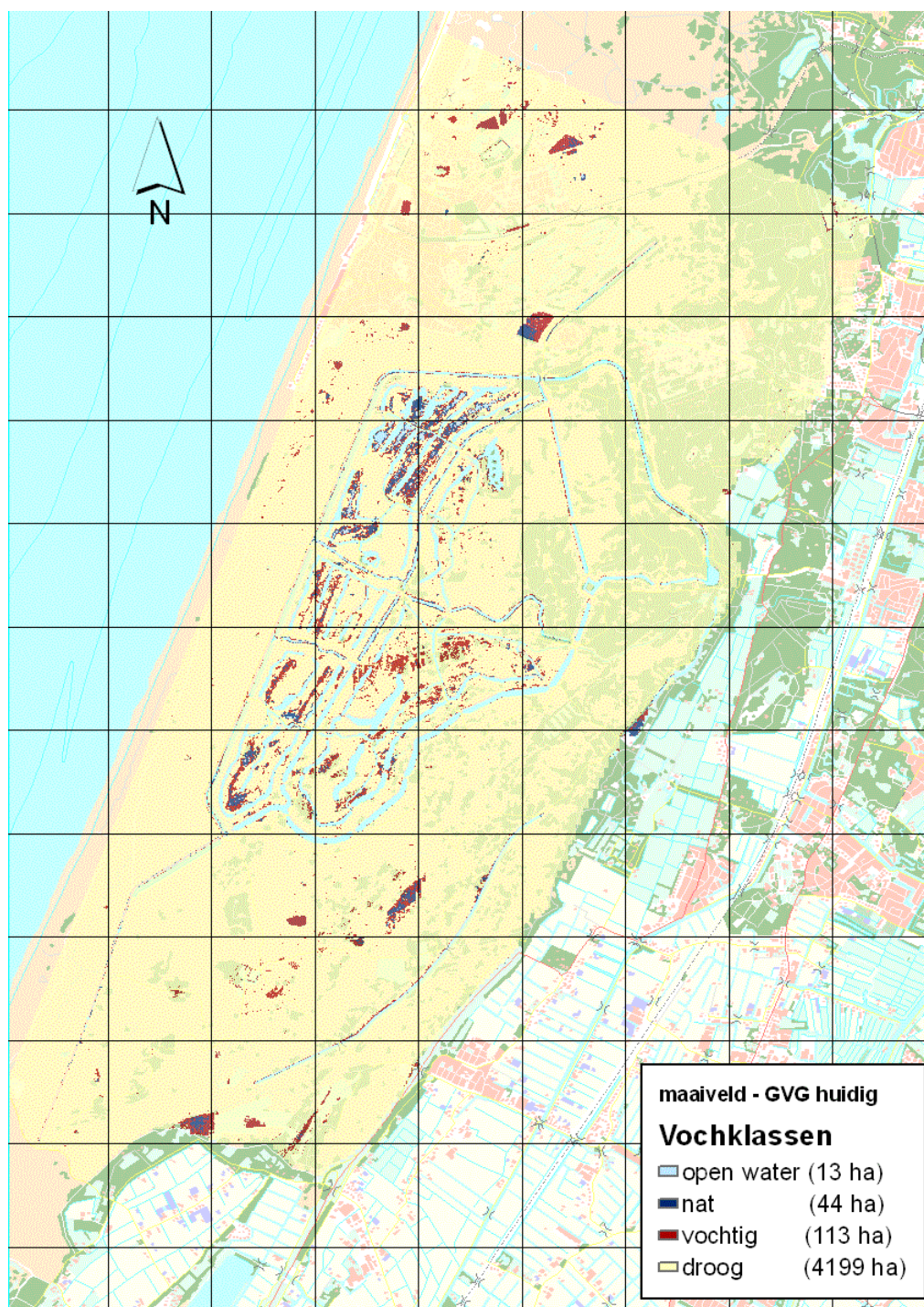
Klimaatsscenario W+, plus zeespiegelstijging van 25 cm (simulaties SW+ en SW+c₃)

Uitgezonderd een strook langs de kust, verandert er niets aan de hoogte van de grondwaterspiegel wanneer geen rekening wordt gehouden met de terugkoppeling van de vegetatie aan het klimaat (SW+). Gebeurt dat wel, dan stijgt de grondwaterstand maximaal met 37 cm en neemt het areaal natte en vochtige valleien met 25% toe tot 196 ha. De dynamiek in grondwaterstand stijgt dan van ca. 60 cm tot 80 cm.

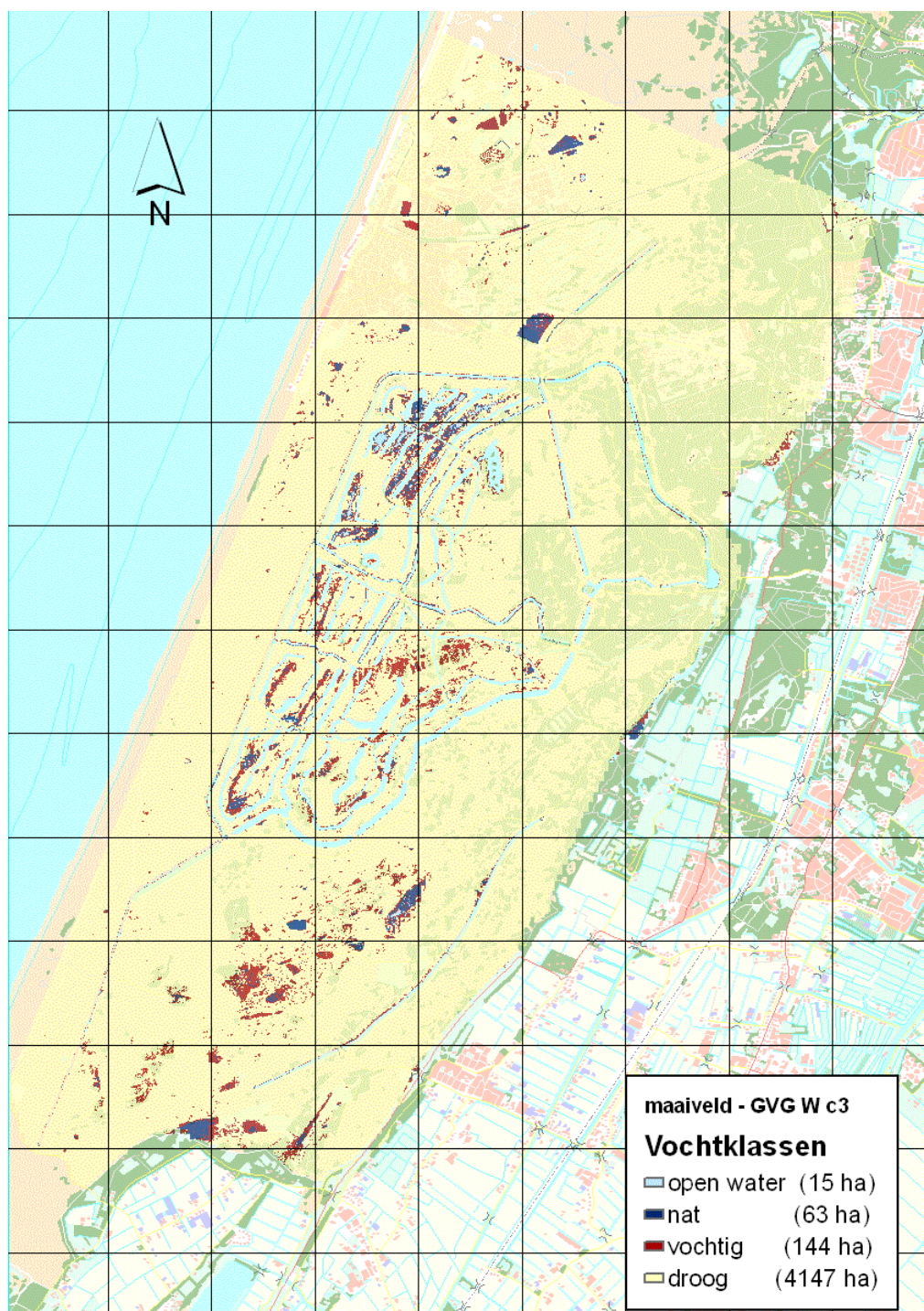
Bij deze resultaten moet worden opgemerkt dat het grondwatersysteem in simulatieperiode 3 waarschijnlijk geen evenwicht heeft bereikt met het nieuwe klimaat (zie figuur 1 in Kamps, 2008). Een verdere stijging van de grondwaterspiegel is daarom in beide klimaatscenario's te verwachten.

4.5 Slot

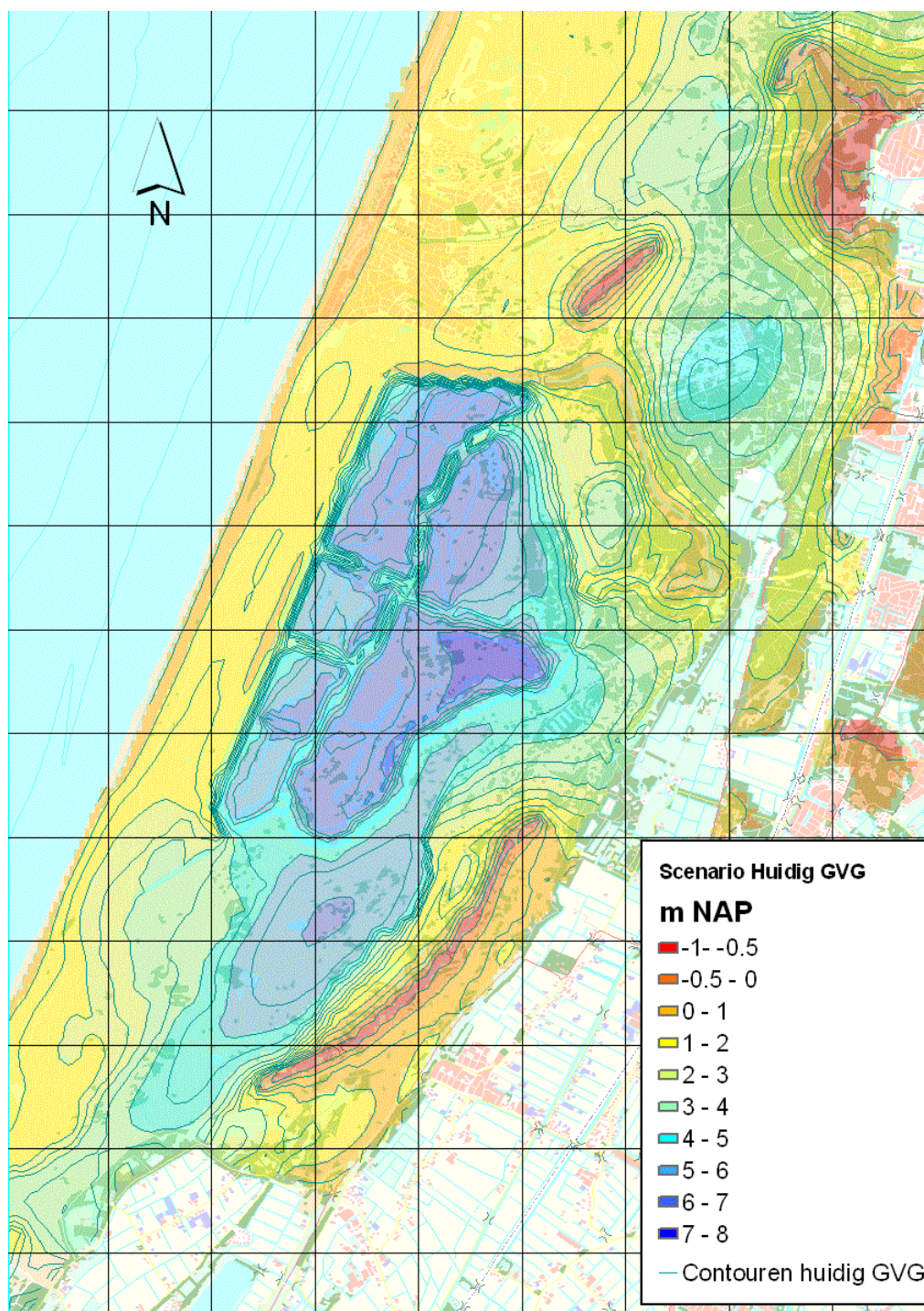
De aangepaste grondwateraanvulling leidt bij de Klimaatscenario's W en W+ tot een geringe stijging van de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (maximaal enkele decimeters). De dynamiek in grondwaterspiegel neemt toe, zowel onder de duinen als in de duinvalleien. Onder W+ is de stijging het grootst, van gemiddeld ca. 60 cm naar 80 cm. Ondanks de geringe stijging van de voorjaarsgrondwaterstand, neemt het areaal aan natte duinvallei (die is gedefinieerd op basis van de GVG) toe met ca. 20-25%. Die toename is vooral in vlakke terreingedeelten van de Luchterduinen. Omdat het grondwatersysteem nog niet in evenwicht verkeert met het nieuwe klimaat, mag op de langere termijn een verdere vernatting worden verwacht.



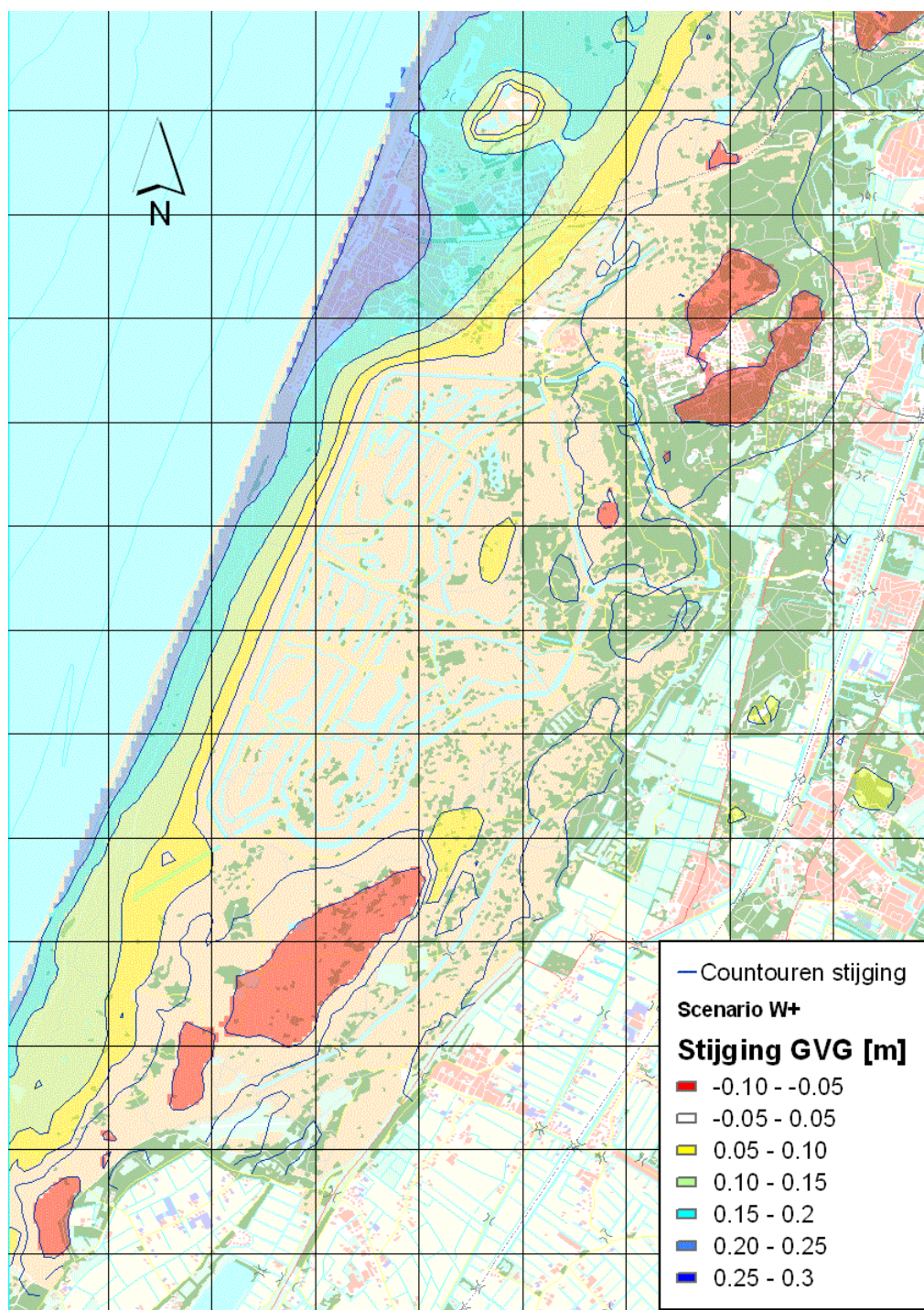
Figuur 4-1. Vochtklassen in het huidige klimaat en bij de huidige zeespiegel (simulatie SH). Bron: Kamps (2008).



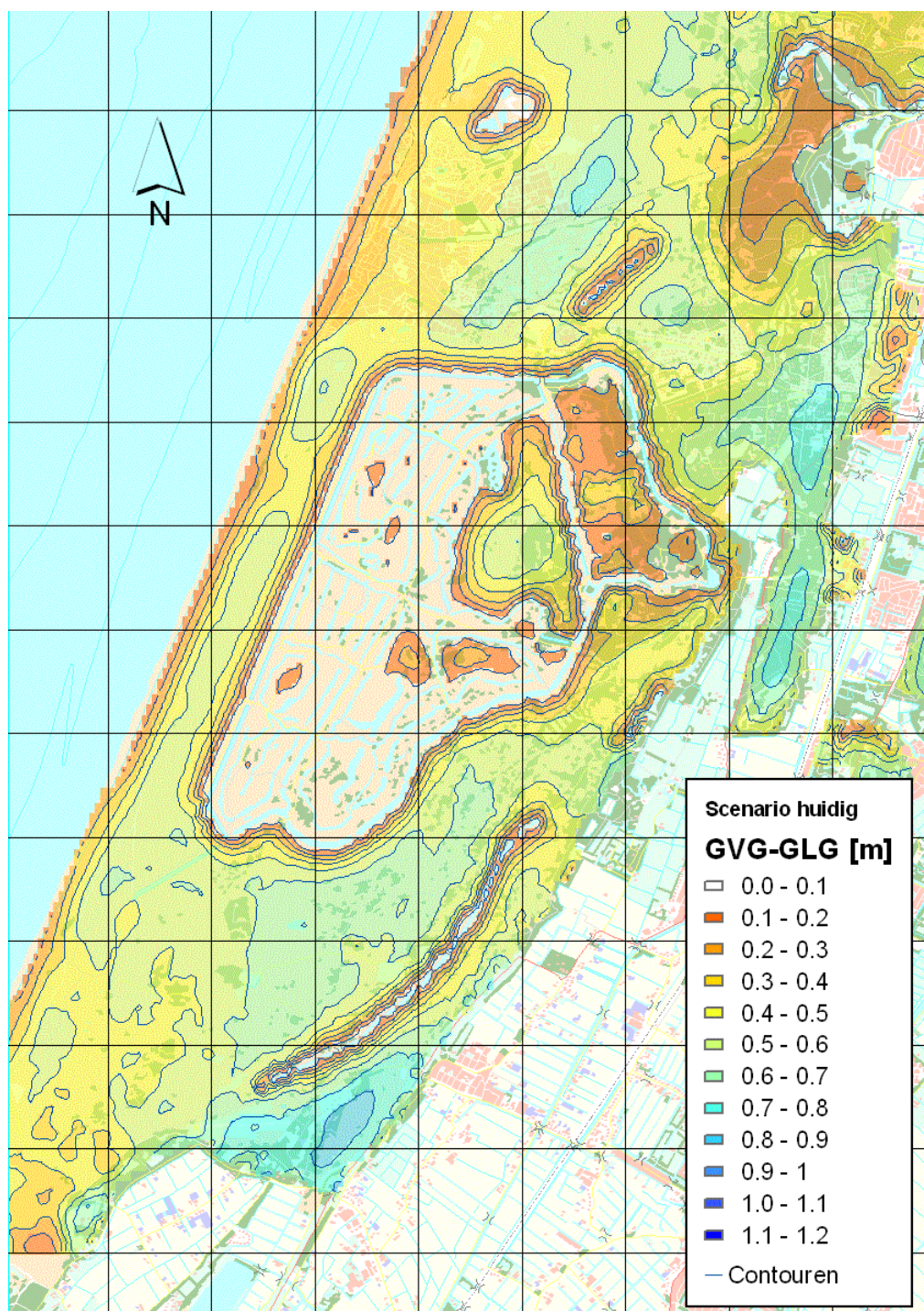
Figuur 4-2. Vochtklassen in simulatie SWc₃: klimaatscenario W met een vegetatie die zich heeft aangepast aan het nieuwe klimaat en een stijging van de zeespiegel met 25 cm (simulatie SWc₃). Bron: Kamps (2008).



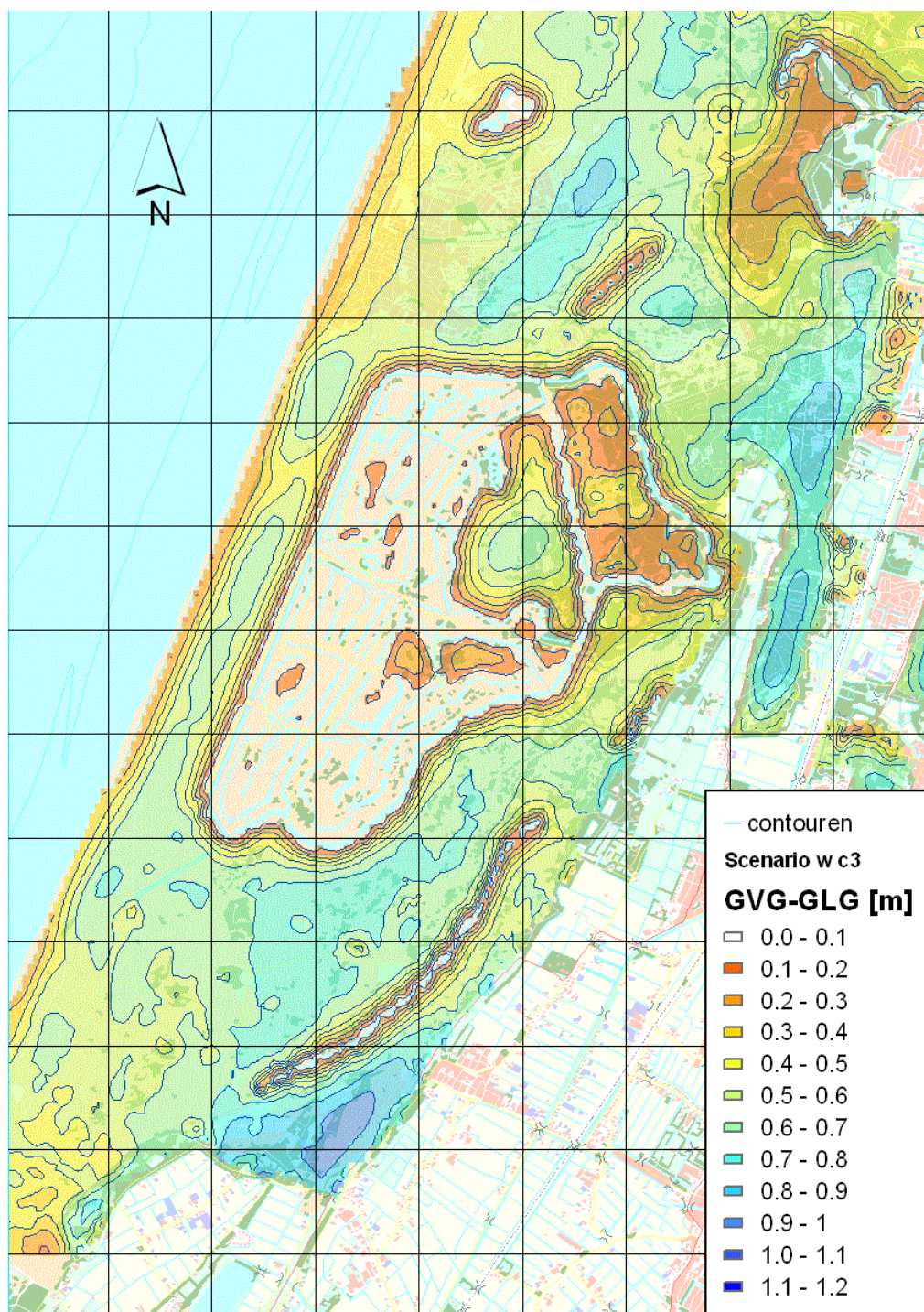
Figuur 4-3. Gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand GVG (cm t.o.v. N.A.P.) in de huidige situatie (simulatie SH). Bron: Kamps (2008).



Figuur 4-4. Stijging van de GVG (cm) in simulatie SW+ ten opzichte van de huidige situatie (SH).
Bron: Kamps (2008).



Figuur 4-5. Dynamiek van de grondwaterstand, gedefinieerd als GVG-GLG (cm), in de huidige situatie (simulatie SH). Bron: Kamps (2008).



Figuur 4-6. Dynamiek van de grondwaterstand, gedefinieerd als GVG-GLG (cm), in klimaatscenario W met een vegetatie die zich heeft aangepast aan het nieuwe klimaat en een stijging van de zeespiegel met 25 cm (simulatie SWc₃). Bron: Kamps (2008).

5 Discussie

5.1 Inleiding

In dit onderzoek speelt de terugkoppeling van de vegetatie op klimaatverandering een grote rol. Het lijkt er op dat een toename van de droogte in de zomer gepaard zal gaan met een afname van de vegetatiebedekking, wat belangrijke hydrologische en ecologische gevolgen kan hebben. De in dit onderzoek gebruikte relatie tussen droogte en vegetatiebedekking (Figuur 3-5) is echter gebaseerd op zeer beperkte gegevens. In dit afsluitende hoofdstuk zullen we daarom eerst (§ 5.2) deze relatie aan een kritische analyse onderwerpen en ook andere berekeningen evalueren. Diegenen die vooral geïnteresseerd zijn in de conclusies van het onderzoek, kunnen deze paragraaf echter overslaan en meteen aan § 5.3 beginnen. Daarin bespreken we wat de ecohydrologische gevolgen van klimaatverandering voor het duinecosysteem zouden kunnen zijn. We eindigen met een paragraaf met aanbevelingen voor nader onderzoek (§ 5.4).

5.2 Evaluatie van de berekeningen

Het is bekend dat voorspellingen over de gevolgen van klimaatverandering met grote onzekerheden zijn omgeven. Het KNMI geeft de onzekerheid over het toekomstige klimaat al aan door vier uiteenlopende scenario's te presenteren, wij hebben hier nog een portie onzekerheid aan toegevoegd. Die onzekerheid zit hem vooral in twee zaken: de berekening van de verdamping van open vegetaties in SWAP en de relatie tussen droogte en vegetatiebedekking (Figuur 3-5).

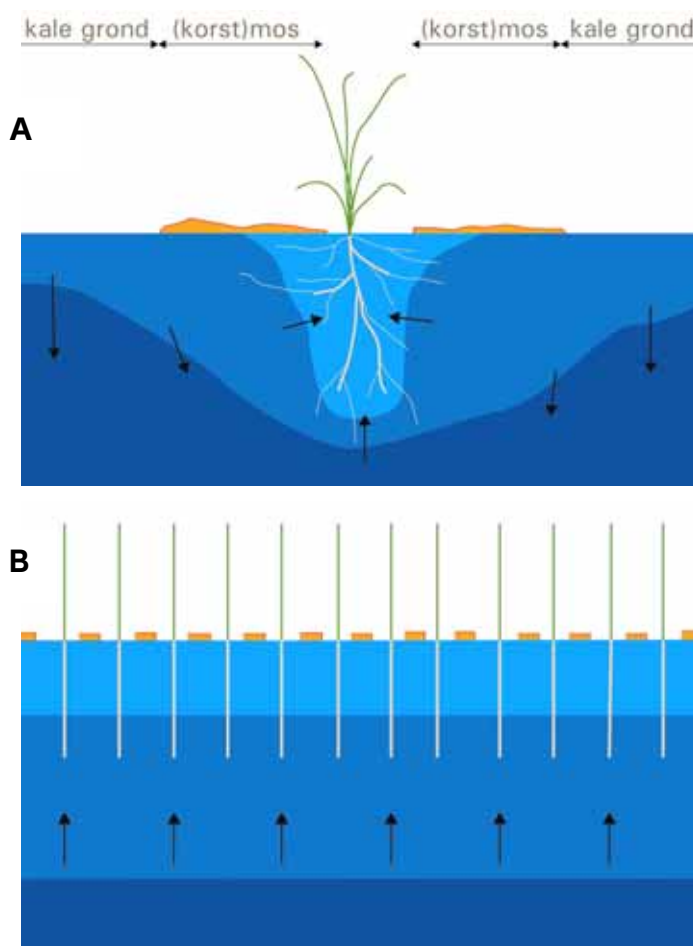
De berekening van de verdamping van open vegetaties in SWAP is voor verbetering vatbaar. Onzes inziens gaat dit model, net als overigens andere modellen voor bodemvochttransport, niet helemaal correct om met het percentage kale grond in de vegetatie en met de manier waarop de verdamping wordt uitgesplitst naar verschillende posten: interceptie, bodemverdamping en transpiratie. Meestal wordt SWAP gebruikt voor goed bedekkende landbouwgewassen, zodat deze tekortkomingen niet zo erg zijn, maar voor droge gronden in de natuur tellen ze wel zwaar mee.

Voor de specialisten een toelichting op de gebreken die wij menen te zien. Gewasfactoren in SWAP hebben officieel betrekking op een droog en een de grond volledig bedekkend gewas, zonder interceptieverdamping (Kroes & Van Dam, 2003, p.47). In de praktijk echter, zijn ze meestal ontleend aan veldwaarnemingen en hebben ze betrekking op de verdamping inclusief de interceptie. In SWAP wordt de transpiratie echter naar beneden bijgesteld voor de tijd die nodig is om interceptiewater te verdampen, terwijl die correctie dus vaak al in de gewasfactor besloten ligt. Dit is geen fout van SWAP zelf, maar van het gebruik van dit model.

Ten tweede menen wordt, net als in andere bodemvochtmodellen, uitgegaan van eendimensionale verticaal vochttransport, waarbij al het water dat niet via bodemverdamping of interceptie naar de atmosfeer verdwijnt, in een

bodemreservoir terecht dat in het horizontale vlak homogeen is. Vanuit dit reservoir onttrekken planten vervolgens water. Bij veel kale grond zal de horizontale vochtverdeling echter heterogeen zijn, waarbij het water op kale stukken grond grotendeels onbereikbaar is voor de plant (preferente stroming naar het grondwater op kale grond). Door de veronderstelde horizontale homogeniteit wordt de *gemiddelde* hoeveelheid water die beschikbaar is voor de vegetatie, te hoog berekend (Figuur 5-1). Dit leidt tot een gesimuleerde transpiratie die te hoog is. Overigens kan droogte zorgen voor waterafstotendheid van kale grond, waardoor er via oppervlakteafvoer planten juist extra water ontvangen. Hoe het ook zij, de aanname van alleen verticaal vochttransport doet de werkelijkheid wellicht te veel geweld aan.

De tekortkomingen zijn van invloed op de berekende grondwateraanvulling R (Tabel 3-4, Figuur 3-11), maar nauwelijks of niet op het potentiële vochttekort TK en de daarvan afgeleide bedekking B (Tabel 3-4, Figuur 3-5, Figuur 3-10) omdat voor deze grootte is uitgegaan van een *volledig bedekkend gewas*.



Figuur 5-1. Gangbare schematisering van het vochttransport in de bodem. A: werkelijke vochtverdeling (hoe blauwer, des te hoger het vochtgehalte) en stromingsrichting (zwarte pijlen) van een vegetatie bestaande uit wortelende vaatplanten, (korst)mossen en kale grond. B: de geschematiseerde werkelijkheid waarin vaatplanten, mossen en kaalzand tezamen een denkbeeldige homogene laag vormen.

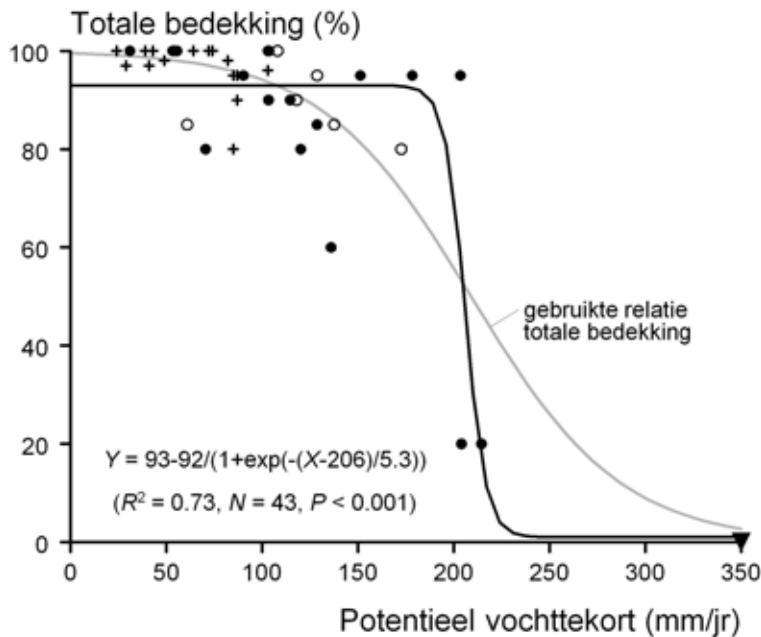
Overigens wordt de verdamping in het hydrologische model voor de AWD bepaald met een module (ONZAT) die niet expliciet rekening houdt met bedekking. Dit betekent dat dit model *in zijn huidige vorm* nog niet geschikt is voor het doorrekenen van klimaatscenario's.

Voor de specialisten. De ONZAT module van het AWD-model rekt per cel met een mix aan begroeiingstypen met vaste gewasfactoren, waaronder 'kaal zand'. De verdamping van een rekencel is het naar oppervlakte gewogen gemiddelde van de verschillende typen. Men zou op de gedachte kunnen komen het aandeel kaal zand te laten variëren afhankelijk van het scenario, en daarmee de nieuwe celverdamping te bepalen. Dit is echter geen juiste berekeningswijze: als binnen een begroeiingstype het aandeel kale grond toeneemt, blijft er meer water over voor de planten die er wél groeien. We moeten dus kijken naar veranderingen in de bedekking binnen de vegetatie.

Dat droogte van invloed is op het aandeel kale grond hebben we in deze studie genoegzaam aangetoond. De gebruikte relatie tussen droogte en bedekking (Figuur 3-5) is echter dubieus, vooral doordat er in het droge bereik onvoldoende waarnemingspunten zijn. Bovendien zijn er meer factoren die de bedekking bepalen, zoals: (1) het verloop van de bedekking gedurende het jaar, (2) de expositie ten opzichte van de wind, (3) 'salt spray', (4) erosie en overstuiving, (5) humusopbouw op beschaduwde plekken, die zorgt voor een betere beschikbaarheid van bodemvocht en nutriënten, (6) hydrofobie op zuidhellingen, die zorgt voor een lagere beschikbaarheid van bodemvocht, (7) het hele duinreliëf, op zowel kleine als grote schaal, dat samen met de zonnestand de ingevangen straling bepaalt, (8) de overheersende windrichting, die in de scenario's G+ en W+ meer oostelijk wordt, (9) eigenschappen van de planten die bepalen hoeveel zonne-energie kan worden gebruikt voor transpiratie en interceptie (albedo, interceptiecapaciteit), (10) bewortelingsdiepte, (11) bodemvoedselrijkdom.

De resultaten van onze studie zijn echter voor een groot deel gebaseerd op Figuur 3-5 en men moet zich daarom afvragen wat deze dan waard zijn, of de voorspelde toename van het aandeel kale grond niet sterk is overdreven. We zullen de relatie tussen droogte en bedekking daarom nogmaals beschouwen.

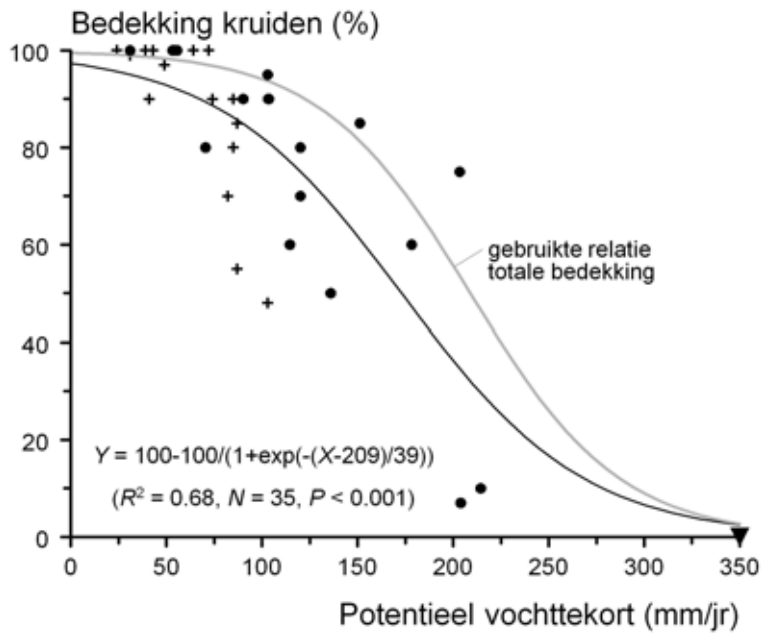
Men kan kritiek hebben op het feit dat door de waarnemingen een sigmoïde is gefit met opgelegde horizontale asymptoten van 0 en 100%. In Figuur 5-2 is daarom door de waarnemingen een sigmoïde gegeven met via curve-fitting vastgestelde asymptoten. Ter vergelijking is de originele curve van Figuur 3-5 in Figuur 5-2 opgenomen. Het 'vrijlaten' van de asymptoten leidt tot een curve die, voor het gevoel, te steil is. Wellicht zou een andere functie (Gompertz bijvoorbeeld), meer op zijn plaats zijn geweest. Beschouwen we het hele traject van *TK*, dan kan men *niet* concluderen dat door het opleggen van asymptoten, de door ons gebruikte relatie (Figuur 3-5, Verg. [3.2]) overdreven is geweest en hiermee de bedekking te laag hebben voorspeld.



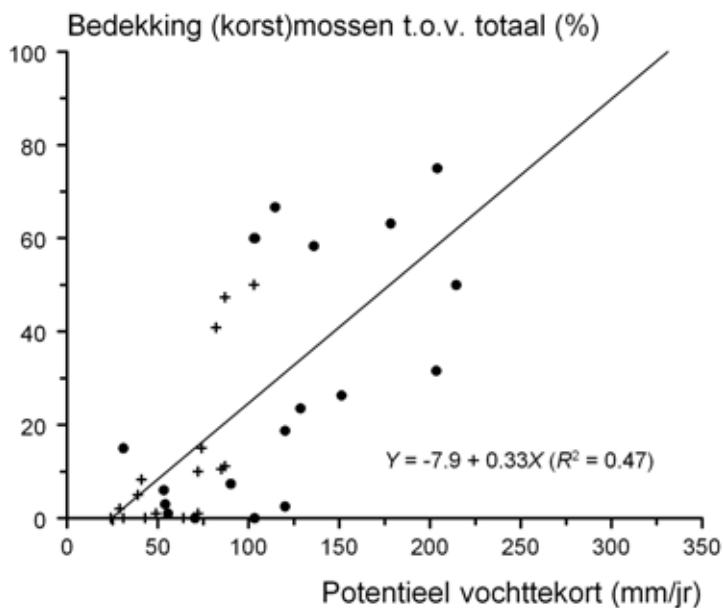
Figuur 5-2. Als Figuur 3-5, maar nu met een functie waarvan de horizontale asymptoten niet zijn opgelegd (op 0 en 100%), maar via curve-fitting bepaald. Ter vergelijking is de originele relatie uit Figuur 3-5 opgenomen (grijze lijn). Verklaring symbolen: zie Figuur 3-5.

In de duinen en andere droge gebieden bestaat de vegetatie gedeeltelijk uit planten zonder wortels: mossen en korstmossen (en algen, maar deze komen niet voor in de door ons geanalyseerde opnamen). De bladen van mos zijn veelal maar één cellaag dik zodat directe vochtopname via het blad mogelijk is. In de andere richting drogen mos en korstmos bij gebrek aan vocht ook snel uit. Daarbij verschrompelen ze vaak tot losse enigszins gekrulde plakkaatjes, liggend op het zand. Dit betekent echter niet de dood van de plant, hij verkeert in een soort zomerslaap. Zodra er weer vocht is zal het (korst)mos zich herstellen. Deze eigenschap maakt dat (korst)mossen kunnen gedijen op plaatsen waar vaatplanten het laten afweten. Wat betreft de verdamping gedragen deze planten zich waarschijnlijk meer als kaal zand, met een klein interceptiereservoir, dan als vaatplanten.

In Figuur 5-3 is de relatie tussen droogte en bedekking nogmaals gegeven, maar nu alleen voor kruiden. Enkele opnamen, waarbij de bedekking niet was uitgesplitst naar vegetatiestructuur, zijn afgefallen. Bovendien is een opname met overwegend struiken weggelaten. Het negatieve verband tussen droogte en bedekking is nu overtuigender dan in Figuur 3-5. Dat komt doordat het aandeel niet-wortelende planten in de vegetatie met *TK* toeneemt (Figuur 5-4). Op basis van Figuur 5-3 zal een lagere werkelijke verdamping en dus een grotere grondwateraanvulling worden berekend dan in dit onderzoek is berekend op basis van Figuur 3-5. Met Figuur 3-5 hebben we de bedekking onder een toekomstig klimaat dus eerder te hoog, dan te laag ingeschat. De invloed van droogte, via de bedekking, op de werkelijke verdamping, is daarmee eerder onderschat dan overdreven.



Figuur 5-3. Als Figuur 3-5, maar nu met alleen de bedekking van kruiden (lagere, niet houtige vaatplanten) op de verticale as. Ter vergelijking is de originele relatie uit Figuur 3-5 opgenomen (grijze lijn). Verklaring symbolen: zie Figuur 3-5.



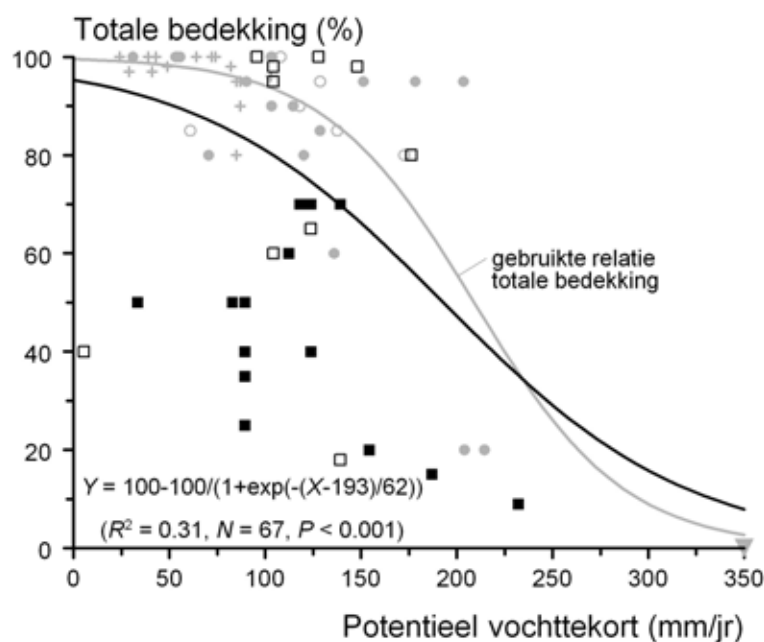
Figuur 5-4. Relatie tussen de bedekking van mossen en korstmossen, als percentage van de totale vegetatiebedekking, en het potentiële vochttekort. Verklaring symbolen: zie Figuur 3-5.

Ten slotte zijn 24 punten toegevoegd aan Figuur 3-5 en is onderzocht hoe de relatie daardoor verandert (Figuur 5-5). Het gaat om opnamen uit Synbiosys, 14 gelegen in de AWD en 10 in het Gooi. De selectie van deze opnamen is gebaseerd op de volgende criteria: (1) informatie over de bedekking van kruiden en andere structuurtypen aanwezig, (2) geen bedekking door bomen of struiken, (3) informatie over expositie en helling aanwezig, (4) locatie via

coördinaten bekend, (5) grondwatertrap VII, VII* of VIII (afgeleid via coördinaten uit 1:50.000 bodemkaart), (6) opname via ECOTYP (Runhaar *et al.* 2003) toegekend aan een droog ecotooptype (ter uitsluiting van opnamen op schijnspiegels). De bodemfysische schematisering voor SWAP werd gebaseerd op een landelijke vertaling van de 1:50.000 bodemkaart (Wösten *et al.*, 1988); de invloed van helling en expositie werd berekend met Verg. [3.6]; voor het Gooi werden neerslag en referentieverdamping betrokken van meteorologisch station De Bilt (voor AWD: zie § 2.2.2).

Door alle punten in Figuur 5-5 (totaal 42 + 1 + 24 = 67) is weer een sigmoïde met opgelegde asymptoten gefit. De spreiding rond de regressielijn is door het toevoegen van punten groter geworden, wat ongetwijfeld te maken heeft met de grovere bodemkundige informatie voor SWAP (1:50.000 bodemkaart in plaats van veldgegevens). De conclusie die echter uit deze figuur kan worden getrokken is dezelfde als voor Figuur 5-2 en Figuur 5-3: met de in dit onderzoek gebruikte relatie (Figuur 3-5) hebben we de invloed van droogte via vegetatiebedekking op de verdamping niet overschat, in tegendeel.

We menen al met al dat conclusies over de gevolgen van klimaatverandering op basis van Figuur 3-5 niet overdreven zullen zijn. Door ons in de volgende paragraaf op de resultaten Figuur 3-5 te baseren, blijven we vermoedelijk aan de voorzichtige kant met onze uitspraken.



Figuur 5-5. Als Figuur 3-5, maar nu aangevuld met grondwateronafhankelijke opnamen uit de AWD (■) en het Gooi (□). Ter vergelijking is de originele relatie uit Figuur 3-5 opgenomen (grijze lijn).

5.3 Gevolgen van klimaatverandering voor het duinecosysteem

5.3.1 Klimaatverandering in duinen

Uit deze studie blijkt dat er geen reden is aan te nemen dat klimaatsverandering in de duinen anders zal uitpakken dan in de rest van Nederland. Klimaatscenario's van het KNMI kunnen dus worden toegepast op de duinen van Nederland.

Meetgegevens suggereren dat het potentiële neerslagoverschot, het verschil tussen neerslag en referentiegewasverdamping (volgens Makkink), de afgelopen twee decennia gemiddeld is toegenomen (Figuur 2-3, Tabel 2-1). Het is, met andere woorden, natter geworden. Dat geldt niet alleen voor het overschot op jaarbasis, maar ook, zij het in mindere mate, voor het overschot in de zomermaanden (juni, juli, augustus). De zwakke en statistisch niet getoetste trend voor de zomer staat haaks op de verwachting van het KNMI, dat het in de zomermaanden juist droger gaat worden (Tabel 2-4). We zullen in het vervolg van deze discussie echter uitgaan van de KNMI scenario's.

5.3.2 Droogte op de duinen in de zomer

Indien een van de klimaatscenario's van het KNMI bewaarheid wordt, zal 's zomers de droogte (gedefinieerd als het potentiële vochttekort, zie § 3.3) op de duinen zeer waarschijnlijk toenemen (Tabel 3-4, Figuur 3-9). Gemiddeld over alle scenario's en locaties bedraagt de voorspelde toename 22%. De verandering hangt onder meer af van de positie van het duin ten opzichte van de zon en de overheersende windrichting. Op zuidhellingen variëren de voorspellingen voor 2050 van een kleine afname met 1% (scenario G, met correctie voor het CO₂-effect, dat is het effect dat planten minder transpireren bij een hogere CO₂-concentratie in de lucht) tot een toename van de droogte met 50% (scenario W+). Op de noordhellingen bedragen deze percentages 0 en 68%, en op de duintop -1 en 54%.

5.3.3 Het aandeel kale grond

Volgens onze berekeningen zal de toegenomen droogte in de zomer er toe leiden dat het aandeel kale grond in de duinen gaat stijgen (Tabel 3-4, Figuur 3-10). Volgens de voorspellingen daalt de bedekking van de vegetatie op zuidhellingen van 70% naar ten laagste 16%, op noordhellingen daalt het van 95 naar ten laagste 79% en op de duintop van 85 naar 38%. De laagste bedekkingen worden telkens voorspeld onder scenario W+. Gemiddeld over alle scenario's en hellingen bedraagt de afname van de bedekking 14% (zuidhelling van 70 naar 48%, noordhelling van 95 naar 90%, duintop van 85 naar 69%).

5.3.4 De grondwateraanvulling

Klimaatverandering heeft ook gevolgen voor de grondwateraanvulling, het verschil tussen neerslag en werkelijke verdamping. Onder het huidige klimaat bedraagt deze volgens berekening op zuidhelling, duintop en noordhelling respectievelijk 348, 371 en 409 mm / jr (Tabel 3-4, Figuur 3-7). In een natte duinvallei, zonder droogtestress, is dit 220 mm / jr.

Het is van belang de grondwateraanvulling te kennen omdat hij de hoogte en de vorm van de grondwaterspiegel bepaalt, de hoeveelheid kwel naar de duinvalleien en de hoeveelheid 'natuurlijk grondwater' die als drinkwater gewonnen zou kunnen worden. Het voor 2050 berekende verschil tussen neerslag en *potentiële verdamping*, het potentiële neerslagoverschot, bedraagt gemiddeld over 8 scenario's -9% ('vallei' in Tabel 3-4 en Figuur 3-11). De verschillen tussen de scenario's zijn echter aanzienlijk en variëren van -46% voor het zeer droge scenario W+ tot +16% voor het natte scenario W, met CO₂-correctie. Deze cijfers zijn schattingen van de grondwateraanvulling onder vegetaties die niet te maken hebben met droogte, zoals in natte duinvalleien.

Op de duinen, buiten de berekende invloed van het grondwater, is de variatie in grondwateraanvulling tussen de scenario's een stuk kleiner. Dat komt doordat de vegetatie twee mechanismen heeft om de werkelijke verdamping onder droge omstandigheden te beperken. Het eerste is dat planten hun transpiratie reduceren door het sluiten van huidmondjes of door het afsterven van plantedelen. De werkelijke transpiratie is dan lager dan de potentiële transpiratie. Het tweede mechanisme is dat het aandeel kale grond onder droge omstandigheden stijgt. Kale grond verdampt veel minder dan begroeide grond.

Volgens onze berekeningen met het bodemvochtmodel SWAP, neemt de grondwateraanvulling op het grondwateronafhankelijke duin over het algemeen toe, gemiddeld met 8% en maximaal met 28% (W+ op zuidhelling) (Tabel 3-4, Figuur 3-11). De toename is het sterkst op de zuidhelling en het laagst op de noordhelling. In twee scenario's, G+ en W+, is er zelfs sprake van afname met enkele procentpunten van de aanvulling op de noordhelling.

5.3.5 De grondwaterspiegel

De aangepaste grondwateraanvulling leidt tot een geringe stijging van de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (maximaal enkele decimeters). De dynamiek in grondwaterspiegel neemt toe, zowel onder de duinen als in de duinvalleien. Onder W+ is de stijging het grootst, van gemiddeld ca. 60 cm naar 80 cm. Ondanks de geringe stijging van de voorjaarsgrondwaterstand, neemt het areaal aan natte duinvallei (die is gedefinieerd op basis van de GVG) toe met ca. 20-25%. Die toename is vooral in vlakke terreingedeelten. Omdat het grondwatersysteem nog niet in evenwicht verkeert met het nieuwe klimaat, mag op de langere termijn een verdere vernatting worden verwacht.

5.3.6 Gevolgen voor biodiversiteit

Grondwateronafhankelijke duinen

De toename van het percentage kale grond zou grote consequenties kunnen hebben. Duinen zouden weer kunnen gaan stuiven, wat de kansen voor pioniersoorten en kalkminnende soorten vergroot, zoals korstmossen (Ketner-Oostra, 2006). Tegen veel sedimentatie van zand zijn niet alle soorten even goed bestand; met name Helm en Kruipwilg profiteren hier van. Doordat kale grond in de zomer heter wordt dan een begroeid oppervlak,

kunnen warmteminnende soorten gaan toenemen. Tevens zal het aandeel droogteresistente soorten (xerofyten, waaronder mossen en korstmossen, zie Figuur 5-4) in de duinen stijgen. Wanneer in het groeiseizoen de wind meer uit het oosten komt (scenario's W+ en G+) zullen de nu relatief dichte vegetaties aan de oostzijde van het duin opener worden, en aan de westzijde dichter. Door de geringe toename van het werkelijke neerslagoverschot, zullen de duinen als geheel iets sneller ontkalken, wat juist tot een verhoogde beschikbaarheid van fosfaat leidt en een daarmee gepaard gaande vergrassing.

De berekeningen wijzen er op dat de zomers droger zullen worden, en de winters natter. Dit betekent dat de dynamiek in het wortelmilieu van planten zal toenemen. Soorten die juist gebaat zijn bij weinig variatie in milieuomstandigheden, zullen hieronder te lijden hebben. Vaak zijn dit kwetsbare en dus zeldzame en bedreigde soorten.

Soorten die diep wortelen, zoals bomen en struiken, halen hun water uit een grotere bodemlaag en zullen minder snel reageren op meer droogte in de zomer. De kans bestaat dat daardoor een vegetatie van enkele persisterende houtige soorten overblijft, omgeven door vooral kale grond en mossen, vergelijkbaar met wat men in extreme mate kan aantreffen in semi-aride gebieden (Van de Koppel & Rietkerk, 2004). De grenzen in de vegetatie worden dan scherper (Figuur 5-6). Doordat kaal zand in zekere mate hydrofoob is, kan deze structuur zichzelf versterken. Of deze structuur een lang leven is beschoren hangt af van de mogelijkheid van houtige gewassen om te kiemen als gunstige omstandigheden zich voordoen, of zich vegetatief uit te breiden. Een extreem natte zomer, bijvoorbeeld, zou voor een struiksoort gunstige kiemomstandigheden kunnen scheppen, waardoor deze soort zich weer vele decennia kan handhaven. Populieren, die gevoelig zijn voor droogte, zullen misschien verdwijnen.

Door toegenomen verstuiving kunnen duinen op den duur een ander reliëf krijgen (Noest *et al.*, 1995).

Duinvalleien

De kwel naar de duinenvalleien zal, met de geringe toename van de grondwateraanvulling, gemiddeld iets gaan stijgen. Ook zal de voorjaargrondwaterstand stijgen, in 2050 met hooguit enkele decimeters. Of klimaatverandering gunstig uitpakt voor natte duinvalleivegetaties, hangt vooral af van de grootte van het gebied dat de vallei voedt en dus van de grootte en de dynamiek van de kwelflux. Voor grotere systemen, is de verwachting, zal klimaatverandering gunstig uitpakken, mits overtollig oppervlaktewater kan worden afgevoerd, bijvoorbeeld via duinrellen of een systeem van greppeltjes en sloten. Een hogere kwelflux in combinatie met een hogere potentiële verdamping zal zorgen voor meer invloed van basenrijk grondwater in het wortelmilieu. Is het systeem te klein, en de intensiteit van de kwel in de zomer te laag, dan zal de grondwaterstand in de zomer diep weg kunnen zakken, wat fataal zal zijn voor karakteristieke en beschermde plantensoorten als Moeraswespenorchis en Teer guichelheil. Kleine systemen komen onder andere voor als schijngrondwater op door duinzand overstoven slechtdoorlatende veenlagen.



Figuur 5-6. Referentiebeeld voor de grondwateronafhankelijke duinen onder een droger klimaat? De foto toont de duinen van het eilandje Anholt, gelegen in het Kattegat (Denemarken). De neerslag bedraagt hier 600 mm/jr (AWD: 800 mm/jr). Gegevens over de verdamping konden niet worden achterhaald, maar vermoed wordt dat deze post zeker zo hoog is als in de Nederlandse kustduinen (veel windinvloed op dit kleine eiland, globale straling 3000 Wh/m²/jr tegen 2900 Wh/m²/jr voor de Nederlandse duinen, temperatuur in augustus vergelijkbaar; 16 tegen 17 °C). Foto: B. Sparrius.

Een kleine toename van de grondwateraanvulling zal er eerst voor zorgen dat lokale grondwaterstromingstelsels, zoals van een lokaal duin naar een aangrenzend vallei, veranderen. Deze lokale stelsels zijn gesuperponeerd op de grote zoetwaterbel onder het gehele duinmassief. Dit grote systeem reageert zeer traag op veranderingen. Op de lange termijn (denk aan meer dan een eeuw; Vernooij, 2005) zal er een nieuw evenwicht ontstaan tussen de opbolling van de grondwaterspiegel en de diepte van de zoetwaterbel, het grensvlak tussen zoet en zout grondwater. Hoe lang het duurt voordat dit is bereikt hangt af van de grootte van de zoetwaterbel onder het duin, de grondwateraanvulling en de aanwezigheid van weerstandbiedende lagen. Op de lange termijn kan een kleine toename in de aanvulling echter zorgen voor een aanzienlijke stijging van de gemiddelde grondwaterstand in de duinen. Duinvalleien zonder afvoerstelsel voor oppervlaktewater zouden dan kunnen veranderen in permanente plassen. Het graven van een afwateringstelsel is dan noodzakelijk om bestaande duinvalleivegetaties te handhaven. Een alternatief is dat nieuwe locaties worden gezocht voor deze doelvegetaties.

5.4 Aanbevelingen voor nader onderzoek

Berekeningen in dit onderzoek suggereren dat de consequenties van klimaatverandering groot kunnen zijn voor de biodiversiteit en beheer van Nederlandse kustduinen. Mogelijk zijn er, door toename van verstuiwingen, ook beheerstechnische problemen te verwachten. Hoewel we niet twijfelen

aan de richting van de gevolgen, moeten we terughoudend zijn in uitspraken over de absolute omvang van de effecten. Dat komt doordat de berekeningen gebaseerd zijn op gebrekkige empirische relaties en modelconcepten die verbeteringen behoeven. Ter verbetering van de voorspellingen kan zonder moeite onderzoek worden geformuleerd waarop een leger aan promovendi zijn tanden kan stukbijten. We beperken deze aanbevelingen echter tot vier mogelijke vormen van onderzoek, relevant voor de waterbedrijven:

1. Beperkt vervolgonderzoek naar de relatie tussen droogte en bedekking;
2. Monitoringsprogramma ‘droogte en bedekking’;
3. Verkennend onderzoek naar mogelijkheden om de verdamping klimaatsbestendig te simuleren;
4. Onderzoek in de vorm van een aio-plaats voor een periode van vier jaar.

Ad 1. Vervolgonderzoek relatie tussen droogte en bedekking

Dit onderzoek dient om de relatie tussen droogte en bedekking beter te onderbouwen en vervolgens de gevolgen van klimaatverandering voor bedekking en grondwateraanvulling beter te simuleren.

- Als eerste dient de relatie tussen droogte en bedekking met systematisch verzamelde veldgegevens en goede modelsimulaties te worden onderbouwd. Op ca. 40 grondwateronafhankelijke locaties in de duinen worden vegetatieopnamen gemaakt. De locaties worden geselecteerd op basis van helling, expositie, ouderdom van het duin en het gevoerde vegetatiebeheer. Per locatie worden helling en expositie nauwkeurig ingemeten. Steekmonsters in het bodemprofiel worden genomen waarvan in het laboratorium de bodemfysische relaties (pF-curve en $k(\theta)$ -relatie) worden bepaald. De dichtheid, diepte en laterale verbreiding van het wortelstelsel worden geschat. Met SWAP, inclusief stralingsmodule (Bartholomeus, 2004), wordt het potentiële vochttekort berekend. Informatie over het huidige wortelstelsel is nodig om de huidige grondwateraanvulling betrouwbaar te kunnen berekenen. Van ieder opname wordt de bedekking zo nauwkeurig mogelijk bepaald (via digitale foto's) op een vast aantal tijdstippen in het jaar (bijvoorbeeld 1 mei, 1 juni, 1 juli, 1 augustus). Bedacht moet worden dat geen speciale aandacht is geschonken aan het schatten van de bedekking bij de opnamen die we in dit rapport hebben geanalyseerd. Omdat het menselijk oog slecht in staat is bedekkingen te schatten, zal dit in ons onderzoek een belangrijke foutenbron wezen. De relatie tussen droogte en bedekking kan vermoedelijk aanzienlijk worden verbeterd door dat nu wel te doen.
- Toetsing van de met SWAP berekende grondwateraanvulling is mogelijk met behulp van het model Menyanthes (Von Asmuth *et al.*, 2002). Dit is een model dat automatisch gemeten grondwaterstanden ikt aan gemeten neerslagoverschotten. Eerst wordt Menyanthes geijkt aan grondwaterstanden uit een reeks van droge (of juist natte) jaren, met impliciet een bij die jaren horende lage (hoge) bedekking. Vervolgens wordt het model gevoed met het neerslagoverschot van natte (of juist droge) jaren. Systematische verschillen tussen waarnemingen en

simulaties kunnen worden toegeschreven aan verschillen in vegetatiebedekking.

- De kosten van dit onderzoek worden geraamd op k€ 80 (veldwerk 25 k€, bodemfysische bepalingen 20 k€, simulaties SWAP 15 k€, simulaties Menyanthes 10 k€, rapportage k€ 10).

Ad 2: monitoringsprogramma droogte en bedekking

Doel van dit onderzoek is het opzetten van een monitoringsprogramma waarmee de bedekking en de bodemvochthuishouding in de tijd wordt gevolgd, gedurende een reeks van jaren. Het monitoren zelf gebeurt door de waterbedrijven.

In dit onderzoek kan waarschijnlijk worden aangesloten op de meetlocaties van het vorige onderzoek, maar mogelijk vallen bij nader inzien locaties daarvan af en dienen er nieuwe te worden toegevoegd. Op iedere locatie worden, op verschillende diepten, tensiometers in de grond geplaatst (dit zijn apparaten waarmee men de vochtspanning in de bodem kan meten; via de pF-curve leidt dit tot het vochtgehalte). Een osmotische tensiometer met een zeer groot meetbereik, ontwikkeld door de leerstoelgroep 'Soil Physics, Ecohydrology and Groundwater Management' (Wageningen Universiteit), zou hiervoor zeer geschikt zijn.

De bedekking van de vegetatie wordt bepaald via een digitale camera vanaf een vaste positie, die met piketten wordt gemarkeerd. Het aantal locaties bedraagt 20. De meetfrequentie zal in het begin hoog zijn, in het groeiseizoen bijvoorbeeld om de twee weken.

Een methode wordt voorgesteld om bedekking uit digitale foto's af te leiden.

De kosten van dit onderdeel worden geraamd op k€ 40. Dit bedrag is exclusief de inspanning van de waterbedrijven. Tevens is niet voorzien in de verwerking en analyse van meetgegevens.

Ad 3. Verkennend onderzoek klimaatbestendige verdampingsmodule

De bovenrandvoorwaarde in grondwatermodellen, de grondwateraanvulling, wordt dikwijls op een sterk vereenvoudigde wijze berekend. De berekening van de grondwateraanvulling gebeurt daarbij niet climate-proof. De vereenvoudigde module ONZAT die bijvoorbeeld voor het AWD-model is gebruikt, werkt met begroeiingstypen met vaste eigenschappen, zoals gewasfactor en interceptiecapaciteit. Bedekking of Leaf Area Index (LAI) zijn niet in de module opgenomen.

In dit verkennend onderzoek worden bestaande modelconcepten onderzocht en, via onder andere modelsimulaties, vergeleken. In SWAP kan rekening worden gehouden met de invloed van vegetatiebedekking doordat optioneel de LAI berekend kan worden als functie van temperatuursom, vegetatie-eigenschappen en droogtestress. De vegetatie blijft dan wel de grond homogeen bedekken. De ontwikkeling van het aandeel kale grond zit daarmee niet in dit model maar moet in het verkennende onderzoek worden ontwikkeld.

In § 5.2 is beschreven dat bijna alle bodemvochtmodellen uitgaan van eendimensionaal verticaal vochttransport, welke aanname in duinen met een aanzienlijk aandeel kale grond en mossen waarschijnlijk onjuist is (Figuur 5-1). Met vooral voor wetenschappelijke doeleinden gebouwde twee- of driedimensionale bodemvochtmodellen (Hydrus-2D, bijvoorbeeld) zou onderzocht kunnen worden wat het effect is van deze vereenvoudiging.

Tevens zal bestudeerd worden hoe de verdamping van mossen en korstmossen het beste kan worden gemodelleerd. De interceptiecapaciteit van deze vegetatielaag wordt in het laboratorium gemeten.

De kosten van dit verkennend onderzoek zijn geraamd op € 50.

Ad 4. Promotieonderzoek (2008-2011)

In een promotieonderzoek kan tegen een relatief gering budget langjarig onderzoek worden gedaan. In dit onderzoek kunnen de vorige onderzoeken worden opgenomen, dus inclusief de bepaling van bodemfysische karakteristieken en de simulatie van meerdimensionaal vochttransport. Bovendien is het de bedoeling dat meer veldgegevens worden verzameld en onderzocht wordt hoe de vegetatiebedekking zich ontwikkelt in de loop van het seizoen, afhankelijk van onder andere meteorologische omstandigheden:

- Analyse van bestaande permanente kwadraten: hoe verandert de bedekking met het weer, successie en beheer? Zelfde op basis van luchtfoto's, die in ieder geval van de AWD bekend zijn (1980-1990 en 2001).
- Regelmatige (tweewekelijkse?) schattingen van de bedekking uit van een groot aantal locaties met behulp van digitale foto's vanaf vaste posities.
- Op dezelfde plekken met tensiometers drukhoogte op verschillende diepten bepalen.
- Vergelijking van duinen uit het buitenland in een reeks van een vochtig tot een droog klimaat.
- Uit natuurlijke tracers in het grondwater (die zijn ingedikt door verdamping) de werkelijke verdamping onder verschillende vegetaties afleiden.
- Lysimeters inzetten (en gedeeltelijk weer herstellen) om de reactie van de duinvegetatie op uitdroging te bestuderen.
- De interceptiecapaciteit van mossen en korstmossen meten.
- Aan de hand van digitale hoogtegegevens voor ieder punt in de duinen berekenen hoeveel zonnestraling wordt ontvangen (en hoe vaak beschaduwing door eigen of naburige duinheuvelds optreedt). Op basis hiervan het potentiële vochttekort van vegetatieopnamen berekenen. Dit correleren aan het aandeel kale grond in de opnamen.
- Bouw van een cellulaire automaat waarmee de afwisseling in ruimte en tijd van vegetatiestructuurpatronen (bijvoorbeeld: kale grond, mossen, struiken) kan worden gesimuleerd.

Totale kosten k€ 300 (aio-plaats k€ 220, materiaalkosten k€ 40, begeleiding k€ 40).

Geraadpleegde literatuur

- Anonymus, 2007. *KNMI'06: toelichting getransformeerde tijdreeksen; versie 18-5-2007*. KNMI, De Bilt.
- Bartholomeus, R., 2004. *Implementation of a global radiation routine in SWAP and its application to inclined surfaces*. Msc verslag WUR, Wageningen.
- Bazzaz, F.A., S.L. Bassow, G.M. Berntson & S.C. Thomas, 1996. *Elevated CO₂ and terrestrial vegetation: Implications for and beyond the global carbon budget*. In: B. Walker & W. Steffen (eds.), *Global Change and Terrestrial Ecosystems*, p. 43-76. Cambridge University Press.
- De Jong, A., 1997. *IJking van de vochttoestand van de bodem met de vochtindicatie van de vegetatie volgens het ecotopensysteem*. Afstudeerverslag Landbouwwuniversiteit, Wageningen.
- Hooghart, J.C. & W.N. Lablans (red.), 1988. *Van Penman naar Makkink; een nieuwe berekeningswijze voor de klimatologische verdampingsgetallen*. Commissie voor hydrologisch onderzoek TNO, Rapporten en nota's No. 19, CHO TNO, 's-Gravenhage.
- Jansen, P.C. & J. Runhaar, 2004. *Toetsing van het verband tussen het aandeel xerofyten en de droogtestress onder verschillende omstandigheden*. Alterra rapport 1045, Wageningen.
- Jansen, P.C., J. Runhaar, J.P.M. Witte & J.C. van Dam, 2000. *Vochtindicatie van graslandvegetaties in relatie tot de vochttoestand van de bodem*. Alterra-rapport 057, Wageningen.
- Kamps, P.W.T.J., 2007. *Natuurlijke grondwateraanvulling voor het grondwaterstromingsmodel van de Amsterdamse Waterleidingduinen (AMWADU 2005)*. Waterleidingbedrijf Amsterdam, Vogelenzang.
- Kamps, P.W.T.J., 2008. *Modelstudie naar de gevolgen van klimaatverandering voor de freatische grondwaterstand in de AWD*. Waternet, Vogeklenzang.
- Kamps, P.T.W.J. & T.N. Olsthoorn, 2001. *Verdroging en vernatting van de AWD. Landschap 18: 147-160*.
- Ketner-Oostra, H.G.M., 2006. *Lichen-rich coastal and inland dunes (Corynephorion) in the Netherlands: vegetation dynamics and nature management*. Proefschrift, Wageningen Universiteit.
- Kroes, J.G., & J.C. van Dam, 2003. *Reference manual SWAP version 3.03*. Alterra, Wageningen.
- Kruijt, B., J.P.M. Witte, C. Jacobs & T. Kroon, 2007. Effects of rising atmospheric CO₂ on evapotranspiration and soil moisture: a practical approach for the Netherlands. *Journal of Hydrology* 349: 257-267.
- Lenderink, G., 2006. *KNMI '06 scenario's: interpolation to monthly changes*. Royal Netherlands Meteorological Institute, De Bilt.
- Locher, W.P. & H. de Bakker (red.), 1990. *Bodemkunde van Nederland, deel 1*. Den Bosch.
- Massop, H.Th.L., P.J.T. van Bakel, T. Kroon, J.G. Kroes, A. Tiktak & W. Werkman, 2005. *Op zoek naar de 'ware'neerslag en verdamping*. Alterra, Wageningen.
- Noest, V., E. van der Maarel & F. van der Meulen, 1995. *Impact of climate change on the ecology of temperate coastal wetlands, beaches and dunes*. In: D. Eisma (ed.), *Climate Change, Impact on coastal habitation*. Lewis Publishers, Boca Raton.

- Peña, A.G., 2003. *Castricum 30 years of lysimeter data: Sensitivity analysis and calibration with the SWAP model*. Thesis Hogeschool Zeeland, Vlissingen.
- Provincie Gelderland, 1993. *Karakteristieken van de onverzadigde zone ten behoeve van het Waterbeheer*. Arnhem.
- Runhaar, J., M. van 't Zelfde, C.L.G. Groen & R. Alkemade, 2003. *Bepaling ecotooptype en toetsing indeling in ecologische soortengroepen van vegetaties*. RIVM, Bilthoven.
- Tamis, W., 2005. Changes in the flora of the Netherlands in the 20th century. Proefschrift. *Gorteria supplement* 6.
- 't Lam, N., 2006. *Klimaatverandering en biodiversiteitspatronen in Nederlandse duinecosystemen*. Wetenschapswinkel Biologie & Universiteit Utrecht, Utrecht.
- 't Lam, N., 2007. De temperatuur stijgt, planten en dieren willen verhuizen. *Duin* 30(1): 4-5
- Van Dam, J.C., 2000. *Field-scale water flow and solute transport. SWAP model, concepts, parameter estimation and case studies*. PhD thesis, Wageningen University, Wageningen.
- Van Dam, J.C., J. Huygen, J.G. Wesseling, R.A. Feddes, P. Kabat, P.E.V. van Walsum, P. Groenendijk & C.A. van Diepen, 1997. *SWAP version 2.0, Theory. Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the Soil-Water-Atmosphere-Plant environment*. DLO Winand Staring Centre & Department Water Resources, Wageningen.
- Van de Koppel, J. & M.G. Rietkerk, 2004. Spatial interactions and resilience in arid ecosystems. *The American Naturalist* 163: 113-121.
- Van den Hurk, B., A.K. Tank, G. Lenderink, A. van Ulden, G.J. van Oldenborgh, C. Katsman, H. van den Brink, F. Keller, J. Bessembinder, G. Burgers, G. Komen, W. Hazeleger & S. Drijfhout, 2006. *KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands*. KNMI Scientific Report WR 2006-01, De Bilt.
- Van Drecht, G., 1983. *Simulatie van het verticale, niet-stationaire transport van water en een daarin opgeloste stof in de grond*. Rijksinstituut voor drinkwatervoorziening, Bilthoven.
- Van Drecht, G., 1996. *User manual Onzat, input and output description*. RIVM, Bilthoven.
- Van Genuchten, C.C.A., 1999. *Modellering van de onverzadigde zone in de Amsterdamse Waterleidingduinen. Simulatie van de grondwateraanvulling voor bestaand Modflow-model AMWADU*. Studentenscriptie TUD, Vogelenzang.
- Van Oene, H. & F. Berendse, 2001. *Predicting responses of ecosystem processes to climate change and nitrogen deposition*. In: H. van Oene, W.N. Ellis, M.M.P.D. Heijmans, D. Mauquoy, W.L.M. Tamis, A.J.H. van Vliet, F. Berendse, B. van Geel, R. van der Meijden & S.A. Ulenberg (eds), *Long-term effects of climate change on biodiversity and ecosystem processes*. Dutch National Research Programme on Global Air Pollution and Climate Change, Bilthoven.
- Van Til, M. & J. Mourik, 1999. *Hieroglyfen van het zand: vegetatie en landschap van de Amsterdamse waterleidingduinen*. Gemeentewaterleidingen Amsterdam, Amsterdam.
- Vernooij, M., 2005. *De ontwikkeling van het zoet/zout grensvlak en de grondwaterstanden in de AWD in de komende eeuw*. Afstudeerstage Hogeschool Zeeland. Waterleidingbedrijf Amsterdam, Vogelenzang.

- Von Asmuth, J.R., M.F.P. Bierkens & C. Maas, 2002. Transfer function noise modeling in continuous time using predefined impulse response functions. *Water Resources Research* 38: 2301-2312.
- Witte, J.P.M., B. Kruijt, T. Kroon & C. Maas, 2006. Verdamping planten daalt door toename atmosferische kooldioxyde. *H2O* 5: 29-31.
- Wösten, J.H.M., F. de Vries, J. Denneboom & A.F. van Holst, 1988. *Generalisatie en bodemfysische vertaling van de bodemkaart van Nederland, 1: 250 000, ten behoeve van de PAWN-studie*. Rapport 2055, Stiboka, Wageningen.
- Wösten, J.H.M., Y.A. Pachepsky & W.J. Rawls, 2001. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology*, 251, 123-150.