



# Verdamping planten vermindert door toename atmosferische kooldioxide

JAN-PHILIP WITTE, KIWA WATER RESEARCH  
 BART KRUIJT, ALTEERRA  
 TIMO KROON, RIJKSWATERSTAAT RIZA  
 KEES MAAS, KIWA WATER RESEARCH

Door verbranding van fossiele brandstoffen neemt de koolzuurgasconcentratie in de atmosfeer toe, waardoor de temperatuur op aarde zal stijgen<sup>(1)</sup>. Het KNMI heeft onlangs berekend hoeveel de verdamping in 2050 zal zijn toegenomen door deze temperatuurstijging<sup>(1)</sup>. Toename van het kooldioxidegehalte heeft echter ook tot gevolg dat planten hun huidmondjes minder ver hoeven te openen of minder huidmondjes hoeven aan te maken om in hun koolstofbehoefte te voorzien. Hierdoor daalt de verdamping juist. Dit effect van een hogere kooldioxideconcentratie is nu gekwantificeerd<sup>(2,3)</sup>; hydrologen dienen de verdamping door de vegetatie voortaan naar beneden bij te stellen en Nederland wordt minder droog dan op grond van alleen de temperatuurstijging werd verwacht.

Rijkswaterstaat heeft onlangs een studie voltooid naar de gevolgen van klimaatverandering voor Nederland<sup>(4)</sup>. Ten behoeve van deze 'Droogtestudie' heeft het KNMI klimaatscenario's opgesteld, leidend tot gesimuleerde veranderingen, per decade, van neerslag en potentiële verdamping in 2050<sup>(1)</sup>. Volgens het KNMI zullen weersextremen, meer neerslag in korte tijd én meer perioden met droogten, gaan toenemen. Bovendien zal de potentiële verdamping stijgen doordat de temperatuur stijgt. Tabel 1 geeft een overzicht van de verwachtingen aan de hand van drie klimaatscenario's. De toename van de verdamping door temperatuurstijging noemen we het temperatuureffect van klimaatverandering. In de berekening van de toekomstige verdamping is echter geen rekening gehouden met het feit dat de vegetatie bij hogere kooldioxideconcentraties anders omgaat met water. Koolstof is een groeistof voor planten en een hogere concentratie kan dus leiden tot een hogere biomassa, meer bladoppervlak en een daarmee gepaard gaande hogere verdamping. Anderzijds kunnen planten bij hogere kooldioxideconcentraties makkelijker voldoen aan hun koolstofbehoefte, zodat zij hun huidmondjes minder hoeven te openen of minder huidmondjes hoeven aan te maken, waardoor hun transpira-

In de berekening van de potentiële verdamping onder een klimaatscenario kan als volgt rekening worden gehouden met zowel het temperatuureffect als het CO<sub>2</sub>-effect:

$$ET_{pot} = c_1 \times c_2 \times g \times ET_{ref}$$

waarin:

ET<sub>pot</sub> = potentiële gewasverdamping, gecorrigeerd voor zowel het temperatuureffect als het CO<sub>2</sub>-effect (mm/d)

c<sub>1</sub> = factor voor het temperatuureffect

c<sub>2</sub> = factor voor het CO<sub>2</sub>-effect

g = gewasfactor

ET<sub>ref</sub> = referentiegewasverdamping (mm/d)

tie wordt gereduceerd. Beide effecten gecombineerd noemen we het CO<sub>2</sub>-effect van klimaatverandering.

Voor de Droogtestudie is dit effect zo goed mogelijk geschat door een combinatie van literatuuronderzoek met een berekeningsmethode<sup>(5,7)</sup>. Tabel 2 geeft het resultaat weer: factoren, voor verschillende typen begroeiing, waarmee gewasfactoren naar beneden bijgesteld dienen te worden (zie kader).

Tabel 1. KNMI-klimaatscenario's voor 2050<sup>(1)</sup>. Voor neerslag en verdamping zijn vermenigvuldigingsfactoren weergegeven, waarmee beide klimaatsvariabelen veranderen (1.030 betekent 3% toename).

	'Controlist'	'Milieudenker'	'Droog'
temperatuurstijging (°C)			
jaar	1	2	2-3
zomer	1	2	3-1
winter	1	2	2-0
verandering neerslag			
jaar	1.030	1.060	0.960
zomer	1.014	1.028	0.800
winter	1.060	1.120	1.130
verandering verdamping			
jaar	1.039	1.078	1.180
zomer	1.033	1.066	1.240
winter	1.056	1.112	1.080

Tabel 2. Voorgestelde factor C<sub>2</sub> voor de correctie van de gewasfactor. Gegeven zijn de geschatte minimale (min.), gemiddelde (gem.) en maximale (max.) verdampingsreductie.

begroeiing	jaar			zomer			winter		
	min.	gem.	max.	min.	gem.	max.	min.	gem.	max.
grasland, droge natuur	0.99	0.98	0.97	0.99	0.98	0.97	0.99	0.98	0.97
loofbos, struweel, maïs	0.98	0.96	0.94	0.98	0.95	0.92	1.00	0.99	0.99
overige akker, naaldbos	0.98	0.97	0.95	0.97	0.96	0.94	1.00	0.99	0.99
overige natuur	0.97	0.96	0.94	0.97	0.96	0.94	0.97	0.96	0.94

Literatuuronderzoek

Vegetatie verdampt in de vorm van zowel evaporatie (via bodem en water op bladeren) als transpiratie (via huidmondjes en cuticula). Transpiratie is doorgaans de grootste post in de totale verdamping (de evapotranspiratie of afgekort ET). Vooral deze post is gevoelig voor een toename van de concentratie kooldioxide in de lucht. Transpiratie van water door de huidmondjes van de bladeren vindt plaats door diffusie, veroorzaakt door een verschil in dampdruk tussen de holten in het blad onder de huidmondjes en de atmosfeer. Het watertransport wordt daarbij belemmerd door twee in serie geschakelde weerstanden: een weerstand van de huidmondjes (de stomatale weerstand  $r_s$ ) en een weerstand van de min of meer stabiele luchtlaag vlak boven de bladeren (de aërodynamische weerstand  $r_a$ ).

De stomatale weerstand is vooral afhankelijk van de lichtintensiteit, vochtcondities in de bodem, de luchtvochtigheid én de concentratie kooldioxide in de atmosfeer: bij een hogere concentratie kooldioxide wordt eerder aan de koolstofbehoefte voldaan en kan de huidmondjesopening eerder worden gereduceerd. De aërodynamische weerstand hangt af van zowel de windsnelheid als de aërodynamische ruwheid van de vegetatie. Hoe hoger de windsnelheid en hoe ruwer het oppervlak, des te intensiever de luchtuitwisseling en des lager  $r_a$  is. De gevoeligheid van de vegetatie voor stijging van de concentratie kooldioxide wordt voornamelijk bepaald door het aandeel van  $r_s$  in de som van beide weerstanden. Omdat in een

bos de luchtuitwisseling groter is dan bij een korte grasmat, heeft bos een relatief lage  $r_a$ , waardoor bos gevoeliger is voor een stijging van de concentratie kooldioxide in de lucht.

In experimenteel onderzoek naar effecten van de toename van kooldioxide worden altijd twee steekproeven in het vegetatiedek vergeleken: één met een verhoogde concentratie en één met de huidige concentratie. Uit het literatuuronderzoek blijkt dat de meeste experimenten zijn verricht in kassen, waarbij lucht de vegetatie in werd geblazen. Door de efficiënte luchttoediening werd  $r_a$  daarbij zodanig verlaagd, dat de transpiratie een sterk verhoogde gevoeligheid vertoonde voor toediening van kooldioxide. De resultaten van dergelijke experimenten zijn daardoor verre van representatief voor wat er in het vrije veld gebeurt; daarom zijn ze niet gebruikt. Alleen de resultaten van experimenten waarbij in de buitenlucht via een ring of via palen kooldioxide werd toegediend (FACE-experimenten), leken betrouwbaar genoeg om daar rechtstreeks conclusies over het CO<sub>2</sub>-effect aan te verbinden.

Overzicht processen

Het literatuuronderzoek heeft ook inzicht verschaft in de processen die het CO<sub>2</sub>-effect kunnen beïnvloeden. Deze zijn samengevat in afbeelding 1. Een versterkende relatie is met een plusteken aangegeven, een verzwakkende met een minteken. Voorbeeld: toename van de concentratie kooldioxide leidt tot een verhoging van  $r_s$  en dat leidt vervolgens tot een verlaging van de verdamping (ET). In de figuur

zijn drie domeinen te onderscheiden. Links staan de relaties tussen verdamping en de plant, boven de relaties met de atmosfeer en onder de relaties met de bodem. We gaan hier alleen kort in op de relaties met de bodem.

Verrijking met kooldioxide kan invloed hebben op zowel de voedselrijkdom als het vochtleverend vermogen van de bodem. Beide factoren koppelen terug op de verdamping. Zo zorgt verdampingsreductie door kooldioxide-toename op droge bodems voor het langer beschikbaar zijn van bodemvocht, wat de verdamping bevordert. Het bodemvochtgehalte is bovendien van invloed op de mineralisatie van organische stof en dus op de beschikbaarheid van voedingsstoffen voor de vegetatie. Zowel te natte als te droge omstandigheden reduceren de mineralisatiesnelheid. De voedselbeschikbaarheid beïnvloedt de biomassa-productie en aldus de verdamping. Tenslotte bevordert toename van de concentratie kooldioxide in de lucht in voedselarme en droge omstandigheden de uitbreiding van het wortelstelsel; planten doen dat om nutriënten te bemachtigen, die dan limiterend zijn geworden. Een groter wortelstelsel zorgt voor een betere vochtvoorziening, wat de transpiratie stimuleert.

Berekening van het CO<sub>2</sub>-effect

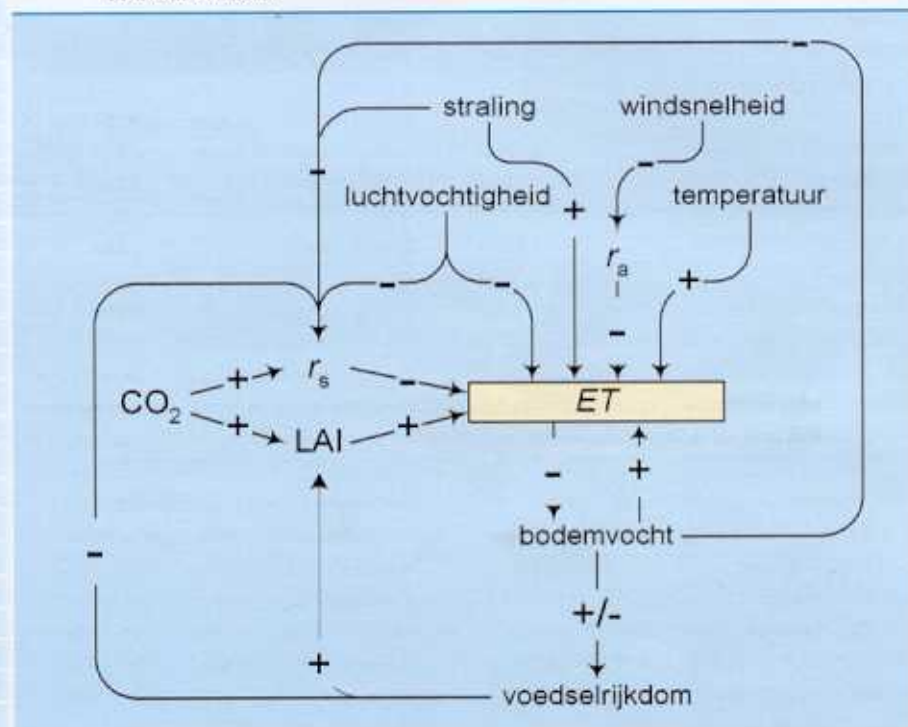
Voor verschillende typen begroeiing is het CO<sub>2</sub>-effect berekend. Dit is gedaan door literatuurgegevens over de stijging van de stomatale weerstand (door de toename van de hoeveelheid kooldioxide) te combineren met relaties tussen die weerstand en de transpiratie. Daarbij is rekening gehouden met het seizoens- en vegetatieafhankelijke aandeel van de transpiratie in de evapotranspiratie.

Uit meetgegevens in de literatuur is af te leiden dat bij elke 100 ppm toename van de concentratie kooldioxide, de stomatale weerstand stijgt met vier tot 13 procent, afhankelijk van de aërodynamische ruwheid van de vegetatie en het fotosynthetisch proces (C<sub>3</sub>- of C<sub>4</sub>-plant). De gevolgen van een stijging van de stomatale weerstand op de transpiratie is gebaseerd op onderzoek van derden<sup>4</sup>. In dit onderzoek werd een verdampingsmodel gebruikt waarin zowel  $r_s$  als  $r_a$  kunnen worden gevarieerd en dat de terugkoppeling tussen de vegetatie en het klimaat op perceelniveau simuleert. Uit dit modelonderzoek is te reconstrueren dat bij een aërodynamisch glad oppervlak (zoals een korte grasmat), na een verdubbeling van  $r_s$ , de transpiratie slechts met acht tot tien procent daalt. Bij een ruw oppervlak (bos) bedraagt die daling zo tot 38 procent.

Bijstelling van verdampingscijfers

Op basis van zowel het literatuuronderzoek als de berekeningen is tabel 2 opgesteld.

Afb. 1: Factoren die de in experimenten waargenomen effecten van de concentratie kooldioxide op de evapotranspiratie kunnen beïnvloeden.





Huidmondjes

Deze laat zien met hoeveel gewasfactoren moeten worden vermenigvuldigd wanneer de kooldioxideconcentratie stijgt met 150 ppm, zoals voorzien voor 2050. Bij het opstellen van de tabel is rekening gehouden met de aerodynamische ruwheid van de vegetatie (hoe ruwer, des te beter de luchtmening en dus des te groter de invloed van  $r_a$ ), het fotosynthesetype (C<sub>3</sub>- of C<sub>4</sub>-plant) en de vermelde temperende invloed van voedselarmoede.

Nemen we als voorbeeld een landbouwkundig 'gezond' grasland waarvoor de verdamping gelijk is aan de verdamping volgens Makink van 550 mm/jaar (gewasfactor  $g = 1$ ). Als we alleen rekening houden met het temperatuureffect, dan wordt die verdamping in 2050 bij een temperatuurstijging van één graad (Controlist-scenario, tabel 1)  $1.039 \times 550 = 571$  mm. Corrigeren we ook voor het CO<sub>2</sub>-effect (tabel 2), dan komen we uit op gemiddeld  $1.039 \times 0.98 \times 550 = 560$  mm (bandbreedte 554-566 mm) (zie kader).

Wegens de genoemde terugkoppeling van kooldioxide via bodemvocht en de stomatale weerstand op de verdamping is het niet verantwoord zo'n eenvoudig rekensommetje te maken wanneer droogtestress optreedt. Men dient dan gebruik te maken van een hydrologisch model waarin de verdamping wordt berekend in afhankelijkheid van neerslag, potentiële verdamping, hoeveelheid beschikbaar bodemwater en de capillaire opstijging vanuit het grondwater.

### Gevolgen voor het vochttekort

In de Droogtestudie is met hydrologische modellen van Rijkswaterstaat<sup>1)</sup> berekend wat veranderingen in de neerslag, de temperatuur

en de kooldioxideconcentratie samen betekenen voor het 'gemiddelde vochttekort' in het groeiseizoen<sup>5)</sup>. Dit is gedefinieerd als het cumulatieve verschil tussen potentiële en werkelijke verdamping, gemiddeld over alle landbouw- en natuurgebieden in Nederland en in een meteorologisch opzicht gemiddeld jaar.

Het gemiddelde vochttekort bedraagt onder het huidige klimaat 26 mm. Bij een temperatuurstijging van één graad wordt het vochttekort 30 mm, maar het CO<sub>2</sub>-effect brengt dit weer terug tot 26 mm (bandbreedte 25-27 mm). Het effect is dus voldoende om het temperatuureffect volledig teniet te doen. Bij sterkere klimaatsverandering in de scenario's 'Milieudenker' en 'Droog' loopt het gemiddelde vochttekort op tot respectievelijk 34 en maar liefst 82 mm. Gelukkig wordt dit gedeeltelijk gecompenseerd door het CO<sub>2</sub>-effect: houden we hiermee rekening, dan bedraagt het vochttekort bij 'Milieudenker' 29 mm (28-31 mm) en bij het scenario 'Droog' 74 mm (71-77 mm). Het CO<sub>2</sub>-effect compenseert dus gedeeltelijk voor het temperatuureffect.

### Maatschappelijk belang

Veranderingen in het vochttekort leiden tot veranderingen in gewasopbrengsten. Dit kan enorme economische gevolgen hebben. Bovendien is het verschil tussen neerslag en verdamping, de grondwateraanvulling, de motor achter de stroming van het grondwater in Nederland. Daalt deze post door klimaatverandering met bijvoorbeeld tien procent, dan daalt de grondwaterspiegel ten opzichte van de drainagebasis met ongeveer eenzelfde percentage en neemt de kwelintensiteit in de Nederlandse beekdalen ook af met tien procent. Droogteschade aan landbouw en natuur zouden daarmee kunnen verergeren. Een verandering van de grondwateraanvulling is ook van belang voor de hoeveelheid grondwater die op een ecologisch verantwoorde wijze kan worden gewonnen. Het leidingwater in Nederland wordt voor tweederde deel gewonnen uit grondwater. Sommige klimaatexperts voorspellen dat gletsjers in de Alpen grotendeels wegsmelten door het toegenomen broeikas-effect. Als deze voorspelling uitkomt, zal de afvoer van de Rijn in het voorjaar en zomer dramatisch gaan dalen, waarmee de afhankelijkheid van het grondwater - en dus van voldoende grondwateraanvulling - zal toenemen.

Het is al met al zonneklaar dat een betrouwbare voorspelling van de toekomstige verdamping van groot belang is. De effecten van temperatuurstijging (tabel 1) en CO<sub>2</sub>-toename (tabel 2) zijn echter met grote onzekerheden omgeven. Bij de vaststelling van de hydrologische gevolgen van klimaatsverandering moeten daarom zowel het temperatuureffect als het CO<sub>2</sub>-effect,

inclusief de daarbij horende onzekerheidsmarges, expliciet worden berekend. In het rapport dat ten grondslag ligt aan dit artikel, worden geschatte marges van het CO<sub>2</sub>-effect voor zowel de jaren 2050 als 2100 gegeven<sup>6),7)</sup>.

Meer onderzoek is hard nodig, en dat is met het grote maatschappelijke belang voor deze keer geen open deur:

- Het meeste experimentele onderzoek heeft plaatsgevonden aan landbouwgewassen en natuurlijke vegetaties, waarschijnlijk met het oog op gevolgen voor respectievelijk de gewasproductie en de biodiversiteit. Voor de hydrologische scenario's van Nederland is het van belang dat meer experimenteel onderzoek wordt verricht aan veel voorkomende vegetaties, zoals vette graslanden, maïsakkers en heidevelden;
- Het effect van kooldioxide op de verdamping kan ook worden onderzocht aan de hand van historische lysimeterresultaten en gemeten rivierafvoeren. De concentratie kooldioxide is de afgelopen eeuw zodanig toegenomen, dat daarvan de effecten op de verdamping aantoonbaar moeten zijn;
- Voor een betere inschatting van de effecten van veranderingen in het klimaat en de concentratie kooldioxide in de lucht dient een gekoppeld bodem-water-vegetatie-atmosfeermodel te worden gemaakt, dat op landschapsschaal gebruikt wordt. Zo'n model bevat minimaal seizoensdynamiek in groei en bladontwikkeling en moet voor hele regio's over minstens een jaar gebruikt worden. Alleen in dat geval kunnen we erop vertrouwen dat de belangrijkste terugkoppelingen goed worden meegenomen. ◀

### LITERATUUR

- 1) Beetsma J., T. Buishand en H. Buiteveld (2004). Droog, droger, droogst. KNMI/RIZA-bijdrage aan de tweede fase van de Droogtestudie Nederland. KNMI-publicatie 199-II.
- 2) Bos H., R. van Ek, J. Hoogveen, A. Kori, W. de Lange, H. Vermulst, G. Arnold en T. Kroon (1997). Water onder land tussen regen en plant ofwel landelijke modellen voor verdamping/bestrijding. RIZA. Rapport 97-062.
- 3) Gitay H., A. Suárez, D. Dokken en R. Watten (2002). Climate change and biodiversity. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- 4) Jacobs C. en H. de Bruin (1992). The sensitivity of regional transpiration to land-surface characteristics - significance of feedback. Journal of Climate nr. 5, pag. 683-698.
- 5) Klapstra D., R. Versteeg en T. Kroon (2005). Aard, ernst en omvang van watertekorten in Nederland. Eindrapport Droogtestudie Nederland. RIZA. Rapport 2005-016.
- 6) Witte J., B. Kruijff en C. Maas (2006). Effecten van CO<sub>2</sub>-toename op verdamping. Kiwa. Rapport KWR.06.003.
- 7) Witte J., B. Kruijff en C. Maas (2006). The effects of rising CO<sub>2</sub> levels on evapotranspiration. Kiwa. Rapport KWR.06.004.