

De verdamping van bossen

Inleiding

Het waterverbruik door bossen speelt een grote rol in bijvoorbeeld de mogelijke invloed van bos op de in Nederland geconstateerde grondwaterstandsdalingen [GMN, 1992], de vaststelling van waterschapslasten [Unie van Waterschappen, 1994] en de toevoer van neerslag naar het grondwater voor de drinkwatervoorziening [ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1994].

Door deze grotere ruwheid van bossen verloopt de turbulente uitwisseling van waterdamp met hogere luchtlagen en daardoor de verdamping veel sneller.

Schattingsmethoden

SWNBL-tabel

De eenvoudigste methode voor het bepalen van het waterverbruik van een bos maakt gebruik van een tabel waarin het waterverbruik als percentage van de

Samenvatting

Voor het schatten van de verdamping van bossen wordt op jaarbasis vaak gebruik gemaakt van de tabel voor het waterverbruik zoals die gepubliceerd is door de SWNBL. Gebleken is dat gebruik van deze tabel voor een Douglasopstand te Garderen een relatieve fout in het neerslagoverschot kan veroorzaken van 100% ten opzichte van het met een goed gekalibreerd model bepaalde neerslagoverschot. Een tweede probleem bij het gebruik van deze tabel is dat deze alleen geschikt is voor berekeningen op jaarbasis. Voor veel situaties is men echter juist geïnteresseerd in het waterverbruik op een kortere tijdschaal, bijvoorbeeld in de zomer (droogte) of in de winter (piekafvoeren). Hiervoor wordt wel gebruik gemaakt van de op dagbasis berekende referentie-gewasverdamping volgens Makkink in combinatie met een gewasfactor. Het gebruik hiervan gaat voorbij aan het feit dat voor bossen onderscheid gemaakt moet worden tussen interceptie-verdamping en de transpiratie bij een droge kruin. Echter ook met een aangepaste formulering is de onnauwkeurigheid in de resultaten groot. Het verdient dan ook aanbeveling voor de berekening van de verdamping van bossen gebruik te maken van modellen zoals het weerstandsmodel van Penman-Monteith. Op het moment bestaat er echter geen methode waarmee de parameters van dit model zonder een intensief meetprogramma betrouwbaar kunnen worden geschat. In afwachting van betere schattingen van de waarden van verschillende modelparameters die uit al lopende of binnenkort op te starten onderzoekprojecten moeten komen, is het belangrijk rekening te houden met het feit dat er grote onzekerheden verbonden zijn aan het waterverbruik van bossen als dat berekend wordt met de SWNBL-tabel of met de referentie-gewasverdamping volgens Makkink.



E. J. MOORS
DLO-Staring Centrum



W. BOUTEN
Universiteit van Amsterdam



A. J. DOLMAN
DLO-Staring Centrum



A. W. L. VEEN
Rijksuniversiteit Groningen

Op al deze gebieden lijkt het momenteel aan voldoende praktisch toepasbare kennis te ontbreken om adequate schattingen te kunnen geven van de grootte van de verschillende onderdelen van de waterbalans van bossen. Het berekenen van het waterverbruik van een bos met behulp van modellen is mogelijk, maar vaak erg onnauwkeurig. Dit wordt onder meer veroorzaakt doordat er relatief weinig metingen zijn gedaan, waarmee modelparameters van bossen kunnen worden bepaald. Het grootste verschil in de verdamping van een bos ten opzichte van andere (landbouw-)gewassen is dat er onderscheid moet worden gemaakt tussen de verdamping bij een droge kruin (de transpiratie¹) en de verdamping van de neerslag die is opgevangen door de kruin (de interceptieverdamping). Bij bossen is de jaarlijkse interceptieverdamping qua grootte soms vergelijkbaar met de transpiratie. Dit in tegenstelling tot de meeste landbouwgewassen waarbij de interceptieverdamping maar een fractie is van de verdamping van het droge gewas. Dit verschil wordt veroorzaakt doordat bossen een relatief grote kruinberging (dit is de hoeveelheid regenwater dat de kruin kan vasthouden) combineren met een aërodynamisch grotere ruwheid.

bruto neerslag is gegeven [Van Beusekom *et al.*, 1990]. Deze tabellen geven waarden voor een gemiddelde situatie. De nauwkeurigheid van de voorspellingen hangt af van hoe goed de specifiek te onderzoeken situatie overeenkomt met de gemiddelde situatie van de tabel.

De veel gebruikte SWNBL-tabel [Van Beusekom *et al.*, 1990] is echter niet gebaseerd op metingen, maar op model-simulaties van de verdamping waarbij ook eventueel optredende bodemvochttekorten zijn meegenomen in de simulaties. De tabel weerspiegelt het gemiddelde jaarlijkse waterverbruik van acht bostypen gekenmerkt door de overheersende boomsoort. Per bostype is het gemiddelde gebaseerd op modelberekeningen van het waterverbruik over een periode van vijf jaar bij twee verschillende bodemsoorten (zand en klei). Het model gaat uit van een gesloten kronendak en het waterverbruik van een Douglasbos is bijvoorbeeld gebaseerd op een opstand van 30 jaar, 20 m hoog, 1300 stam ha⁻¹ en een Leaf Area Index van 5 (verhouding blad-grondoppervlak). In tabel I wordt het waterverbruik van zo'n Douglasopstand uit de SWNBL-

TABEL I – Het werkelijke waterverbruik en neerslagoverschot in mm voor twee jaren (van maart – maart) berekend met een gekalibreerd model [Tiktak en Bouten, 1994] en berekend met behulp van de SWNBL tabel [Van Beusekom *et al.*, 1990].

	Bruto mm j ⁻¹	Model		SWNBL-tabel	
		Waterverbruik mm j ⁻¹	Neerslagoverschot mm j ⁻¹	Waterverbruik mm j ⁻¹	Neerslagoverschot mm j ⁻¹
1988	787	696	91	645	142
1989	870	799	71	713	156

¹ De verdamping bij een droge kruin bestaat uit drie termen: de transpiratie van de bomen, de transpiratie van de ondergroei en de verdamping van de bodem. Echter, voor de leesbaarheid worden in dit artikel deze drie termen samen als transpiratie aangeduid.

tabel vergeleken met het door Tiktak en Bouten [1994] gemodelleerde water-verbruik van een Douglasopstand te Garderen (leeftijd 29 jaar, 18 m hoog, 992 stam ha⁻¹, LAI 8-11). Tiktak en Bouten gebruikten voor hun berekeningen een relatief complex model dat gekalibreerd was met meetgegevens van de lokatie. Hierdoor zullen voor deze twee jaren hun modelresultaten redelijk goed overeenkomen met de meetresultaten. Uit tabel I blijkt dat het neerslagoverschot door de SWNBL-tabel met 50 mm j⁻¹ of meer wordt overschat ten opzichte van het gekalibreerde model. Dit voorbeeld illustreert de mate van onzekerheid in de resultaten bij het gebruik van een dergelijke tabel om het neerslagoverschot te schatten. Een uitvoerige gevoeligheids-analyse van het voor de SWNBL-tabel gebruikte model is te vinden in Dolman en Moors [1994]. Hieruit bleek onder meer dat dit model zeer gevoelig is voor de grootte van sommige parameters en dat dit tot onzekerheden in de orde van plus of min 40% in de interceptieverdamping en 25% in de transpiratie kan leiden.

Makkink referentieverdamping en gewasfactoren
Om een beter inzicht te krijgen in de verdeling van het waterverbruik binnen een jaar moet men rekenen met een kleinere tijdstap dan een jaar en voldoet de SWNBL-tabel niet meer. Het water-verbruik van bossen kan in dit geval, bijvoorbeeld in regionale hydrologische modellen [Gehrels *et al.*, 1994], worden berekend met de referentie-gewas-verdamping E_{ref} volgens Makkink [Hooghart en Lablans, 1986] en vermenigvuldigd met een gewasfactor:

$$\lambda E_{ref} = 0,65 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_g \text{ (Wm}^{-2}\text{)}$$

met:
 λ = verdampingswarmte van water (J kg⁻¹)
 Δ = helling van de verzadigingsdampdrukcurve (Pa K⁻¹)
 γ = psychrometer constante (Pa K⁻¹)
 E = verdampingssnelheid (kg m⁻² s⁻¹)
 R_g = de globale straling (W m⁻²)

De helling van de verzadigingsdampdruk-curve Δ en de psychrometer constante γ zijn een functie van de temperatuur. De factor 0,65 verdisconteert de af-hankelijkheid van de verdamping van het referentiegewas van variabelen zoals de albedo, het dampdrukdeficit, de wind-snelheid, de hoogte van het gewas, etc. Alhoewel de grootte van deze verdiscon-teringsfactor afgeleid is van de verdam-ping van kort gras, moet de verdamping

van het referentiegewas beschouwd worden als de verdamping van een hypothetisch gewas. Omdat bij een ander gewas de waarden van de variabelen verschillen ten opzichte van dit referentie-gewas, wordt de factor 0,65 aangepast door gebruik te maken van een gewasfactor. De verdamping van een bos met optimale bodemvochtcondities wordt dan: $E = f E_{ref}$ (mnd⁻¹) Hierbij is de verdampings-snelheid E_{ref} omgerekend van kg m⁻² s⁻¹ (= mm s⁻¹) naar mm d⁻¹. Voor bossen zijn geen gewasfactoren getabelleerd. Voor fruitboomgaarden wordt een gewasfactor gegeven die varieert van 1,0 in mei tot 1,7 in juli [Hooghart en Lablans, 1986]. Behalve de hierboven genoemde variabelen verdisconteert de gewas-factor, zoals die voor landbouwgewassen gegeven wordt, ook de extra verdamping van het interceptiewater. De interceptie-verdamping is echter nauwelijks af-hankelijk van de globale straling en de temperatuur, maar van de neerslaginten-siteit en hoeveelheid. Doordat de inter-ceptieverdamping bij bossen veel groter is dan bij de lagere landbouwgewassen, moet hier rekening mee worden gehouden. Een eenvoudige verbetering is mogelijk door wel onderscheid te maken in de transpiratie bij een droge kruin en de interceptieverdamping [Shuttleworth en Calder, 1979]. De transpiratie wordt berekend volgens Makkink met een gewasfactor die de transpiratie van de bomen en ondergroei en ook de ver-damping vanuit de bodem beschrijft. Voor natte omstandigheden (regen) wordt de interceptieverdamping afzonderlijk bepaald. Aangezien tijdens een dag met regen het bladerdak niet de gehele dag nat hoeft te zijn, wordt ook voor natte dagen de transpiratie (als bij een droge kruin) berekend. Deze moet dan echter wel gecorrigeerd worden voor de periode dat het gedurende die dag regent. Dit wordt bereikt door de totale verdamping E_{tot} met een fractie $c E_{int}$ te verminderen:

$$E_{tot} = E_{droog} + (1 - c) E_{int} \text{ (mmd}^{-1}\text{)}$$

Hierin is E_{droog} de transpiratiesnelheid bij een droge kruin, E_{int} de snelheid van de interceptieverdamping en c de verhouding tussen E_{droog}/E_{int} op uurbasis. Voor Nederlandse omstandigheden ligt de factor c gemiddeld in de buurt van 0,07 [Dolman, 1987].

De interceptieverdamping E_{int} kan worden berekend als een fractie van de neerslag P :

$$E_{int} = a P \text{ (mmd}^{-1}\text{)}$$

waarbij a de interceptiefraction is. Deze fractie a wordt bepaald door de capaciteit van het kronendak van een bos om water vast te houden en door de ruwheid van

het bos, die bepaalt hoe snel het water weer uit het kronendak verdampt. Uit de nu bekende metingen geldt gemiddeld voor Nederlandse bossen:

Bladverliezend: $a = 0,20$
(0,26 zomer; 0,10 winter)
Bladhoudend: $a = 0,39$

Dolman en Moors [1994] geven een overzicht van de in Nederland gemeten interceptieverliezen waarop deze ge-middelden gebaseerd zijn. Het gebruik van de referentie-gewasverdamping in combinatie met gewasfactoren houdt in dat wordt aangenomen dat de hoeveelheid bodemvocht optimaal is en geen reducerende werking heeft op de transpiratie. Dit kan tot een aanzienlijk verschil leiden tussen de aldus berekende verdamping en de werkelijk opgetreden verdamping.

Nadere analyse van de schattings-methoden

Om een beter inzicht te krijgen in de gevoeligheid van droge en natte kruin-verdamping voor meteorologische variabelen en opstandsparameters, kan gebruik gemaakt worden van de vergelijking van Penman-Monteith [Monteith, 1981]:

$$\lambda E_{Penman-Moneith} = \frac{\Delta A + \rho c_p (e_s - e) / r_a}{\Delta + \gamma (1 + r_s / r_a)} \text{ (Wm}^{-2}\text{)}$$

waarin:
 λ = verdampingswarmte van water (J kg⁻¹)
 ρ = dichtheid van lucht (kg m⁻³)
 Δ = helling van de verzadigingsdampdrukcurve (Pa K⁻¹)
 γ = psychrometer constante (Pa K⁻¹)
 c_p = specifieke warmte van lucht (J kg⁻¹ K⁻¹)
 E = verdampingssnelheid (kg m⁻² s⁻¹)
 A = beschikbare energie (W m⁻²)
 r_a = aërodynamische weerstand (s m⁻¹)
 r_s = oppervlakte weerstand (s m⁻¹)
 e_s = verzadigde dampspanning (Pa)
 e = dampspanning (Pa)

Deze vergelijking wordt wel de combinatie-vergelijking genoemd, omdat het effect van de beschikbare energie A en dat van de aërodynamische energie-uitwisseling $(e_s - e)/r_a$ in één vergelijking gecombineerd worden. De aërodynamische weerstand r_a is afhankelijk van de ruwheid van het oppervlak en de windsnelheid. De ruwheid van het oppervlak hangt in sterke mate af van de hoogte en de dichtheid van de obstakels. Vaak wordt de dichtheid van een gewas gerelateerd aan de verhouding blad-grondoppervlak (LAI). De oppervlakte weerstand r_s is onder droge omstandigheden voor-

namelijk afhankelijk van de openings-toestand van de huidmondjes van het gewas. Deze wordt beïnvloed door de straling, de temperatuur, het dampdrukdeficit, het bladoppervlak en de beschikbaarheid van bodemvocht. Deze beïnvloeding hangt af van het bostype en de lokatie (bodemsomstandigheden en omgeving).

Interceptieverdamping

Onder natte omstandigheden wordt de oppervlakte weerstand r_s gelijk nul gesteld. Hierdoor is de verdampings-snelheid van het natte oppervlak afhankelijk van de meteorologische variabelen (temperatuur, straling, dampspanning en wind) en de aërodynamische weerstand. Behalve van de verdampings-snelheid is de hoeveelheid interceptieverdamping afhankelijk van de mate waarin de kruin de neerslag kan opvangen en vasthouden, dit wordt de bergingscapaciteit van de kruin genoemd. Het kan moeilijk zijn deze nauwkeurig te bepalen. Voor bossen varieert de bergingscapaciteit van 0,2 tot 3,0 mm. De interceptiefractie a is dan ook afhankelijk van onder meer de ruwheid van de opstand, de mate van sluiting van de kruinen (bijvoorbeeld jong of oud bos), de boomsoort (dichtheid en vorm van de bladeren en de stam). Deze parameter kan ook beïnvloed worden door bijvoorbeeld ziekte of droogte. Men moet terdege rekening houden met het feit dat de waarde van deze parameter kan variëren en een afwijking van plus of min 20% niet uitzonderlijk is (voor maandelijkse waarden kan dit zelfs oplopen tot 50%). Bij een interceptiefractie van 0,39 kan dit leiden tot een onzekerheid in de schattingen van het waterverbruik of het neerslagoverschot, die kan oplopen tot 8% van de bruto neerslag. Voor de Douglas-opstand uit tabel I betekent dit, dat de variatie in de interceptieverdamping veroorzaakt door de onzekerheid in de interceptiefractie a even groot is als het totale neerslagoverschot.

Gewasfactoren en Makkink

Bij gebruik van de vergelijking van Makkink voor het berekenen van de verdamping onder droge omstandigheden zijn de gewasfactor f en de constante 0,65 de bepalende parameters. Al bij de introductie van de referentie-gewasverdamping berekend volgens Makkink werden er vraagtekens gezet bij de toepasbaarheid hiervan in het winterhalfjaar [Hooghart en Lablans, 1988]. De reden dat Makkink niet voldoet in de winter is te vinden in het feit dat in de winter in tegenstelling tot de zomer de verdamping van gras in veel grotere mate wordt bepaald door de tweede term in de

Penman-Monteith vergelijking. Deze tweede term wordt bepaald door de temperatuur, dampspanning, aërodynamische en oppervlakte weerstand. In tegenstelling tot gras en veel andere landbouwgewassen is bij bossen het hele jaar door de verdamping sterk afhankelijk van de tweede term [Beven, 1979]. De Makkink vergelijking modelleert alleen de afhankelijkheid van de eerste term, die voornamelijk bepaald wordt door de straling. Hierdoor is het twijfelachtig of de verdamping berekend met Makkink in de winter, maar ook in de zomer, vermenigvuldigd met een eenvoudige factor (de constante 0,65 en de gewasfactor) een goede methode is voor het bepalen van de verdamping van bos.

Onder de vooronderstelling dat de Penman-Monteith vergelijking met de correcte oppervlakte weerstand de verdamping goed beschrijft, is de gewasfactor de verhouding tussen de verdamping volgens Penman-Monteith en volgens Makkink:

$$f = \frac{E_{\text{Penman-Monteith}}}{E_{\text{ref}}} = \frac{\frac{\Delta A}{\Delta + \gamma(1 + r_s/r_a)} + \frac{\rho c_p (e_s - e) r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_s/r_a)}}{0,65 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_g} \quad (-)$$

Hieruit blijkt dat de gewasfactor f een functie is van meerdere variabelen en niet als constante kan worden beschouwd:

$$f = \text{functie}(A, T, e_s - e, r_s, r_a)$$

waarbij:

$$r_s = \text{functie}(r_{s,\text{min}}, R_g, LAI, T, e, \theta)$$

en

$$r_a = \text{functie}(u, h, LAI)$$

De beschikbare energie A is behalve van de globale straling R_g ook afhankelijk van onder meer de albedo van het gewas en de bodemwarmtestroom, verder staat T voor de temperatuur, θ voor het bodemvocht, u voor de windsnelheid en h voor de boomhoogte. Doordat er vanuit wordt gegaan dat het bos optimaal van bodemvocht is voorzien (inherent aan de definitie van een gewasfactor), is r_s in dit geval niet afhankelijk van θ .

De gewasfactor geeft de verhouding aan tussen de verdamping van twee gewassen, waarbij het ene gewas een hypothetisch referentiegewas is. Omdat dit referentiegewas gebaseerd is op de karakteristieken van gras, beschouwen we hier de verdamping van bos in relatie tot die van gras. Het is echter moeilijk om een vergelijking te maken tussen twee vegetatietypen op de zelfde lokatie, omdat de vegetatie behalve

de grootte van de weerstanden r_s en r_a ook de grootte van de meteorologische variabelen A , T , en $e_s - e$ beïnvloedt. Om toch enig inzicht te krijgen in de grootte van de invloed van de weerstanden van twee verschillende vegetatietypen op de verdamping en ook op de gewasfactor wordt het volgende getallenvoorbeeld gegeven. Voor twee verschillende vegetatietypen met gelijke R_g zal het verschil in luchttemperatuur en luchtdruk minimaal zijn en zullen hierdoor ook Δ , γ , ρ en c_p gelijk zijn. Karakteristieke waarden voor de weerstanden van gras zijn: $r_s = 50 \text{ m s}^{-1}$, $r_a = 50 \text{ m s}^{-1}$ en voor bos: $r_s = 125 \text{ m s}^{-1}$, $r_a = 5 \text{ m s}^{-1}$. Bij een luchttemperatuur van 20°C en een luchtdruk van 1013 hPa wordt de verdamping voor gras:

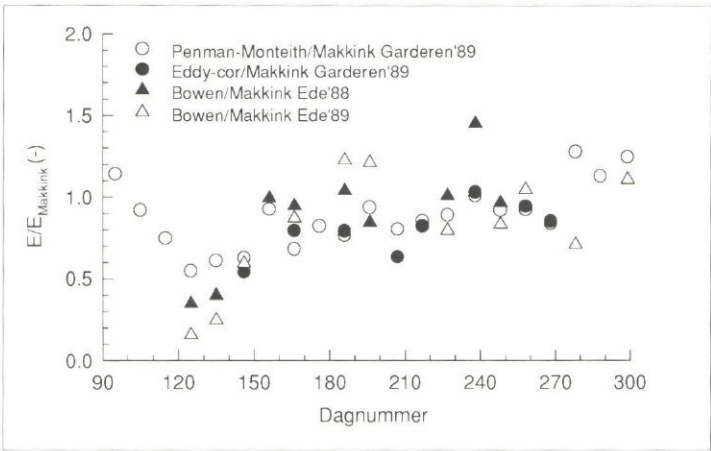
$$\lambda E_{\text{gras}} = 0,5 A_{\text{gras}} + 9(e_s - e)_{\text{gras}} \quad (\text{W m}^{-2})$$

en voor bos:

$$\lambda E_{\text{bos}} = 0,1 A_{\text{bos}} + 13(e_s - e)_{\text{bos}} \quad (\text{W m}^{-2})$$

Voor twee lokaties in Engeland waarvan de een begroeid met gras en de ander met bos zijn de gemiddelde uurtijfers over een periode van mei tot en met september met elkaar vergeleken [Beven, 1979]. Het gemiddelde dampdrukdeficit $e_s - e$ op 12 uur 's middags was voor de bos- en de graslokatie nagenoeg gelijk en bedroeg 13 hPa . De gemiddelde hoeveelheid beschikbare energie A op 12 uur 's middags verschilde wel sterk (ongeveer 30%). Voor de boslokatie was dit 330 W m^{-2} en voor de graslokatie 250 W m^{-2} . Dit geeft een verdamping van 202 W m^{-2} voor bos en van 242 W m^{-2} voor gras. Dit voorbeeld laat duidelijk zien dat bij de verdamping van bos de hoeveelheid beschikbare energie en ook de globale straling een veel kleinere rol speelt dan bij de verdamping van gras.

Alhoewel het dampdrukdeficit wel gecorreleerd is aan de globale straling en de temperatuur, is op dagbasis de spreiding groot. Bij gras leidt dit niet tot een grote onnauwkeurigheid in de verdamping, doordat vooral in het groeiseizoen de stralingsterm groot is ten opzichte van de dampdrukterm. Bij bossen is dit echter niet het geval. De consequentie hiervan is dat bij bossen de onnauwkeurigheid in de verdamping groot is, wanneer deze alleen wordt beschouwd als een functie van de globale straling en de temperatuur, zoals bij de vergelijking van Makkink het geval is. Dit betekent ook dat de verhouding tussen de verdamping van een bos en de referentiegewasverdamping (Makkink), oftewel de gewasfactor van bos, een grotere onnauwkeurigheid zal vertonen dan voor gras het geval zal zijn.



Afb. 1 – Verhouding tussen de decade gemiddelden van de gemeten transpiratie van een gemengd loofbos (Amerikaanse eik) perceel te Ede voor 1988 en 1989 en de gemeten en gemodelleerde transpiratie voor een naaldbos (Douglas) te Garderen voor 1989 en de referentie-gewasverdamping volgens Makkink. Alleen droge dagen zijn gebruikt.

TABEL II – Het waterverbruik van bossen op jaarbasis (kalenderjaar) voor twee Douglasopstanden. De gekalibreerde modelresultaten zijn afkomstig van Tiktak en Bouten [1990]. Bij Makkink + Interceptie (laatste kolom) is gerekend met $f = 0,9$, $c = 0,07$ en $a = 0,39$.

		Neerslag	Model	SWNBL-tabel	E_{ref} (Makkink)	$fE_{ref} +$ ($1 = c$) $a P$
		mm j ⁻¹	mm j ⁻¹	mm j ⁻¹	mm j ⁻¹	mm j ⁻¹
Garderen	1988	815	733	668	508	753
	1989	936	836	768	601	880
Kootwijk	1988	850	654	697	508	765
	1989	865	701	709	601	855

Metingen en modelberekeningen

In afbeelding 1 is de verhouding tussen de gemeten of gemodelleerde transpiratie en de referentie-gewasverdamping (Makkink) weergegeven voor een gemengd loofbos (hoofdzakelijk Amerikaanse eik) te Ede voor 1988 en 1989 en voor een naaldbos (Douglas) te Garderen voor 1989. Alle gegevens zoals hier afgebeeld hebben betrekking op dagsommen gemiddeld over een decade waarbij alleen de droge dagen zijn gebruikt. Te Ede is de verdamping bepaald met behulp van de Bowen-ratio methode in combinatie met de energiebalans. De referentie-gewasverdamping is berekend met de methode van Makkink en de meteorologische gegevens van Wageningen. Voor meer informatie over de lokatie en de gebruikte methode voor het bepalen van de verdamping wordt verwezen naar Hendriks *et al.* [1990]. Voor de lokatie te Ede is 1988 een relatief nat en 1989 een relatief droog jaar, vooral in de maanden juli en augustus. Te Garderen is de verdamping door het KNMI gemeten met de eddy-correlatie methode [Bosveld, 1991; Bouten, 1992] en de referentie-gewasverdamping met de methode van Makkink en de meteorologische gegevens van De Bilt. Ook zijn in afbeelding 1 voor Garderen de Penman-Monteith modelresultaten gegeven, waarbij de oppervlakte weerstand eerst als een functie van het bodemvocht, dampdrukdeficit, temperatuur, straling en LAI gekalibreerd is. Vervolgens is voor hetzelfde jaar het model nogmaals door-

gerekend, maar nu met een uitgeschakelde bodemvochtfunctie, wat neerkomt op de verdamping bij optimale bodemvochtcondities [Bosveld *et al.*, 1991]. In 1989 is de lokatie te Garderen relatief nat ten opzichte van andere lokaties en treden er dientengevolge geen of nauwelijks tekorten op in het bodemvocht. Uit de afbeelding blijkt dat de spreiding in de gewasfactor voor deze twee lokaties groot is. In de wintermaanden (niet in de afb. opgenomen) is de spreiding zodanig groot dat op basis van de huidige gegevens er geen conclusies zijn te trekken over de grootte van de gewasfactor in die maanden. Dit wordt mede veroorzaakt doordat de gewasfactor in deze maanden een ratio is van twee kleine getallen. Een bijkomend probleem in de winter is dat de verdamping van de bodem, strooisellaag of eventuele ondergroei een belangrijker rol gaat spelen in de totale verdamping. Zoals uit de analyse al naar voren kwam, is de nauwkeurigheid in de gewasfactor voor bos niet zo groot. Dit blijkt wel uit het feit dat voor de in afbeelding 1 weergegeven decade gemiddelden voor deze twee lokaties in het groeiseizoen ongeveer + of - 0,2 rond het gemiddelde van de decade varieert. Dit betekent dat de transpiratie een onzekerheid heeft van plus of min 100 mm op een totaal van 350 mm voor de maanden mei tot en met september.

Verschillen tussen schattingen

Aangezien er op het moment in Nederland geen meetreeksen over een volledig

jaar van de verdamping van een bos bestaan, worden in tabel II de verschillende besproken methoden vergeleken met gekalibreerde modelberekeningen zoals die uitgevoerd zijn door Tiktak en Bouten [1990]. Voor de al eerder genoemde lokatie te Garderen en voor een lokatie te Kootwijk (Douglas, LAI = 8-10) zijn twee jaren vergeleken. Uit tabel II blijkt dat op jaarbasis de referentie-gewasverdamping en een gewasfactor van 1,0 voor de totale verdamping van een bos aan de lage kant is. Wordt de interceptieverdamping als een functie van de neerslag meegenomen (Makkink + Interceptie) dan zijn de resultaten aanmerkelijk beter. Op jaarbasis zijn de resultaten vergelijkbaar met die van de SWNBL-tabel. De combinatie van parameterwaarden die in de tabel gebruikt is, geeft in tegenstelling tot de SWNBL-tabel voor Garderen betere resultaten dan voor Kootwijk. Als een gewasfactor van 0,7 en een interceptiefractie van 0,35 zou zijn gebruikt, zou dit omgekeerd zijn. Hieruit blijkt hoe sterk deze parameters kunnen fluctueren, zelfs binnen eenzelfde soort opstand.

Naast de variatie in de parameterwaarden speelt ook de eventuele variatie in het bodemvochtttekort tussen verschillende lokaties een belangrijke rol. Gedurende de twee jaar was het bodemvochtttekort te Kootwijk groter dan te Garderen en kunnen de berekende verschillen niet alleen toegeschreven worden aan eventuele variaties in de gewasfactor en de interceptiefractie. Doordat te Garderen het bodemvochtttekort minder was dan te Kootwijk, zal voor Garderen de werkelijk opgetreden verdamping (gesimuleerd met het model) dichter bij de verdamping berekend voor optimale bodemvochtcondities (Makkink + Interceptie) liggen, dan voor Kootwijk het geval is. Ook voor het opstellen van de SWNBL-tabel is men niet uitgegaan van optimale bodemvochtcondities, maar is rekening gehouden met de reducerende invloed van een bodemvochtttekort op de verdamping.

Conclusies

Op jaarbasis is de onzekerheid in het waterverbruik van een Douglasopstand te Garderen, zoals geschat met behulp van de SWNBL-tabel, in de orde van 10% van de bruto neerslag. Dit betekent voor deze opstand een relatieve fout in het neerslagoverschot van 100% ten opzichte van het met een goed gekalibreerd model bepaalde neerslagoverschot. De SWNBL-tabel geeft het werkelijke waterverbruik als een percentage van de jaarlijkse neerslag en is daardoor niet toepasbaar voor

studies waarbij uitspraken worden gedaan op een kortere tijdschaal dan een jaar [Dolman en Moors, 1994]. Voor veel situaties is men echter juist geïnteresseerd in het waterverbruik op een kortere tijdschaal, bijvoorbeeld in de zomer (droogte) of in de winter (piekafvoeren).

Een zeer eenvoudige en in de landbouw veel gebruikte methode voor een ruwe schatting van het waterverbruik onder optimale bodemvochtcondities op een kortere tijdstap dan een jaar is de referentie-gewasverdamping volgens Makkink in combinatie met een gewasfactor. Voor bossen moet onderscheid gemaakt worden tussen interceptie-verdamping en de transpiratie bij een droge kruin. De interceptieverdamping kan voor een bepaald bostype geschat worden als een fractie van de neerslag. De transpiratie onder droge omstandigheden wordt voornamelijk bepaald door het bladoppervlak, het bodemvocht en de meteorologische variabelen, zoals temperatuur, dampspanning en straling. Het gebruik van de referentie-gewasverdamping volgens Makkink in combinatie met een gewasfactor gaat hieraan voorbij en de resultaten zijn onbevredigend. Echter ook met een aangepaste formulering:

$$E = f E_{\text{ref}} + (1 - c) A P \text{ (mmd}^{-1}\text{)}$$

is de onnauwkeurigheid in de resultaten groot. Deze onnauwkeurigheid wordt enerzijds veroorzaakt doordat bij bossen de verdamping in veel mindere mate dan bij onder meer gras afhangt van de straling en de temperatuur, zoals in de vergelijking van Makkink wordt aangenomen. Anderzijds is de beschikbaarheid van het geringe aantal metingen in Nederland voor het bepalen van de benodigde parameters zoals de gewasfactor en de interceptiefractie hier debet aan. Gezien de grote onzekerheid in de gewasfactoren verdient het op het moment aanbeveling voor de berekening van de verdamping van bossen gebruik te maken van modellen zoals het weerstandsmodel van Penman-Monteith. Dit model maakt gebruik van een aerodynamische r_a en een oppervlakte weerstand r_s . Met behulp van de hoogte van de bomen is r_a redelijk betrouwbaar te schatten. Het probleem is echter r_s . Op het moment bestaat er geen methode waarmee deze weerstand zonder een intensief meetprogramma betrouwbaar kan worden geschat. Alhoewel er wel metingen zijn van enkele lokaties in Nederland, zie bijvoorbeeld Hendriks *et al.*, 1990, waarmee r_s voor die specifieke lokatie bepaald is of kan worden, is dit niet voldoende om daarmee betrouwbare

schattingen te doen van de grootte van r_s voor andere lokaties. In afwachting van betere schattingen van de waarden van verschillende parameters die uit al lopende of binnenkort op te starten projecten moeten komen, is het belangrijk rekening te houden met het feit, dat aan het waterverbruik van bossen berekend met de SWNBL-tabel of met de referentie-gewasverdamping volgens Makkink en een gewasfactor grote onzekerheden verbonden zijn.

Een belangrijk probleem van deze twee methoden is dat ze niet of nauwelijks rekening houden met de actuele bodemvochtcondities. In drogere jaren zal de beschikbaarheid van vocht en de verdeling daarvan binnen een bodemprofiel een belangrijke invloed op de transpiratie gaan uitoefenen. Het zal dan noodzakelijk blijken ook de processen in de onverzadigde zone goed te modelleren. Een juiste modellering van infiltratie, laterale afstroming van bosgronden en verticale herverdeling in het bodemprofiel is ook belangrijk voor een juiste voorspelling van berging en (piek)afvoeren van bosgronden.

Als de kennis van de hydrologie van bossen verbeterd wordt, dan kunnen er met meer zekerheid uitspraken gedaan worden over bijvoorbeeld de mate van aanvulling van het grondwater onder een bepaald type bos of over de grootte van het waterbezwaar afkomstig van een perceel met bos.

Om iets aan het hiaat in de kennis van de hydrologie van bossen te doen, lopen bij drie instellingen in Nederland geïntegreerde boshydrologische meetprogramma's met elk een eigen accent. Bij het DLO-Staring Centrum ligt het accent op het kwantificeren van de verschillende parameterwaarden voor een aantal bostypen in Nederland, waarbij ook gekeken wordt naar de problemen van het opschalen van deze parameters naar grotere gebieden. Bij de Rijksuniversiteit Groningen gaat de aandacht vooral uit naar de effecten die optreden bij bosranden en de opschaling hiervan. De Universiteit van Amsterdam richt zich op de effecten van bodemvocht en grondwaterstand op de transpiratie en meet, in aansluiting op het project uitgevoerd door het DLO-Staring Centrum, op ongeveer 20 lokaties de parameterwaarden voor het bepalen van de interceptieverdamping. Naast deze drie instellingen die het onderzoek uitvoeren zijn onder andere via begeleidingscommissies de volgende instellingen betrokken bij het boshydro-

logisch onderzoek: directie Natuur, Bos, Landschap en Fauna van het ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij, IKC Natuur Bos Landschap en Fauna, Vereniging van Exploitanten van Waterleidingbedrijven in Nederland, NUON-VNB, Waterleiding Friesland, Staatsbosbeheer, Unie van Landschappen en Vereniging tot Behoud van Natuurmonumenten.

Literatuur

- Beven, K., (1979). *A sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration estimates*. J. of Hydrol., 44: 169-190.
- Bosveld, F. C. (1991). *Turbulent exchange coefficients over a Douglas fir forest*. KNMI, De Bilt, WR-91-02.
- Bosveld, F. C., Bouten, W., Noppert, J. & Steingröver, E. G. (1991). *A transpiration model for Douglas fir forest*. In: CORRELACI: Identification of traditional and air pollution related stress factors in a Douglas fir ecosystem: the ACIFORN stands, Evers, P. W., Bouten, W., Grimsven, J. J. M. van & Steingröver, E. G. (Eds). De Dorschkamp Rep. 623: 163-186, Wageningen.
- Bouten, W. (1992). *Monitoring and modelling forest hydrological processes in support of acidification research*. Proefschrift Universiteit van Amsterdam.
- Dolman, A. J. (1987). *Predicting evaporation from an oak forest*. Proefschrift Rijksuniversiteit Groningen.
- Dolman, A. J. & Moors, E. J. (1994). *Hydrologie en waterhuishouding van bosgebieden in Nederland. Fase 1: Toetsing instrumentarium*. SC-DLO, Wageningen, Rapport 333.
- Gehrels, J. C., Geer, F. C. van & Vries, J. J. de (1994). *Decomposition of groundwater level fluctuations using transfer modelling in an area with shallow to deep unsaturated zones*. J. Hydrol., 157: 105-138.
- GMN (1992). *Een nieuwe evenwicht*. Rapport van de stuurgroep Grondwaterbeheer Midden Nederland, Lelystad. 63 pp.
- Hendriks, M. J., Kabat, P., Homma, F. & Postma, J. (1990). *Onderzoek naar de verdamping van een loofbos: meetresultaten en enkele modelberekeningen*. Rapport 90, Staring Centrum, Wageningen.
- Hooghart, J. C. & Lablans, W. N. (1988). *Van Penman naar Makkink. Een nieuwe berekeningswijze voor de klimatologische verdampingsgetallen*. Commissie voor Hydrologisch Onderzoek. Rapporten en Nota's 19, Den Haag.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat (1994). *Evaluatienota water*.
- Monteith, J. L. (1965). *Evaporation and environment*. In: *The state and movement of water in living organisms*, ed. Gogg, G. E. Sympos. Soc. Exper. Biol., 19: 205-234.
- Shuttleworth, W. J. & Calder, I. R. (1979). *Has the Priestley-Taylor equation any relevance to forest evaporation?* Am. Meteorol. Soc., 18: 639-646.
- Tiktak, A. & Bouten, W. (1994). *Soil water dynamics and long term water balances of a Douglas fir stand in the Netherlands*. J. Hydrol., 156: 265-283.
- Tiktak, A. & Bouten, W. (1990). *Soil hydrological system characterization of two ACIFORN stands using monitoring data and the soil hydrological model SWIF*. RIVM, Bilthoven.
- Unie van Waterschappen (1994). *Rapport inzake de omslagklassen*. Den Haag.
- Beusekom, C. F. van, Farjon, J. M. J., Foekema, E., Lammers, B., Molenaar, J. G. de & Zeeman, W. P. C. (1990). *Handboek grondwaterbeheer voor natuur, bos en landschap*. Sdu Uitgeverij, 's-Gravenhage.

