

32/uub (353) 2^e ex

**BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW**

**Gebruik van MUST bij het berekenen van de
evapotranspiratie van bos**

**O. van Dam
C.M.A. Hendriks**

Rapport 353

DLO-Staring Centrum, Wageningen, 1994



15 MEI 1995

UW 906971 *

REFERAAT

Dam, O. van en C.M.A. Hendriks, 1994. *Gebruik van MUST bij het berekenen van de evapotranspiratie van bos*. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Rapport 353; 77 blz.; 11 fig.; 9 tab.; 32 ref.; 4 aanh.

Voor het project 'Bepaling van bosgroeiplaatsen gevoelig voor grondwaterstandsaling' zijn de toepassingsmogelijkheden voor het berekenen van de evapotranspiratie van het onverzadigde-stromingsmodel MUST onderzocht. Daarvoor zijn in het model enkele berekeningen van de evapotranspiratie aangepast om het model beter toepasbaar te maken voor berekeningen aan bossen. Het gewijzigde model is gekalibreerd en gevalideerd aan evapotranspiratiemetingen in een bos bij Ede. Daarnaast is de gevoeligheid van de verschillende invoervariabelen geanalyseerd. De gewijzigde versie van MUST blijkt goed bruikbaar te zijn voor het berekenen van de evapotranspiratie van bos.

Trefwoorden: gevoeligheidsanalyse; invoervariabele, kalibratie, modelberekening, evapotranspiratie, validatie, MUST

ISSN 0927-4499

©1994 DLO-Staring Centrum, Instituut voor Onderzoek van het Landelijk Gebied (SC-DLO)
Postbus 125, 6700 AC Wageningen.
Tel.: 08370-74200; telefax: 08370-24812.

DLO-Staring Centrum is een voortzetting van: het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding (ICW), het Instituut voor Onderzoek van Bestrijdingsmiddelen, afd. Milieu (IOB), de Afd. Landschapsbouw van het Rijksinstituut voor Onderzoek in de Bos- en Landschapsbouw 'De Dorschkamp' (LB), en de Stichting voor Bodemkartering (STIBOKA).

DLO-Staring Centrum aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van DLO-Staring Centrum.

Inhoud

	blz.
Gebruikte symbolen en hun eenheden	9
Woord vooraf	11
Samenvatting	13
1 Inleiding	15
1.1 Kader	15
1.2 Doelstelling	16
1.3 Vraagstellingen	17
1.4 Opzet rapport	17
2 Werkwijze	19
3 Het programma MUST	21
3.1 Algemene structuur van MUST	21
3.2 De in- en uitvoer files	22
3.3 De berekening van de verdamping in MUST	24
3.3.1 De interceptie-module	25
3.3.2 De bovenrand-module	25
3.3.3 De evapotranspiratie-module	28
3.4 Het verloop van de grondwaterstand	33
3.5 Aanpassingen in de berekening van de aërodynamische weerstand	34
3.6 De berekening van de netto straling uit de globale straling	37
4 Het bos te Ede: de invoergegevens	39
5 De simulaties	41
5.1 Inleiding	41
5.2 Kalibratie en gevoeligheidsanalyses	41
5.2.1 Optimalisatie van R_{pi} en P1 en de gevoeligheidsanalyses	41
5.2.2 Het grondwaterstandsverloop	43
5.2.3 Het landgebruik	45
5.2.4 Schematisatie van de opbouw van de bodem	47
5.2.5 Het effect van het begin van de simulaties (dag 1 of dag 121)	48
5.2.6 Effect van de tijdstapgrootte	49
5.2.7 Simulaties met meteo-gegevens uit De Bilt	49
5.2.8 Simulaties met verschillende meteo-opties (n/N , R_n en combinatie)	51
5.3 Validatie en vergelijking SWATRE/SWACROP	52
5.3.1 Validatie van de geoptimaliseerde parameters uit 1989 aan de evapotranspiratie in 1988	52
5.3.2 Vergelijking MUST met SWATRE/SWACROP (1989)	54

6 Conclusies en discussie	57
6.1 Eindconclusies	57
6.2 Discussie	59
Literatuur	63

Aanhangsels

1 Schematische voorstelling van het verdampingsproces van MUST	67
2 De ingevoerde variabelen in de invoerfiles *.DEF, *.RTZ, *.SUB, *.INV, *.UPP en *.OUT	69
3 Gewijzigde FORTRAN programmaregels van MUST in de sub-routine EVAP.FOR	75
4 Fouten berekening (RMSE)	77

Tabellen

1 Overzicht van de belangrijkste in- en uitvoer variabelen van MUST.	23
2 Gevoeligheidsanalyse van modelparameters op de gecumuleerde actuele en potentiële evapotranspiratie, de interceptieverdamping en de grondwaterstand W (1989).	42
3 Gevoeligheidsanalyse van de parameters in de afvoerrelatie van het grondwater op de evapotranspiratie en de grondwaterstand in Ede (1989).	44
4 Resultaten van de simulaties met verschillend landgebruik, verschillende bodemopbouw en de begin dag van de simulatie (1989).	47
5 Resultaten van simulaties met verschillende tijdstapgrootte (1989).	49
6 Resultaten van de simulaties met verschillende meteostations (1989).	50
7 Resultaten van de simulaties met verschillende meteo-opties in De Bilt (1989).	51
8 Resultaten van de validatie-simulaties van 1988 en kalibraties van 1989.	52
9 Vergelijking van de resultaten van MUST en SWATRE/SWACROP in 1988.	55

Figuren

1 De evaporatie-reductie-functie of SINK term.	27
2 Relatie tussen de gewasweerstand R_c en bladwaterpotentiaal P_L .	31
3 Relatie tussen reductiefactor α_s en de bodemwaterpotentiaal P_{rs} .	33
4 Grafische weergave van de lineaire afvoerrelatie van het grondwater.	34
5 A: De Sink term, B: De bedekkingsgraad S_c gedurende het jaar.	39
6 Gemeten grondwaterstand en berekend door MUST in 1989.	44
7 Cumulatieve actuele evapotranspiratie (E_t+E_s) van Amerikaanse eik, loofbos en EBBR-evapotranspiratie in 1989.	45
8 Actuele evapotranspiratie (E_t+E_s) en de zuigspanning berekend door MUST voor landgebruik loofbos, de EBBR-evapotranspiratie en neerslag in 1989.	46
9 Cumulatieve actuele (E_{act}) en potentiële (E_{pot}) verdamping ($E_t+E_s+E_i$), de afzonderlijke actuele verdampingstermen; Transpiratie (E_t), Bodemverdamping (E_s) en Interceptieverdamping (E_i), de grondwaterstand (W), de neerslag (P) en de zuigspanning van de wortelzone (pF) voor dag 1 tot dag 365, berekend met meteo-gegevens uit De Bilt in 1989.	50
10 Cumulatieve actuele evapotranspiratie (E_t+E_s) van loofbos, Amerikaanse eik en EBBR-evapotranspiratie in 1988.	53
11 Cumulatieve actuele evapotranspiratie (E_t+E_s) met aangepaste minimale gewasweerstand R_b voor loofbos en EBBR-curve in A: 1988 en B: 1989.	54

Gebruikte symbolen en hun eenheden

Symbol	Omschrijving	eenheid
A	coëfficiënten in grondwaterafvoer vergelijking 31	d
B	coëfficiënten in grondwaterafvoer vergelijking 31	cm
a, b	coëfficiënten in straling vergelijking 11	-
a_0, a_1, a_2	tijdstap correctie-coëfficiënten vergelijking 1	-
B_r	empirische constante (0.04) in vergelijking 24	$\text{cm}^2 \cdot \text{d}^{-1}$
b	geometriefactor van het wortelsysteem	cm
C	minimum waarde Qw in grondwaterafvoer vergelijking 31	$\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$
c_u	windcorrectiefactor	-
c_{ub}	windcorrectiefactor voor windsnelheidsmetingen boven bos	-
c_{um}	windcorrectiefactor voor windsnelheidsmetingen in een nabij gelegen meteostation	-
d	nulvlakverplaatsing	m
D_r	dikte van de wortelzone	cm
E_i	interceptieverdampingflux	$\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$
E_{pen}	Penman open-water-verdampingsflux	$\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$
E_s	actuele bodemverdampingsflux	$\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$
E_t	actuele transpiratieflux	$\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$
E_{ti}	actuele evapotranspiratieflux ($E_t + E_s + E_i$)	$\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$
E_{tip}	potentiële evapotranspiratieflux	$\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$
E_{wet}	nat-gewas-verdampingsflux	$\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$
e_a	actuele dampdruk	mbar
e_s	verzadigingsdampdruk	mbar
$e_s - e_a$	verzadigingsdeficit	mbar
g	versnelling van de zwaartekracht (9.8)	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
H	gewashoogte	m
HU	meethoogte windsnelheid	m
HU_b	windsnelheidsmeethoogte boven bos	m
HU_m	windsnelheidsmeethoogte in meteostation boven gras	m
I_a	capaciteit interceptie reservoir	cm
$K(P_{rs})$	hydraulische doorlatendheid	$\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$
n/N	relatieve zonschijnduur	%
p_a	atmosferische druk (1013)	mbar
P1, P2	gewasafhankelijke empirische grootheden (bladwaterpotentialen) in vergelijking 22	mbar
P_L	bladwaterpotentiaal	mbar
P	bruto neerslag	$\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$
P_{rs}	bodempotentiaal op grenslaag wortelzone/ondergrond	mbar
P_s	netto neerslag op de bodem	$\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$
Qrs	flux door grenslaag wortelzone/ondergrond	$\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$
Qs	actuele flux door bodemoppervlak	$\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$

Symbol	Omschrijving	eenheid
Q_s^*	maximaal mogelijke flux door bodemoppervlak	cm.d^{-1}
Q_w	flux door ondergrens onverzadigde zone	cm.d^{-1}
r	gewasafhankelijke reflectiecoëfficiënt (albedo)	-
R_a	aërodynamische weerstand	s.m^{-1}
R_{a_b}	aërodynamische weerstand bij windsnelheidsmetingen boven bos	s.m^{-1}
R_{a_m}	aërodynamische weerstand bij windsnelheidsmetingen in een nabij gelegen meteostation	s.m^{-1}
R_b	basis of minimum gewasweerstand (gewasafhankelijk)	s.m^{-1}
R_c	gewasweerstand	s.m^{-1}
R_m	maximale gewasweerstand (gewasafhankelijk)	s.m^{-1}
R_a	inkomende stralingsstroombichtheid aan de rand van de atmosfeer	W.m^{-2}
RH	relatieve luchtvochtigheid	%
R_{l_0}	langgolvlige stralingsstroombichtheid	W.m^{-2}
R_n	netto stralingsstroombichtheid	W.m^{-2}
R_{p_l}	gewasafhankelijke plantweerstand voor vochttransport	d
R_{r_s}	bodemwaterpotentiaal aan de onderkant van de wortelzone	mbar
R_{s_h}	inkomende kortgolvlige stralingsstroombichtheid	W.m^{-2}
Sc	bodembedekkingsgraad	%
S_i	verzadigingsdeficit interceptie reservoir	cm
SIM	interceptiereservoir capaciteit	cm
s	hellingshoek verzadigingsdampdrukcurve	$\text{mbar.}^\circ\text{C}^{-2}$
T	temperatuur van de lucht	$^\circ\text{C}$
Δt	tijdstapgrootte	dag
u	gemeten windsnelheid	m.s^{-1}
u_s	gecorrigeerde windsnelheid op 2 meter boven de bomen	m.s^{-1}
u_2	gecorrigeerde windsnelheid op 2 meter boven de grond	m.s^{-1}
W	grondwaterstand onder maaiveld	cm
z_0	ruwheidlengte	m
z_r	referentiehoogte	m
z_s	stationshoohte	m
z_{or}	ruwheidlengte referentie punt	m
z_{os}	ruwheidslengte meteostation	m
α	evapotranspiratiereductiefactor uit vergelijking 8 en 10	-
α_s	reductiefactor voor bodemverdamping	mbar
γ	psychrometerconstante (0.67)	$\text{mbar.}^\circ\text{C}^{-1}$
ϵ	verhouding moleculair gewicht waterdamp en droge lucht (0.622)	-
κ	von Karman constante (0.41)	-
λ	verdampingswarmte van water ($2.451 \cdot 10^6$)	J.kg^{-1}
ρ	dichtheid van water (1000)	kg.m^{-3}
σ	Stefan-Boltzman constante ($5.67 \cdot 10^{-8}$)	$\text{W.m}^{-2}.\text{kg}^{-4}$

Woord vooraf

In 1992 is het project 'Bepaling van bosgroeiplaatsen gevoelig voor grondwaterstands-daling' opgestart (SC-DLO project nr. 7291). Het eindrapport van dit project wordt eind 1994 verwacht (De Vries en Hendriks, in prep.). In het kader van de tweede fase van dit project, een kwantitatieve analyse van de gevoeligheid van grondwaterstands-daling op bosgroeiplaatsen, is een onderzoek verricht naar de toepassingsmogelijkheden van het onverzadigde stromingsmodel MUST, dat door De Laat (1985) ontwikkeld is. Het onderzoek, waarvan het rapport voor u ligt, richtte zich op de optimalisatie van MUST voor de berekening van de evapotranspiratie van bos. Het geoptimaliseerde model wordt de basis waarmee in het vervolgonderzoek de kwantitatieve analyse van de gevoeligheid van grondwaterstands-daling op bosgroeiplaatsen zal worden uitgevoerd.

Voor dit onderzoek zijn geen eigen metingen verricht. De gebruikte informatie is afkomstig van de Staringreeks (Wösten et al., 1987), een onderzoek naar de evapotranspiratie van loofbos door Hendriks et al. (1990) en gegevens uit de literatuur.

Bij deze willen wij dr. A.J. Dolman, ir. E.J. Moors en ir. M.J. Ogink-Hendriks van de afdeling Agrohydrologie van SC-DLO bedanken voor het beschikbaar stellen van gegevens en voor het kritisch becommentariëren van de werkwijze en het rapport. Tevens zijn we drs. J.H. Oude Voshaar van GLW-DLO erkentelijk voor de statistische ondersteuning.

Samenvatting

Om de verdrogingsgevoeligheid van bosgroeiplaatsen in Nederland op nationale en regionale schaal kwantitatief te onderzoeken, is er behoefte aan een model met eenvoudige gegevensstromen. Invoergegevens bestaan onder andere uit gegevens van de bodemkaart 1 : 50 000 en klimaatgegevens, bijv. van het KNMI, meteostation De Bilt. Gezien het schaalniveau moet de definiëring van de bodem vrij schematisch zijn. Gewasspecifieke variabelen moeten instelbaar zijn, zodat simulatieberekeningen voor verschillende boomsoorten en/of bostypen kunnen worden uitgevoerd.

In dit onderzoek is de toepassingsmogelijkheid van het computermodel MUST (Model for Unsaturated flow above a Shallow water-Table) voor berekening van de evapotranspiratie van bos onderzocht. Om de evapotranspiratieberekeningen beter toepasbaar voor bos te maken, is de berekening van de aërodynamische weerstand en de windcorrectiefactor aangepast. Deze enigszins aangepaste versie van MUST is gecalibreerd met behulp van de resultaten van een onderzoek naar de verdamping van loofbos dat in 1988 en 1989 werd uitgevoerd door Hendriks et al. (1990). Daarnaast zijn er gevoeligheidsanalyses uitgevoerd voor de verschillende invoer parameters en zijn de voor- en nadelen van MUST nagegaan.

Bij de kalibratie van MUST is voor de benodigde gegevens over bos, bodem en klimaat gebruik gemaakt van de gegevens van het onderzoek van Hendriks et al. (1990) voor het jaar 1989. Benodigde aanvullende informatie is uit de literatuur gehaald. Er zijn simulaties uitgevoerd met de landgebruik-opties loofbos en een eigen gedefinieerd gewas 'Amerikaanse eik'. Het verloop van de grondwaterstand is geanalyseerd en de parameters in de afvoerrelatie zijn geoptimaliseerd. Ook de invloed van de opbouw van de bodem, zoals die wordt opgegeven door de gebruiker, is onderzocht. Er is gesimuleerd met drie tijdstapgroottes, te weten 1, 5 en 10 dagen. Het verschil in uitkomst van simulaties met verschillende meteorologische invoergegevens is bepaald. Tenslotte zijn er simulaties uitgevoerd met meteo-gegevens van het KNMI-station De Bilt. De simulatieresultaten konden worden vergeleken met door Hendriks et al. (1990) berekende evapotranspiratie volgens de energiebalans/Bowenratio methode en simulatieresultaten van SWATRE/SWACROP.

De geoptimaliseerde parameters zijn tenslotte gevalideerd met meteorologische gegevens uit Ede van het onderzoek van Hendriks et al. (1990) uit 1988.

Uit de resultaten van de simulaties blijkt dat MUST geschikt is voor berekeningen van de evapotranspiratie van bos. De optimale kalibratie werd gevonden met de landgebruik-optie loofbos, een tijdstapgrootte van 1 dag en invoering van de gemeten netto straling boven het bos in Ede. Simulaties met een zo gedetailleerd mogelijke schematisatie van de bodem leverde geen betere uitkomsten op maar wordt wel wenselijk geacht. Om de initiële vochtcondities van de bodem bij aanvang van de gewenste simulatieperiode goed in te stellen, is het aan te raden het model ruim voor de gewenste begindatum van de simulatie te laten starten.

Om met het model de verdrogingsgevoeligheid van bosgroeiplaatsen te kwantificeren, is het nodig het model verder aan te passen. Vooral de module van MUST waarin de interceptieverdamping wordt berekend, is voor verbetering vatbaar. Deze aanpassingen zullen in een vervolgonderzoek verder worden behandeld. Daarin zal tevens aandacht worden besteed aan de methode om grondwaterstandsdalingen te simuleren met MUST en effecten daarvan te voorspellen.

1 Inleiding

1.1 Kader

Water is van levensbelang voor alle levensvormen, en dus ook voor bos. De voor bos beschikbare hoeveelheid water in de bodem bepaalt in belangrijke mate de groei van de bomen en het voorkomen van plantensoorten. Veranderingen in de hoeveelheid bodemvocht kan leiden tot (grote) veranderingen in groei en vegetatietype. In extreme gevallen kan het zelfs leiden tot sterfte.

Onder invloed van technische ontwikkelingen en bevolkingsgroei hebben afgelopen decennia grote ingrepen plaatsgevonden in de waterhuishouding. Landbouwgronden zijn beter ontwaterd, neerslag wordt versneld afgevoerd en er wordt steeds meer grondwater gewonnen voor drinkwaterwinning, beregening van landbouwgronden en industriële doeleinden. Het gevolg hiervan is dat de grondwaterstand in grote delen van het land is gedaald. Onbedoeld is hierdoor verdroging opgetreden in natte en vochtige bos- en natuurgebieden die hun waarde juist danken aan hoge grondwaterstanden.

Het thema verdroging staat dan ook al geruime tijd in de belangstelling. In de studie 'Verdroging van natuur en landschap in Nederland' geeft Braat (1989) een overzicht van de verdrogingstoestand op dat moment. Ook in het rijksbeleid voor het landelijk gebied vormt verdroging een belangrijk thema. In het onlangs verschenen Bosbeleidsplan (LNV, 1993) is de doelstelling opgenomen het areaal verdroogde bodems van bos- en natuurgebieden met 25% te verminderen. Dit sluit aan bij andere beleidsplannen zoals de 3^e Nota Waterhuishouding, Natuurbeleidsplan, Nationaal Milieubeleidsplan en de Structuurnota Groene Ruimte. In het kader van de Evaluatienota Water zijn de provincies verzocht het rijksbeleid verder uit te werken. Door Hendriks (1994) en De Vries en Hendriks (in prep.) zijn nationale en regionale overzichten gegeven van verdrogingsgevoelige bossen, waarop een ruimtelijk bosbeleid kan worden gebaseerd. Deze studies droegen een kwalitatief karakter.

Met behulp van modelsimulaties kunnen ook kwantitatieve uitspraken worden gedaan over de kwetsbaarheid van bosgroeiplaatsen voor grondwaterstandsdalingen. Volgens Van den Burg (1987) is de groei van bos evenredig gekoppeld aan de transpiratie. Dit biedt mogelijkheden om verdrogingseffecten via verandering in verdamping te berekenen, en zijn derhalve modellen bruikbaar waarin gewasverdamping wordt gesimuleerd.

Naast beleidsinstanties zijn terreinbeherende en uitvoerende instanties belanghebbenden bij kennisontwikkeling van verdroging. Zo is een belangrijke taak van de Technische Commissie Grondwater Beheer (TCGB) van de Landinrichtingsdienst het aangeven van de gevolgen van een grondwateringreep voor andere bij het grondwater betrokken belangen, bijvoorbeeld landbouw en bosbouw. Voor het berekenen van schade aan landbouwgewassen door grondwaterstandsverlagingen is een kwantitatieve

methode ontwikkeld (Van Lanen, 1984; Bouwmans, 1990) gebaseerd op het computer-model MUST (De Laat, 1985). Voor bosschadeberekeningen is een meer kwalitatieve methode ontwikkeld (Werkgroep bosschade, 1986) op basis van een beoordelingsstelsel van gronden voor bosbouw (Van Soesbergen, 1986; Waenink en Van Lynden, 1986). Deze methode werd o.a. toegepast door Hendriks (1988) en Van Delft (1991). Beiden concludeerden dat de methode voor verbetering vatbaar was.

In een studie van de Nationale Raad voor Landbouwkundig Onderzoek (NRLO) is de huidige kennis van verdroging geïnventariseerd en zijn voorstellen gedaan voor wenselijk onderzoek (Steenvoorden et al., 1991). Eén van die voorstellen geeft aan dat onderzoek naar de waterbalans van bossen en natuurterreinen en aanpassing van modellen meer aandacht verdient. Door Dolman en Moors (1994) wordt onderzoek verricht naar de ontwikkeling van een zo goed mogelijk modelconcept voor de waterbalans van bossen onder Nederlandse omstandigheden. Het model moet inzicht kunnen geven in beleids- en beheerseffecten op de waterbalans. Terugkoppeling van het bos als reactie op een veranderde hydrologische situatie maakt geen deel uit van het onderzoek van Dolman en Moors. In onze studie is dat nu juist het doel: kwantificeren van het effect van een veranderde grondwaterstand op de groei van bos.

1.2 Doelstelling

Doel van dit onderzoek was na te gaan of het model MUST (Model for Unsaturated flow above a Shallow water-Table; De Laat, 1985) bruikbaar is om de verdamping van bos te simuleren.

Bos is een meerjarig 'gewas' en heeft door de hoogte van de bomen, het wortelsysteem en de opbouw in het algemeen, geheel andere karakteristieken dan de meer gangbare landbouwgewassen of grasland. Vooral de berekeningen aan de verdampingskant vereisen specifiekere methoden dan die van standaard landbouwgewassen.

De keuze voor MUST is door de volgende overwegingen ingegeven:

- in MUST kan bos standaard als landgebruik-optie worden gekozen;
- de invoer van gewasafhankelijke parameters alsmede de karakterisering van de bodemopbouw is relatief eenvoudig;
- uit een modelvergelijkingsstudie, met onder andere ook MUST en SWATRE (CHO-TNO, 1984), kwam naar voren dat de getoetste modellen alle de grondwaterstroming en gewasverdamping goed en in dezelfde orde van grootte simuleerden;
- de Landinrichtingsdienst (LD) gebruikt MUST voor het berekenen van landbouwschade, zodat het voor de hand ligt hier voor bos bij aan te sluiten.

Het onderzoek naar kwantificering van verdrogingseffecten op bosgroei is in een aantal fasen onderverdeeld. In dit rapport zijn de resultaten vermeld van een studie naar de bruikbaarheid van het model MUST bij berekeningen van verdamping van bos. In een vervolgstudie zal worden onderzocht hoe de module in MUST voor het berekenen van de interceptieverdamping kan worden verbeterd en hoe verdamping

aan groei kan worden gekoppeld. Tevens zal in één of meerdere regio's een gebieds-dekkende gevoeligheidsanalyse voor grondwaterstands daling worden uitgevoerd.

1.3 Vraagstellingen

Uit de probleemomschrijving van de tweede fase van het project bosverdroging zijn de onderstaande probleem- en vraagstellingen te formuleren:

1. Berekent MUST de actuele en potentiële evapotranspiratie nauwkeurig genoeg om het te kunnen gebruiken in regionale en nationale verdrogingsstudies? Zijn er aanpassingen nodig in de programmatuur om het model te optimaliseren, en zo ja; welke?

2. Wat is de invloed van de verschillende invoer parameters op de evapotranspiratie?

En meer in het algemeen:

3. Wat zijn de voor- en nadelen van MUST? Voldoet het aan de eis van eenvoudige gegevens in- en uitvoer betreffende bodem-, klimaat- en gewasspecifieke variabelen?

1.4 Opzet rapport

Allereerst wordt in hoofdstuk 2 de werkwijze behandeld. In hoofdstuk 3 wordt ingegaan op het programma MUST, de berekening van de verdamping in MUST en de voor dit onderzoek aangebrachte wijzigingen in het programma. Hoofdstuk 4 behandelt het model bos van het onderzoek van Hendriks et al. (1990), waar de basisinformatie voor dit onderzoek van afkomstig is. De uitgevoerde kalibratie-simulaties, gevoeligheidsanalyses en validatie-simulaties worden behandeld in hoofdstuk 5. Het laatste hoofdstuk tenslotte sluit af met de conclusies van dit onderzoek.

Aangezien de uitvoer van MUST volgens de Engelse spelling is geprogrammeerd, is in dit rapport de programma uitvoer van MUST ook in de Engelse spelling gegeven. Bij getallen staan er dus punten i.p.v. komma's (530.9 i.p.v. 530,9). Uitzonderingen daargelaten zoals 'loofbos' in plaats van 'deciduous forest' om de leesbaarheid te vergroten.

In het rapport van Hendriks et al. (1990) wordt onder evapotranspiratie de som van transpiratie en bodemverdamping verstaan en onder verdamping de som van evapotranspiratie en interceptieverdamping. Aangezien in dit rapport de onderzoeksresultaten van Hendriks et al. voortdurend worden vergeleken met de eigen onderzoeksresultaten, wordt dezelfde terminologie aangehouden.

2 Werkwijze

MUST wordt voornamelijk gebruikt voor verdampingsberekeningen aan landbouwgewassen, bijv. bij shadeberekeningen aan gewassen als gevolg van grondwateronttrekking (Bouwmans, 1990). In het programma kan echter ook loof- of naaldbos als landgebruik-optie worden gekozen. Als eerste verkenning van dit model is het gecalibreerd met metingen van de evapotranspiratie door Hendriks et al. (1990) in een opstand van Amerikaanse eik nabij Ede. In dit onderzoek van Hendriks et al. zijn metingen verricht voor het bepalen van de evapotranspiratie volgens de energiebalans/Bowen-ratio methode (kortweg EBBR-methode). De EBBR-methode combineert de verdeling van voelbare en latente (verdampings-)flux met de som van deze fluxen. Voor de beschrijving van deze methode wordt verwezen naar het rapport van Hendriks et al. (1990).

In dit onderzoek is MUST versie 2.1 gebruikt. Voor de kalibratie van MUST zijn twee landgebruik-opties binnen MUST doorgerekend. De standaard landgebruik-optie 'loofbos' en een eigen gedefinieerd gewas 'Amerikaanse eik'. De wijze waarop de evapotranspiratie wordt berekend, verschilt tussen deze twee landgebruik-opties. Om enig inzicht te krijgen in de wijze waarop de evapotranspiratie wordt berekend, zijn de twee methoden van de landgebruik-opties voor het berekenen van de evapotranspiratie geanalyseerd. Om MUST beter toepasbaar te maken voor het gebruik van berekeningen aan bos, zijn enkele berekeningen in het programma aangepast. Dit wordt behandeld in hoofdstuk 3. Deze 'vernieuwde' versie van MUST is vervolgens gecalibreerd en gevalideerd, waarbij voor enkele modelparameters een gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd.

De simulaties die voor de kalibratie werden uitgevoerd hadden betrekking op:

- het optimaliseren van nog onbekende parameters;
- gevoeligheidsanalyses van de overige parameters;
- aanpassingen in de ingevoerde meteo-gegevens van het meteostation in het bos bij Ede;
- simulaties verricht met meteo-gegevens van het KNMI-station De Bilt.

De met MUST verkregen resultaten van deze simulaties zijn steeds vergeleken met de berekende evapotranspiratie door Hendriks et al. met de EBBR-methode. De uitkomst van de berekening van de evapotranspiratie met de EBBR-methode wordt daardoor als referentie aangenomen. Hendriks et al. (1990) hebben in hun onderzoek de evapotranspiratie tevens gesimuleerd met het aangepaste model SWATRE/SWACROP. De twee modellen worden alleen met elkaar vergeleken, om in te schatten of de modelsimulaties met MUST realistisch zijn. De optimalisatie van de modelparameters is uitgevoerd door het minimaliseren van het verschil tussen modeluitkomsten en gemeten waarden. Hiervoor is steeds de Root Mean Square Error (RMSE) berekend (aanhangel 4).

In de uitvoer-module van MUST wordt de (actuele en potentiële) verdamping en de interceptieverdamping weggeschreven. De verdamping bestaat uit de gesommeerde term van transpiratie, bodemverdamping en interceptieverdamping. De (actuele en potentiële) evapotranspiratie, dit is de gesommeerde transpiratie en bodemverdamping, wordt éénvoudig verkregen door de totale verdamping te verminderen met de interceptieverdamping ervan af te trekken.

De kalibratie-simulaties zijn uitgevoerd met meteorologische gegevens uit 1989, die verzameld zijn door Hendriks et al. (1990) in het bos te Ede. De geoptimaliseerde parameters voor de twee landgebruik-opties zijn gebruikt voor de validatie van MUST. Dit is gebeurd met de meteorologische gegevens uit 1988. Er kunnen zodoende uitspraken worden gedaan over:

- welk landgebruik, de standaard loofbos-optie of het eigen gedefinieerde gewas, de beste resultaten geeft voor het berekenen van de evapotranspiratie van bos;
- de optimale waarde van de parameters die kunnen worden opgegeven;
- welke ingevoerde meteorologische variabelen de beste resultaten geven;
- de waarde van de absolute uitkomsten van de simulaties als er wordt gerekend met meteo-gegevens uit De Bilt.

3 Het programma MUST

Dit hoofdstuk behandelt het programma MUST (vs. 2.1) met de nadruk op de berekening van de actuele en potentiële evapotranspiratie en de aanpassingen in de programmatuur die zijn aangebracht. De overige berekeningen, zoals de onverzadigde stroming, worden slechts summier behandeld. Voor een uitvoerige beschrijving van deze berekeningen wordt verwezen naar de handleidingen (De Laat; 1985, 1989), de dissertatie van De Laat (1980) of het rapport van de ad hoc groep verdamping (1984).

3.1 Algemene structuur van MUST

MUST (Model for Unsaturated flow above a Shallow water Table) is een pseudo-stationair model. Hierin wordt de waterbeweging in de bodem, die in werkelijkheid niet stationair is, benaderd als een aaneenschakeling van stationaire toestanden. Per tijdstap wordt de verandering van de vochtinhoud van het bodemprofiel en de flux door de onderrand voorwaarden bepaald. Daaruit wordt met behulp van de waterbalans de actuele (en potentiële) evapotranspiratie berekend (Bouwman, 1990). De minimum tijdstapgrootte is 1 dag. De bodem wordt opgebouwd uit een wortelzone en een ondergrond, die beide uit één of meerder lagen kunnen bestaan (homogene of heterogene opbouw). De dikte van de wortelzone wordt gedurende het groeiseizoen constant verondersteld. Dit kan fouten opleveren voor éénjarige gewassen, maar zal voor bos geen problemen opleveren (Bouwman, 1990). In de wortelzone wordt de drukhoogte of pF overal gelijk verondersteld. Daardoor kan er geen verticale stroming binnen de wortelzone optreden. De wateropname van het gewas via de wortels is een functie van de drukhoogte.

De berekeningen aan de verdampingskant voor het bepalen van de actuele en potentiële verdamping, zoals interceptieverdamping, transpiratie en bodemverdamping worden, voor zover van toepassing, in afzonderlijke modules berekend. De in deze modules gebruikte modellen, vergelijkingen en methoden worden uitgebreid besproken in paragraaf 3.3. In aanhangsel 1 wordt een schematische voorstelling gegeven van het verdampingsproces in MUST.

In de ondergrond wordt voor iedere tijdstap de stromingssituatie berekend. Dit resulteert in een flux door respectievelijk de boven- en ondergrens. De onderrand voorwaarde wordt gedefinieerd met de flux, de grondwaterstand of een grondwaterstands-afvoer relatie. De bovenrand voorwaarde betreft de neerslag en desgewenst berekening. Drainage of irrigatie (berekening) kunnen eveneens worden gedefinieerd. Door de gebruiker moet van te voren worden opgegeven dat bij overschrijding van de infiltratiecapaciteit het neerslag water wordt afgevoerd of als plassen achter blijft om op een later tijdstip alsnog aan het bodemvocht te worden toegevoegd. Alle neerslag wordt verondersteld in de vorm van regen te zijn. Voordat met de eigenlijke bereke-

ningen wordt begonnen, wordt door MUST de relatie tussen drukhoogte en capillaire opstijging bepaald en welk verzadigingstekort daarbij optreedt.

De Laat (1985) geeft aan, dat de werking van het model afneemt met diepe grondwaterstanden, e.g. meer dan 3 tot 5 meter en met zware gronden. De benaderde constante stroming wordt niet bereikt binnen een acceptabel tijdsinterval. Het model is tevens minder geschikt voor gronden met zwel- en krimpkleien. Infiltratie neerslag kan rechtstreeks de verticale krimp-scheuren inlopen en zo de capillaire ruimte overslaan en door de horizontale scheuren wordt de hydraulische doorlatendheidskarakteristieken ernstig verstoord. In de modellenvergelijking van CHO-TNO (1984) blijkt dat geen enkel model hier correcties voor toepast.

MUST simuleert de onverzadigde stroming niet in detail. Daarin verschilt het met vele andere modellen. De exacte bodemvocht verdeling wordt niet berekend. Deze minder gedetailleerde benadering is over het algemeen geaccepteerd met het oog op de accuratesse van de beschikbare bodemfysische gegevens en de horizontale heterogeniteit in het veld (De Laat, 1985). Hierdoor wordt de computerrekentijd sterk beperkt en is de gegevensinvoer relatief eenvoudig. De volgende paragraaf behandelt deze invoergegevens zoals ze worden opgeslagen in de invoerfiles.

3.2 De in- en uitvoer files

In tabel 1 is een opsomming gegeven van de belangrijkste in- en uitvoergegevens van MUST. De standaard waarden zijn opgeslagen in ASCII invoerfiles en kunnen door de gebruiker worden gewijzigd. Hieronder volgt een korte uitleg over de invoer files, die nodig zijn voor berekeningen met MUST. Programma-opties waarmee in dit onderzoek niet is gerekend, zoals drainage, worden niet behandeld. Omdat in dit onderzoek de grondwaterstand wordt berekend, is de invoerfile *.LOW, waarin de grondwaterstand per tijdstap kan worden opgegeven, leeg. De aanwezigheid ervan is wel vereist voor het rekenen met MUST. Tenslotte wordt de uitvoerfile *.OUT behandeld. Voorbeelden van deze files zijn te vinden in aanhangsel 3.

*.RTZ en *.SUB

In de *.RTZ en *.SUB-files worden gegevens opgenomen omtrent de vochtkarakteristieken van respectievelijk de wortelzone en de ondergrond, te weten de gemiddelde doorlaat coëfficiënt ($m.d^{-1}$) en het verzadigingsdeficit (mbar). Deze worden door MUST berekend uit de pF-curves. Daarvoor moeten pF-curves worden ingevoerd per textuurklasse.

*.UPP

In de *.UPP file worden de meteorologische gegevens ingevoerd. Er kan gekozen worden voor drie opties, te weten:

KMETEO=1 waarbij wordt opgeslagen: Windsnelheid ($m.s^{-1}$), Zonneschijnduur (-), Relatieve luchtvochtigheid (-), Temperatuur ($^{\circ}C$) en Neerslag ($cm.d^{-1}$),

KMETEO=2 waarbij wordt opgeslagen: Windsnelheid, Relatieve luchtvochtigheid, Temperatuur, Neerslag en Netto straling ($W.m^{-2}$) of

KMETEO=3, waarbij wordt opgeslagen: Windsnelheid, Zonneschijnduur, Relatieve luchtvochtigheid, Temperatuur, Neerslag en Netto straling.

De windsnelheid, zonneschijnduur, netto straling, temperatuur en relatieve luchtvochtigheid moeten als 24 uren gemiddelden worden ingevoerd. De neerslag moet als dagsom worden ingevoerd en wanneer de tijdstapgrootte meer dan één dag is als gemiddelde dagsom. Het verschil tussen deze drie opties bepaald de methode voor het berekenen van de netto straling en de verdamping van een nat gewas. Hier wordt in het volgende hoofdstuk verder op ingegaan.

Tabel 1 Overzicht van de belangrijkste in- en uitvoer variabelen van MUST.

INVOER	
Weersgegevens	— windsnelheid, temperatuur, relatieve luchtvochtigheid, neerslag, netto straling en/of zonneschijnduur
Onderrandvoorwaarde	— basisafvoer per tijdstap of — grondwaterstand of — grondwaterstand-afvoerrelatie
Bodemfysische gegevens	— vochtkarakteristiek effectieve wortelzone — vochtkarakteristiek en capillair geleidingsvermogen per laag van de ondergrond — hysteresisfactor
Geometrie bodem	— dikte van de wortelzone en onderscheiden lagen van de ondergrond
Gewasgegevens	— bodemgebruik met gewasspecifieke parameters: minimum en maximum gewasweerstand, reflectiecoëfficiënt, bladweerstand tegen vloeistofstroming, bodembedekking, gewashoogte en groei gedurende het groeiseizoen
Berekening	— pF waarde of mate van vochttekort waarbij berekend dient te worden — grootte van de beregeningsgift
Drainage	— definiëring drainage stelsel (diepte, onderlinge afstand, diameter, lengte) — doorlaatbaarheid boven- en onderlaag en de stromingsweerstand naar een diepere aquifer
UITVOER	
	— gesommeerde hoeveelheid beregeningswater per tijdstap
	— neerslag flux (per tijdstap en gesommeerd)
	— potentiële verdamping (per tijdstap en gesommeerd)
	— actuele verdamping (per tijdstap en gesommeerd)
	— gesommeerde verdamping van het interceptiewater per tijdstap
	— Penman open-water-verdamping (per tijdstap en gesommeerd)
	— grondwaterstandsdiepte beneden maaiveld per tijdstap
	— flux door de onderrand
	— flux door de onderrand van de wortelzone
	— gemiddelde drukhoogte van de wortelzone
	— verzadigingstekort wortelzone
	— verzadigingstekort gehele profiel
	— verzadigingstekort wegzijgingsprofiel

*.INV

In deze file worden de tijdsafhankelijke gegevens opgeslagen, namelijk: de meethoogte van de windsnelheid, simulatiejaar, begindag van de simulatie, de tijdstapgrootte, het aantal tijdstappen, het landgebruik, de initiële grondwaterstand en initiële grondwaterfluxen, de coëfficiënten in de afvoerrelatie van het grondwater en gegevens omtrent irrigatie/drainage, wanneer daar sprake van is (wordt niet verder behandeld).

*.DEF

In deze file staan de gewasspecifieke parameters en enkele tijdsafhankelijke variabelen. Met MUST kan standaard worden gesimuleerd met: gras, graan, maïs, aardappelen, suikerbieten, loof- en naaldbos. Daarnaast is het mogelijk zelf een landgebruik in te voeren, zoals in dit onderzoek de Amerikaanse eik.

Tijdsafhankelijke variabelen zijn:

1. gewashoogte H in relatie tot het dagnummer en
2. bodembedekking Sc in relatie tot het dagnummer.

De overige gewasafhankelijke variabelen zijn:

3. de capaciteit van het interceptie reservoir SIM;
4. de coëfficiënten waarmee het interceptiereservoir wordt gecorrigeerd voor een tijdstap;
5. de reflectie coëfficiënt r;
6. de gewasweerstand voor vloeistofstroming R_{pi} ;
7. de basis of minimum gewasweerstand Rb;
8. de coëfficiënten P1 en P2 in de relatie voor Rc en
9. de maximum gewas weerstand Rm.

En een bodemafhankelijke variabele:

10. de sink-term functie, zoals ook in SWATRE (Feddes, 1971) wordt gebruikt. Tenslotte wordt een 'array-'nummer opgegeven die verwijst naar een in het programma opgenomen standaardreeks van maximaal mogelijk pF waarden in de wortelzone.

*.OUT

In deze file worden de resultaten van de berekeningen weggeschreven. Naast een overzicht van de belangrijkste ingevoerde gegevens door de gebruiker en de voorbereidende berekeningen van MUST, volgt de opsomming van de uitvoergegevens per tijdstap. MUST heeft een standaard uitvoervariabelen set, waarnaast de gebruiker andere uitvoervariabelen kan laten weggeschreven naar aparte files.

3.3 De berekening van de verdamping in MUST

Deze paragraaf behandelt de berekeningen aan de verdampingskant van de waterbalans, zoals ze in de originele versie van MUST (vs. 2.0 & 2.1) worden uitgevoerd. Aanpassingen in de berekeningen worden in paragraaf 3.5 behandeld. In aanhangsel 1 is een schematische voorstelling van het verdampingsproces in MUST gegeven. Het verdampingsproces wordt behandeld aan de hand van drie in het model voorkomende modules: de interceptie-module, de module voor het oplossen van de bovenrand fluxen en de evapotranspiratie-module.

3.3.1 De interceptie-module

De interceptieverdamping E_i (cm.d^{-1}) is afhankelijk van de bodembedekkingsgraad Sc (%), de opslagcapaciteit van het interceptiereservoir SIM (cm) en de nat-gewasverdamping E_{wet} (cm.d^{-1}) (paragraaf 3.3.3, formule 21). De opslag van interceptie water wordt analoog aan de berging van bodemvocht uitgedrukt als een verzadigingsstekort. Het verzadigingsstekort van het interceptiereservoir S_i (cm), is het verschil tussen de capaciteit van het interceptiereservoir I_a (cm), en de aanwezige hoeveelheid interceptiewater. De maximale capaciteit van het interceptiereservoir SIM (cm) is gewas afhankelijk. De capaciteit van het interceptiereservoir is afhankelijk van de bodembedekkingsgraad Sc en de tijdstapgrootte. Zodoende geldt:

$$\begin{aligned} I_a &= \dot{S}c * SIM && \text{voor tijdstapgrootte 1 dag en} \\ I_a &= Sc * SIM * [a_0 + a_1\Delta t + a_2(\Delta t)^2] && \text{voor tijdstapgrootte } > 1 \text{ dag} \end{aligned} \quad (1)$$

met a_0 , a_1 en a_2 gewas afhankelijke correctie-coëfficiënten (-) voor de tijdstapgrootte Δt (dagen). De berekening van de interceptieverdamping geschiedt als volgt. Bereken uit de waterbalans het verzadigingsdeficit van het interceptiereservoir S_i^* (cm) op tijdstap $n+1$, waarbij wordt verondersteld dat de gehele neerslagflux P (cm.d^{-1}) gedurende de tijdstap wordt opgevangen door het gewas. S_i^* wordt 0 als het een negatieve waarde zou krijgen.

$$S_i^* = S_i - (Sc * P * \Delta t) \quad (2)$$

De interceptieverdamping E_i (cm.d^{-1}) wordt berekend volgens:

$$\begin{aligned} E_i &= Sc * E_{wet} \quad \text{met de maximale waarde;} \\ E_i &= \text{minimum}(E_i * \Delta t, I_a - S_i^*) / \Delta t \end{aligned} \quad (3)$$

Deze maximale waarde van E_i voorkomt dat E_i groter wordt dan de hoeveelheid water in het interceptiereservoir I_a .

3.3.2 De bovenrand-module

De bovenrand-module behandelt de potentiële verdamping, de actuele verdamping en de bovengrensflux. De potentiële verdamping kan door MUST uit de meteorologische gegevens en gewasparameters worden berekend of door de gebruiker worden opgegeven. Met ingevoerde potentiële verdamping waarden is in dit onderzoek niet gewerkt. De berekeningsmethode wordt wel toegelicht. Wanneer MUST de potentiële verdamping moet berekenen, wordt eerst de bovengrensflux bepaald om daarmee de potentiële verdamping te berekenen. Bij te natte of te droge bodemvocht condities is een optimale transpiratie niet mogelijk en wordt de potentiële verdamping gereduceerd voor het bepalen van de actuele verdamping. Het verdampingsdeel van de bovengrensflux, de transpiratie en bodemverdamping, wordt in de evapotranspiratiemodule uitgerekend en de interceptieverdamping, dat onderdeel is van de actuele en potentiële verdamping, wordt in de interceptie-module berekend.

Potentiële verdamping wordt berekend

Voor het berekenen van de potentiële verdamping E_{up} (cm.d^{-1}) wordt eerst de grootte van de maximale bovengrensflux Q_s^* (cm.d^{-1}) bepaald. De bovengrensflux is het verschil tussen de neerslag die het bodemoppervlak bereikt P_s en de opwaartse flux van transpiratie E_t (cm.d^{-1}) en bodemverdamping E_s (cm.d^{-1}). De bruto neerslagflux P (cm.d^{-1}) kan door de vegetatie geheel of gedeeltelijk worden opgevangen, zodat de neerslagflux die de bodem bereikt P_s (cm.d^{-1}), de netto neerslag, meestal kleiner is dan P , volgens:

$$P_s = P - E_i \quad (4a)$$

of in termen van het verzadigingsdeficit van het interceptiereservoir:

$$P_s = P - (S_i - S_i^*) / \Delta t \quad (4b)$$

met E_i (cm.d^{-1}) de interceptieverdamping (paragraaf 3.3.1). Hierbij wordt een beregnings- of een irrigatiescenario buiten beschouwing gelaten, aangezien daarmee in dit onderzoek niet is gerekend. De maximaal mogelijke flux door het bodemoppervlak Q_s^* (cm.d^{-1}) kan worden geschreven als:

$$Q_s^* = E_s + E_t - P_s \quad (5)$$

Voor een gegeven ondergrensflux Q_w (cm.d^{-1}) wordt de flux Q_s^* iteratief bepaald. Daartoe wordt allereerst P_s berekend in de interceptie-module van MUST. De potentiële verdamping is nog onbekend en is afhankelijk van de bodempotentiaal van de wortelzone P_{pr} (mbar). Daartoe worden eerst de bodemverdamping E_s en transpiratie E_t berekend in de evapotranspiratie-module, waarbij de P_{pr} uit de vorige tijdstap wordt gebruikt. Dit geeft een eerste schatting van de bovengrensflux Q_s^* . Met de nieuwe bovengrensflux wordt een betere waarde voor P_{pr} geschat in de module van de onverzadigde zone. De procedure wordt herhaald totdat het absolute verschil tussen de berekende waarden van $E_s + E_t$ tussen twee iteraties kleiner is dan $0,001 \text{ cm.d}^{-1}$. Tenslotte wordt $E_s + E_t$ bepaald, waarin de maximale bovengrensflux Q_s^* wordt vervangen door de actuele bovengrensflux Q_s (cm.d^{-1}), wat resulteert in:

$$E_s + E_t = Q_s + P_s \quad (6)$$

Tezamen met de reeds berekende interceptieverdamping E_i levert dit de potentiële verdamping E_{iip} (cm.d^{-1}) volgens:

$$E_{iip} = E_t + E_s + E_i \quad (7)$$

De actuele verdamping E_{ci} (cm.d^{-1}) is gelijk aan de potentiële verdamping, tenzij de bodemvochtcondities in de wortelzone ongunstig zijn voor het gewas en de potentiële verdamping moet worden gereduceerd. Deze reductie treedt op bij een te natte of te droge bodem. De reductie wordt alleen uitgevoerd op de gesommeerde bodemverdamping en transpiratie ($E_s + E_t$). De bodemvochtconditie heeft geen effect op de interceptieverdamping. De reductie treedt op bij een te natte of te droge bodem. In een te natte wortelzone kunnen wortels door zuurstof gebrek niet optimaal functioneren. In een te droge wortelzone kan het gewas door het tekort aan vocht en daarmee

gepaard gaande hoge zuigspanning, eveneens niet optimaal water onttrekken om aan de verdampingsvraag te voldoen.

Reductie door een te natte wortelzone

In een te natte bodem is de wortelzone nagenoeg verzadigd en de flux Q_s^* , die omhoog gericht is, is te groot om het inkomende water in de wortelzone te bergen. Het resterende watervolume kan niet worden opgeslagen in de wortelzone. Door de gebruiker kan worden opgegeven of dit water moet worden afgevoerd ('run-off') of moet worden bewaard voor infiltratie tijdens de daaropvolgende tijdstap ('ponding'). Door deze natte condities wordt nu $E_t + E_s$ gereduceerd met de reductiefactor α (-).

De mate van reductie wordt geregeld met het 'natte' gedeelte van de door Feddes (1978) ingevoerde evaporatie-reductie-functie of SINK-term. De algemene vorm van de SINK-term is afgebeeld in figuur 1. Hierin wordt afgebeeld de reductiefactor α tegen de drukhoogte (pF) van de wortelzone. De reductie ten gevolge van te natte condities treedt op bij pF waarden lager dan het omslagpunt PF-C. De actuele verdamping E_u (cm.d^{-1}) volgt uit:

$$E_u = \alpha (E_t + E_s) + E_i \quad (8)$$

Hieruit volgt dat bij pF waarden hoger dan het omslagpunt PF-C (figuur 1), α gelijk is aan 1 en zodoende E_u gelijk is aan E_{tip} (formule 7).

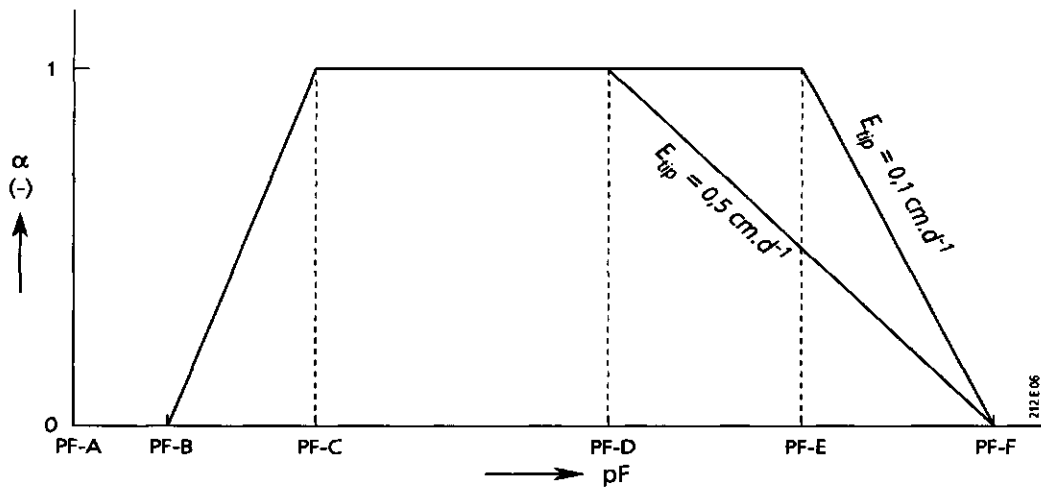


Fig. 1 De evaporatie-reductie-functie of SINK term.

Een verzadigde wortelzone betekent niet altijd dat de ondergrond ook verzadigd is. De (verzadigde) hydraulische doorlatendheid kan een snelle percolatie van bodemwater van de wortelzone naar de ondergrond tegengaan. In deze situatie berekent het model een grondwaterstand die beneden de wortelzone ligt, terwijl er nog steeds water op het bodemoppervlak aanwezig is. MUST simuleert in deze situatie een schijn-grondwaterspiegel, maar alleen gelet op de grenslaag wortel zone/ondergrond.

Reductie door een te droge wortelzone

Als de zuigspanning van de wortelzone het verwelkingspunt nadert en de opwaartse flux Q_s^* groter is dan de capillaire flux van de ondergrond naar de wortelzone, wordt de actuele bovengrensflux Q_s (cm.d^{-1}) gelijk aan de capillaire flux van het bodemvocht van de ondergrond naar de wortelzone Q_{rs} (cm.d^{-1}). De waarde van het verwelkingspunt kan door de gebruiker worden opgegeven (meestal pF 4,2). Vervolgens is de actuele bovengrensflux Q_s kleiner dan Q_s^* . De actuele verdamping wordt verkregen door de potentiële verdamping te verminderen met het verschil tussen Q_s^* en Q_s volgens:

$$E_{ii} = (E_r + E_s) - (Q_s^* - Q_s) + E_i \quad (9)$$

Potentiële verdamping is opgegeven

Wanneer door de gebruiker de potentiële verdamping is opgegeven wordt deze gereduceerd met de (gehele) SINK-term (figuur 1) bij zowel te natte als te droge vochtcondities in de wortelzone.

Reductie ten gevolge van te natte condities in de wortelzone treden op bij pF waarden lager dan omslagpunt PF-C.

Uitdrogingsreductie met de SINK-term treedt op voor drie trajecten:

— voor de verdampingflux groter dan $0,5 \text{ cm.d}^{-1}$ begint de reductie bij een pF waarde groter dan omslagpunt PF-D;

— voor de verdampingflux minder dan $0,1 \text{ cm.d}^{-1}$ begint de reductie bij een pF waarde groter dan omslagpunt PF-E;

— voor een verdampingflux tussen $0,5$ en $0,1 \text{ cm.d}^{-1}$ begint de pF waarden tussen de omslagpunten PF-D en PF-E. De pF waarde waarbij de reductie begint wordt lineair geïnterpoleerd (logaritmische schaal).

De actuele verdamping wordt verkregen volgens:

$$E_{ii} = \alpha * E_{ip} \quad (10)$$

Hieruit volgt dat de reductiefactor en daarmee de actuele verdamping nul wordt bij pF waarden lager dan omslagpunt PF-B (te nat) en pF waarden hoger dan omslagpunt PF-F (te droog).

3.3.3 De evapotranspiratie-module

Berekening met netto straling of zonneshijnduur

De netto straling R_n (W.m^{-2}) wordt gebruikt bij de berekening van de nat-gewas-verdamping E_{wet} (formule 21) en de Penman open-water-verdamping E_{pen} of Penman-verdamping (formule 28). De netto straling kan door de gebruiker worden ingevoerd. Deze kan door MUST echter ook worden berekend met behulp van de relatieve zon-

neschijnduur n/N (%). De procedure die daarbij gevolgd wordt, staat in deze paragraaf.

De inkomende stralingsstroombichtheid aan de rand van de atmosfeer, R_a ($W.m^{-2}$), wordt berekend voor het nummer van de dag in het jaar DAYN (MUST programma variabele), halverwege de tijdstap Δt (d) en de breedtegraad. De berekening geschiedt volgens de procedure ASTRO, die is ontwikkeld bij het KNMI (De Bruin, 1977). De berekening van de inkomende kortgolvlige straling R_{sh} ($W.m^{-2}$) geschiedt volgens:

$$R_{sh} = R_a (a + b * n/N) \quad (11)$$

waarin a en b model parameters zijn resp. 0.20 en 0.60 groot (waarden specifiek voor Nederland met breedtegraad 52°) en n/N de relatieve zonneshijnduur (%). De berekening van de langgolvlige stralingsstroombichtheid, R_{lo} ($W.m^{-2}$), gebeurt volgens:

$$R_{lo} = \sigma(273+T)^4 (0.47 - 0.067\sqrt{RHe_s})(0.2 + 0.8n/N) \quad (12)$$

met σ de Stefan-Boltzmann constante ($5.67 \cdot 10^{-8} W.m^{-2}.kg^{-2}$), T de luchttemperatuur ($^\circ C$) en e_s de verzadigingsdampdruk (mbar) en RH de relatieve luchtvochtigheid (%). Deze meteorologische variabelen hebben betrekking op 24 uren gemiddelden en zijn gemeten op een hoogte van 2 meter.

De verzadigingsdampdruk e_s (mbar) en de hellingshoek s ($mbar.^\circ C^{-2}$) van de verzadigingsdampdrukcurve worden berekend uit de empirische formules:

$$e_s = 1.3332 \exp [(17.25 * T) / (237.3 + T) + 1.51977] \text{ en} \quad (13)$$

$$s = (4093.425 * e_s) / (237.3 + T)^2 \quad (14)$$

De actuele dampdruk e_a (mbar) wordt vervolgens berekend volgens:

$$e_a = e_s * RH \quad (15)$$

De netto straling R_n ($W.m^{-2}$) wordt tenslotte berekend volgens:

$$R_n = (1 - r) R_{sh} - R_{lo} \quad (16)$$

met r de reflectiecoëfficiënt of albedo (-), die gewasafhankelijk is.

Wanneer zowel de netto straling als de zonneshijnduur wordt opgegeven, wordt de zonneshijnduur gebruikt voor de berekening van de Penman-verdamping E_{pen} (formule 28) en de netto straling voor de nat-gewas-verdamping E_{wet} (formule 21).

Berekening van de aërodynamische weerstand en nat-gewas-verdamping

De aërodynamische weerstand R_a ($s \cdot m^{-1}$) wordt gebruikt bij het berekenen van de nat-gewas-verdamping E_{wet} ($cm \cdot d^{-1}$). De aërodynamische weerstand van een gewas kan worden berekend als de ruwheidslengte, nulvlaksverplaatsing en de windsnelheid boven een gewas bekend zijn. De ruwheidslengte z_0 (m) en de nulvlaksverplaatsing d (m), hangen af van de gewashoogte H (m) volgens:

$$z_0 = 0.1 * H \quad \text{en} \quad (17a)$$

$$d = 0.7 * H \quad (17b)$$

De gegevens over de windsnelheid u ($m \cdot s^{-1}$) zijn meestal afkomstig van een naburige meteostation en gemeten op meethoogte HU (m). Meteostations worden voor wat betreft de ruwheid, verondersteld ideaal te zijn, met een ruwheidslengte van 0.03 m (Ad hoc groep Verdamping, 1984). Dit is de ruwheidslengte van een fictief open en vlak ideaal terrein. Deze windsnelheid moet worden geëxtrapoleerd naar de eigenlijke windsnelheid u_s ($m \cdot s^{-1}$) boven het gewas volgens:

$$u_s = c_u * u \quad (18)$$

waarin de correctiefactor c_u (-) wordt bepaald volgens:

$$c_u = \frac{\ln\left(\frac{60}{0.03}\right)}{\ln\left(\frac{HU}{0.03}\right)} * \frac{\ln\left(\frac{2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{60}{z_0}\right)} \quad (19)$$

Daarbij wordt verondersteld dat de windsnelheid op hoogte 60 meter, de mesowind, overall gelijk is, ongeacht de ruwheid van het onderliggende aard oppervlak (Wieringa en Rijkooft, 1983). Met de windsnelheid boven het gewas kan nu de aërodynamische weerstand R_a ($s \cdot m^{-1}$) worden bepaald:

$$R_a = \frac{1}{\kappa^2 u_s} \left[\ln\left(\frac{2}{z_0}\right) \right]^2 \quad (20)$$

waarin κ von Kármán constante (0.41) en u_s ($m \cdot s^{-1}$) de windsnelheid boven het gewas. Bij de landgebruik-opties naald- en loofbos wordt in MUST de aërodynamische weerstand van bos niet berekend maar op $10 s \cdot m^{-1}$ gesteld. Deze waarde is afgeleid door de ad hoc groep verdamping (1984). Met de aërodynamische weerstand, de netto straling en het verzadigingsdeficit $e_s - e_a$ (mbar) kan de nat-gewas-verdamping E_{wet} ($cm \cdot d^{-1}$) worden berekend volgens Penman-Monteith (Monteith, 1965). De berekening geschiedt volgens:

$$E_{wet} = \left(\frac{86400}{10} \right) \frac{\frac{sR_n + \gamma \epsilon \rho_a (e_s - e_a)}{\lambda} + \frac{\gamma \epsilon \rho_a (e_s - e_a)}{p_a Ra}}{s + \gamma} \quad (21)$$

waarin λ de verdampingswarmte van water ($2.451 \cdot 10^6 \text{ J.kg}^{-1}$) is, γ de psychrometerconstante ($0.67 \text{ mbar.}^\circ\text{C}^{-1}$), ϵ de verhouding tussen het moleculair gewicht van waterdamp en droge lucht (0.622), ρ_a de dichtheid van lucht (1.2047 kg.m^{-3}), p_a de atmosferische druk (1013 mbar), met verwaarlozing van de bodemwarmtestroom en in de eenheden $86400/10 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ($\approx \text{cm.d}^{-1}$). De nat-gewas-verdamping wordt gebruikt bij de berekening van de actuele transpiratie E_t (formule 26) en de interceptieverdamping E_i (formule 3).

Gewasweerstand en actuele transpiratie

De gewasweerstand R_c (s.m) wordt gebruikt bij de berekening van de actuele transpiratie E_t (cm.d^{-1}) (formule 26).

Indien gekozen wordt voor een landgebruik dat geen bos is (dus geen 'deciduous' of 'coniferous forest'), is R_c een functie van de bladwaterpotentiaal P_L (mbar). De gewasweerstand varieert van een minimale waarde R_b (dit is de basis gewasweerstand) tot een maximale waarde R_m . De mathematische formulering is als volgt:

$$\begin{aligned} R_c &= R_b && \text{voor } P_L \geq P_1 \\ R_c &= R_b - (R_b - R_m) * [(P_1 - P_L) / (P_1 - P_2)] && \text{voor } P_1 > P_L > P_2 \\ R_c &= R_m && \text{voor } P_L \leq P_2 \end{aligned} \quad (22)$$

met de omslagpunten P_1 en P_2 in mbar. Figuur 2 verduidelijkt de berekening van R_c als afhankelijke van P_L . Waarden voor P_1 , P_2 , R_b en R_m zijn opgenomen in de standaard variabelen lijst.

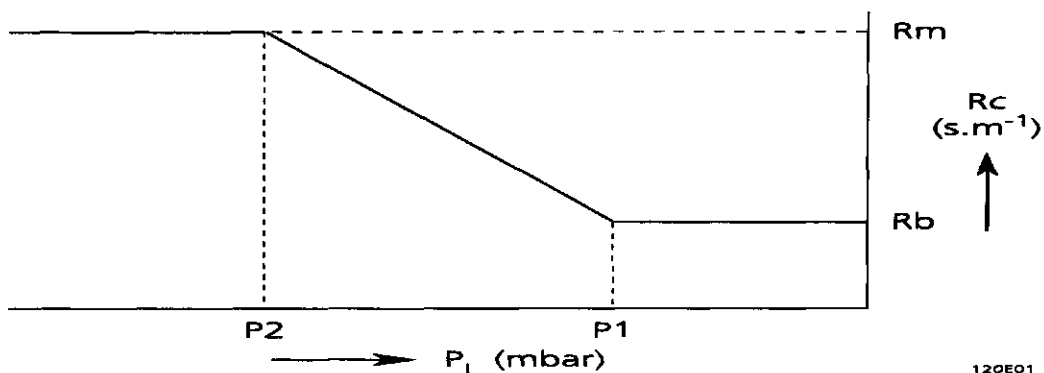


Fig. 2 Relatie tussen de gewasweerstand R_c en bladwaterpotentiaal P_L .

De bladwaterpotentiaal P_L (mbar) wordt binnen MUST als volgt berekend:

$$P_L = P_{rs} - 3E_t * [R_{pl} + \frac{b}{K(P_{rs})}] * [\frac{\rho g 10^{-4}}{Sc}] \quad (23)$$

met P_{rs} de matrix potentiaal (mbar) van het bodemvocht aan de onderzijde van de wortelzone, E_t de actuele transpiratie (cm.d^{-1}), R_{pl} de plantweerstand voor vochttransport (d), b de geometriefactor van het wortelsysteem (cm), $K(P_{rs})$ hydraulische doorlatendheid (cm.d^{-1}) en g de versnelling van de zwaartekracht (9.8 m.s^{-2}). De geometriefactor van de wortelzone volgt uit:

$$b = B_r * (R_{pl} / D_r) \quad (24)$$

waarin B_r een empirische constante is ($0.04 \text{ cm}^2.\text{d}^{-1}$) en D_r de dikte van de wortelzone (cm).

Bij landgebruik loof- of naaldbos ('deciduous/coniferous forest') wordt de gewasweerstand berekend in relatie tot de verzadigingsdeficit $e_s - e_a$ (mbar):

$$\begin{aligned} Rc &= Rb && \text{voor } e_s - e_a \leq 3 \text{ mbar} \\ Rc &= Rb + 25 * [(e_s - e_a) - 3] && \text{voor } e_s - e_a > 3 \text{ mbar} \end{aligned} \quad (25)$$

De actuele transpiratie E_t (cm.d^{-1}) voor dat gedeelte van de bodem dat bedekt wordt door het gewas, wordt gebruikt bij het berekenen van de actuele (en potentiële) verdamping (paragraaf 3.3.2, bovenrand-module) en berekend volgens:

$$E_t = \frac{s + \gamma}{s + \gamma (1 + \frac{Rc}{Ra})} (E_{wet} - \frac{E_t}{Sc}) * Sc \quad (26)$$

Penman open-water-verdamping en actuele bodemverdamping

De Penman open-water-verdamping E_{pen} (cm.d^{-1}) wordt gebruikt in de berekening van de actuele bodemverdamping E_s (cm.d^{-1}) (formule 29). Voor de berekening van de Penman-verdamping wordt de gemeten windsnelheid gecorrigeerd naar een windsnelheid op 2 meter u_2 (m.s^{-1}) volgens:

$$u_2 = 2u * [\log(HU / 0.02)] \quad (27)$$

De Penman-verdamping E_{pen} (cm.d^{-1}) wordt overeenkomstig E_{wet} berekend volgens:

$$E_{pen} = \frac{86400}{10} * \frac{\frac{sRn}{\lambda} + 3.10^{-6}\gamma(0.54u_2 + 0.5)(e_s - e_a)}{s + \gamma} \quad (28)$$

Wanneer door de gebruiker zowel de netto straling R_n als de zonneshijnduur zijn opgegeven wordt de in de berekening van de Penman open water verdamping de netto

straling berekend. De netto straling wordt dan berekend met een reflectiecoëfficiënt van $r = 0.06$ (r van water). De actuele bodemverdamping E_s (cm.d^{-1}) voor dat gedeelte van de bodem dat niet bedekt wordt door het gewas ($1 - S_c$) wordt gebruikt bij de berekening van de actuele (en potentiële) verdamping (paragraaf 3.3.2, bovenrand-module) en wordt berekend volgens:

$$E_s = \alpha_s * E_{pen} (1 - S_c) \quad (29)$$

waarin α_s een reductie factor (-) is. De empirische constante α_s is afhankelijk van de bodemwaterpotentiaal in de wortelzone P_{rs} (mbar) volgens formule 30 en zoals uitgezet in figuur 3:

$$\alpha_s = 1 - [\log(1 - P_{rs}) / 4.2] \quad (30)$$

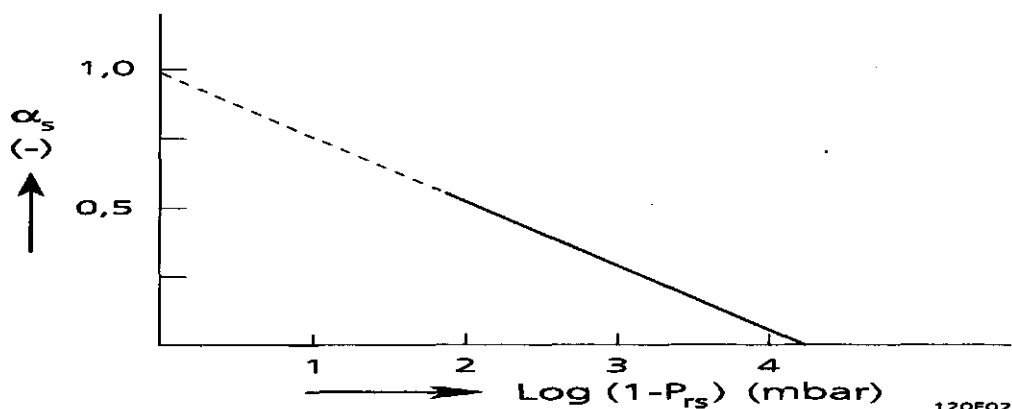


Fig. 3 Relatie tussen reductiefactor α_s en de bodemwaterpotentiaal P_{rs}

De verschillen tussen de landgebruik-opties

In MUST wijkt de evapotranspiratieberekening van bos (naald- en loofbos) gedeeltelijk af ten opzichte van de overige landgebruik-opties. De verschillen zijn:

- de aërodynamische weerstand R_a wordt voor bos niet berekend maar op 10 s.m^{-1} gesteld (formule 20);
- de gewasweerstand R_c is geen functie van de bladwaterpotentiaal P_L (formule 22), maar wordt berekend in relatie tot het verzadigingsdeficit $e_s - e_a$ (formule 25).

In paragraaf 3.5 wordt op deze verschillen verder ingegaan.

3.4 Het verloop van de grondwaterstand

Het verloop van de grondwaterstand gedurende de simulatieperiode kan door de gebruiker worden opgegeven of door MUST worden berekend. Bij de berekening door MUST kan er gekozen worden uit drie afvoerrelaties, te weten: exponentieel, logaritmisch en lineair. De lineaire relatie geeft het meest begrijpelijke verband, d.w.z. de

ingevoerde variabelen in de vergelijking zijn te relateren aan het grondwaterstandsverloop. Deze optie heeft zodoende de voorkeur en is bij de simulaties gebruikt. Er zijn simulaties uitgevoerd met de overige relaties, maar de resultaten waren onbevredigend en worden verder niet besproken. De lineaire afvoerrelatie is van de vorm:

$$Q_w = A - (A / B) * W, \quad (31)$$

met $Q_{w_{min}} = C$

waarin Q_w (cm.d^{-1}) de flux door de ondergrens van de onverzadigde zone, W (cm) het niveau van de grondwaterspiegel onder maaiveld en A , B en C constanten (figuur 3). De constante A (d) is de maximale flux, de constante B (cm) stelt de diepste grondwaterstand aan het eind van het groeiseizoen voor en de constante C (cm.d^{-1}) is de minimum waarde van de flux Q_w . De waarde van B ligt dieper dan de door de gebruiker opgegeven initiële grondwaterstand, waarmee MUST begint te rekenen op dag 1. Naast de initiële grondwaterstand worden de initiële fluxen van de ondergrens (verzadigde zone \rightarrow onverzadigde zone) en de bovengrens (onverzadigde zone \rightarrow atmosfeer) opgegeven. Figuur 4 verduidelijkt de lineaire afvoerrelatie van het grondwater.

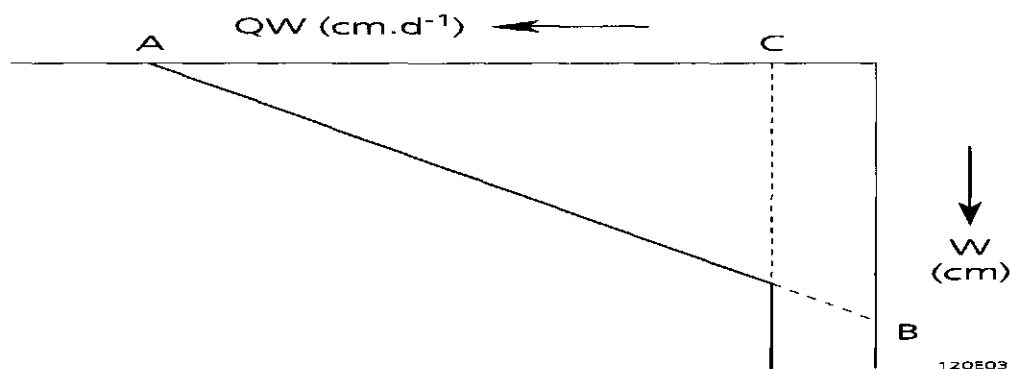


Fig. 4 Grafische weergave van de lineaire afvoerrelatie van het grondwater.

3.5 Aanpassingen in de berekening van de aërodynamische weerstand

Voor het specifiek toepasbaar maken van MUST voor berekeningen aan bossen, zijn enkele wijzigingen aangebracht in de berekening van de verdamping. Standaard corrigeert MUST de gemeten windsnelheid op meethoogte H_U naar een standaard hoogte van 2 meter boven maaiveld. Impliciet wordt aangenomen dat de gegevens zijn verzameld in een meteorologisch station met optimale meetomstandigheden, e.g. omgeven door een vlakke, open ruimte en begroeid met kort gras (ruwheidslengte 0.03 m). Omdat de boomhoogte meestal hoger is dan 2 meter, moet voor bos de berekening van de windcorrectiefactor c_u (formule 19) en van de aërodynamische weerstand R_a (formule 20), die wordt gebruikt in de berekening van de nat-gewas-verdamping E_{wet} (formule 21) en de Penman-verdamping E_{pen} (formule 28), worden aangepast. In de originele versie van MUST wordt voor berekeningen aan bos de aërodynamische

weerstand constante verondersteld en op 10 s.m^{-1} gesteld. In de aangepaste versie van MUST zijn bovenstaande problemen opgelost. In het kort zijn de veranderingen: — de gemeten windsnelheid wordt gecorrigeerd naar de windsnelheid op 2 meter boven het bos; — de aërodynamische weerstand voor bos wordt berekend; — er wordt onderscheid gemaakt tussen windsnelheidsmetingen boven het bos en in een meteostation in de nabijheid van het bos met een ruwheidslengte van 0.03 m (open vlak ideaal terrein) (Ad hoc groep Verdamping, 1984).

De afleiding van de windcorrectiefactor is behandeld in het rapport van de ad hoc groep verdamping (1984) met behulp van de windcorrectiemethode zoals beschreven door Wieringa en Rijkoort (1983). Op 60 meter boven het aardoppervlak wordt verondersteld dat de wind overal dezelfde snelheid heeft, de mesowind, ongeacht de ondergrond. Een gemeten windsnelheid op één plaats met een bepaalde ondergrond kan worden geëxtrapoleerd naar de windsnelheid op andere plaats met een andere ondergrond. Daartoe moet de wind worden gecorrigeerd met een correctiefactor. De algemene vorm van deze correctiefactor c_u volgens Wieringa en Rijkoort (1983) luidt:

$$c_u = \frac{\ln\left(\frac{z_r}{z_{0r}}\right) \ln\left(\frac{60}{z_{0s}}\right)}{\ln\left(\frac{60}{z_{0r}}\right) \ln\left(\frac{z_s}{z_{0s}}\right)} \quad (32)$$

waarin z_r de referentiehoogte (m), z_{0r} de ruwheidslengte (m) van de referentiehoogte, z_s de meethoogte van de windsnelheid (m) (gelijk aan HU) en z_{0s} de ruwheidslengte (m) op de locatie en hoogte waarop de windsnelheid wordt gemeten. Om deze correctiefactor specifiek voor bos toepasbaar te maken is de mesowind op 100 meter boven het aardoppervlak gesteld, aangezien de boomhoogte 20 meter of meer kan zijn. De referentiehoogte wordt op twee meter boven het bos gesteld $H+2$ (Nonhebel, 1987), met H de boomhoogte (m). Voor berekeningen boven bos geldt dat er bij een gesloten ruwheid ($z_0=1$ m en $d=10$ m) gerekend moet worden vanaf de hoogte z_r-d , dus $H+2-d$ ($d=0.7 \cdot H$, formule 17b) (Wieringa en Rijkoort, 1983). De windcorrectiefactor bij windsnelheidsmetingen in een meteostation met meethoogte HU_m (m) in de nabijheid van het bos c_{um} (-) wordt:

$$c_{um} = \frac{\ln\left[\frac{H+2-d_b}{z_{0b}}\right] \ln\left[\frac{100}{z_{0m}}\right]}{\ln\left[\frac{100}{z_{0b}}\right] \ln\left[\frac{HU_m-d_m}{z_{0m}}\right]} \quad (33)$$

met d_b en z_{0b} respectievelijk de nulvlakverplaatsing en ruwheidslengte van bos en d_m en z_{0m} respectievelijk de nulvlakverplaatsing en ruwheidslengte van het meteostation.

Wanneer de windsnelheidsmetingen boven het bos plaatsvinden zijn de ruwheidslengte en nulvlakverplaatsing van het meteostation gelijk aan die van de referentiehoogte.

De windcorrectiefactor bij windsnelheidsmetingen boven het bos c_{ub} (-), met meethoogte $HU_b > H$, wordt zodoende:

$$c_{ub} = \frac{\ln\left[\frac{H+2-d_b}{z_{0b}}\right] \ln\left[\frac{100}{z_{0b}}\right]}{\ln\left[\frac{100}{z_{0b}}\right] \ln\left[\frac{HU_b-d_b}{z_{0b}}\right]} \quad (34a)$$

Vereenvoudigd levert dat:

$$c_{ub} = \frac{\ln\left[\frac{H+2-d_b}{z_{0b}}\right]}{\ln\left[\frac{HU_b-d_b}{z_{0b}}\right]} \quad (34b)$$

zodat wanneer de referentiehoogte $H+2$ gelijk aan de meethoogte HU_b is, de windcorrectiefactor gelijk aan 1 is. De berekening van de geëxtrapoleerde windsnelheid boven het bos u_s blijft gelijk conform formule 18: $u_s = c_u * u$. In de berekening van de aërodynamische weerstand Ra ($s.m^{-1}$) (formule 20) wordt de standaard hoogte van MUST van 2 meter vervangen. Voor de berekening van Ra wordt in de meeste studies waaronder die van Hendriks et al. (1990) Ra berekend volgens:

$$Ra = \frac{1}{\kappa^2 u_s} \left[\ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right) \right]^2 \quad (35)$$

met z de meethoogte (m) van het windprofiel. Aangezien de in te voeren wind u_s reeds is gecorrigeerd naar de referentiehoogte $H+2$, is $z = H+2$. De berekening van de aërodynamische weerstand met windsnelheidsmetingen in zowel een naburig meetstation als boven bos Ra ($s.m^{-1}$) wordt dan:

$$Ra = \frac{1}{\kappa^2 u_s} \left[\ln\left(\frac{H+2-d_b}{z_{0b}}\right) \right]^2 \quad (36)$$

De Penman-verdamping E_{pen} (formule 28) is gecalibreerd op 2 meter hoogte (formule 27). De berekening van de Penman-verdamping blijft ongewijzigd. Bovenstaande wijzigingen van de windcorrectiefactor en de aërodynamische weerstand zijn in de MUST versie 2.1 doorgevoerd. In aanhangsel 2 staan de gewijzigde fortran programmaregels.

3.6 De berekening van de netto straling uit de globale straling

Netto straling R_n is gewas specifiek en moet derhalve per gewas worden gemeten. Door Hendriks et al. (1990) is R_n direct gemeten boven de Amerikaanse eiken. De gewasspecifieke netto straling is echter niet altijd bekend. De netto straling kan door MUST worden berekend met behulp van de relatieve zonneshijnduur. Een andere mogelijkheid is om de netto straling af te leiden uit de globale straling R_g ($W.m^{-2}$), die door het KNMI (1988,1989) wordt verstrekt. De verschillen in de uitkomsten tussen de berekeningen met netto straling, zonneshijnduur of beide, worden besproken in paragraaf 5.2.8. In het onderzoek van Hendriks et al. (1990) is naast de netto straling ook de globale straling gemeten boven het bos. Daarmee is het mogelijk een lineaire regressie te berekenen tussen de netto straling en de globale straling, die specifiek voor Amerikaanse eik geldig is. Feddes (1971) bepaalt voor verschillende gewassen op een vergelijkbare wijze, maar uiteraard met andere coëfficiënten, het verband tussen de kortgolvlige straling en de netto straling. Het gevonden verband voor Amerikaanse eik is:

$$R_n = 1,05 + 0,611 * R_g \quad (37)$$

met $r^2 = 0,968$.

(met een standaard fout voor respectievelijk 1,05 en 0,611 van 7,382 en 0,016)

Deze vergelijking is gebruikt voor het berekenen van de netto straling als alleen de globale straling bekend was, zoals bij meteogegevens van het KNMI (1988,1989) het geval is. De toepassing ervan zal worden behandeld in hoofdstuk 5.

4 Het bos te Ede: de invoergegevens

De meetopstelling van het onderzoek van Hendriks et al. (1990), gesitueerd ten oosten van Ede, staat in een bos met overwegend Amerikaanse Eik (*Quercus rubra*). Het bos is aangeplant in 1944. De boomhoogte was in 1988 gemiddeld 17,1 meter en in 1989 gemiddeld 17,4 meter. Het bos staat op een holtpodzolgrond (Y21) met grondwatertrap VII*. Sterk geschematiseerd is het profiel opgebouwd in drie lagen:

- 0 - 25 cm humeus, zwak lemig, matig fijn zand;
- 25 - 70 cm zwak lemig tot leemarm, matig fijn zand;
- 70 - 160 cm leemarm, matig fijn zand.

De bewortelingsdiepte was 80 cm. Het grondwater bevond zich op ca. 5 meter diepte. Hendriks et al. (1990) bepaalden voor hun onderzoek vele parameters die nodig waren voor de berekening van de evapotranspiratie met de EBBR-methode en bij de simulaties met SWATRE/SWACROP. De parameters die voor MUST zijn gebruikt, zijn:

- de Sink Term functie verloopt zoals afgebeeld in figuur 5A;
- de bodembedekking Sc (%) verloopt zoals afgebeeld in figuur 5B;
- de boomhoogte neemt toe van 17,20 naar 17,45 meter (1989);
- de capaciteit van het interceptierecervoir SIM bedraagt 0,07 cm (zomer en winter waarde; MUST maakt geen onderscheid naar seizoen);
- de interceptie tijdstapgrootte correctie coëfficiënten (bron: MUST programma) $a_0 = 0,76160$, $a_1 = 0,29350$ en $a_2 = -0,00170$;
- de basis of minimum gewasweerstand R_b bedraagt 60 s.m^{-1} en de maximum gewasweerstand R_m bedraagt 110 s.m^{-1} ;
- de meethoogte HU (m) van de meetopstelling te Ede bedraagt 21 m.

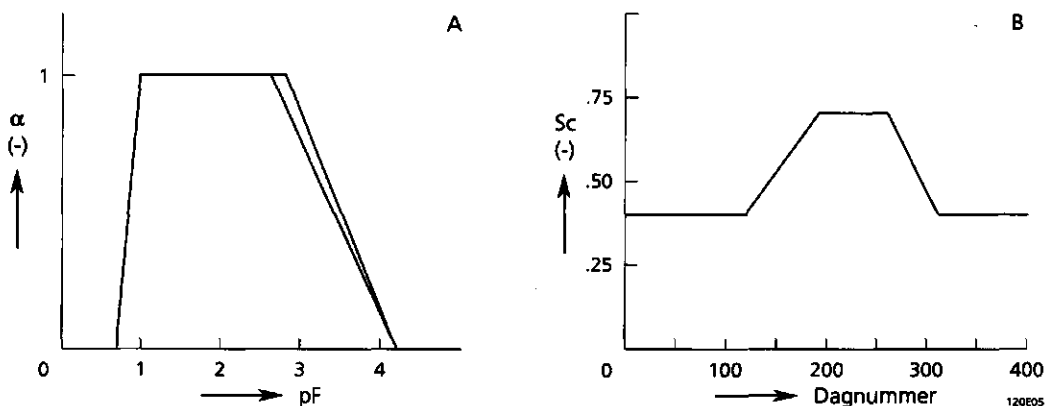


Fig. 5 A: De Sink term, B: De bedekkingsgraad Sc gedurende het jaar.
Bron: Hendriks et al., 1990.

De minimum bladwaterpotentiaal voor Amerikaanse eik bedraagt volgens Phelps et al. (1976) -18500 mbar. Dit is het omslagpunt P2 uit formule 22. Van Roestel (1984) geeft in een overzicht van de minimum bladwaterpotentiaal een bereik voor loofbos van -15000 mbar tot -25000 mbar en een bereik voor naaldbos van -8000 mbar tot

-25100 mbar. Voor de reflectiecoëfficiënt r (-) is een waarde van 0.18 aangehouden (zomer en winter waarde; MUST kent geen onderscheid). Een overzicht van alle parameters zoals ze zijn ingevoerd in dit onderzoek is te vinden in aanhangsel 3. Voor de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van de boven- en ondergrond, die in MUST worden gebruikt voor het definiëren van het vochtvasthoudend vermogen van de grond, is de Staringreeks gebruikt (Wösten et al., 1987). De schematisatie van de bodemopbouw is op twee manieren uitgevoerd;

in twee lagen:

voor *.RTZ: 0 - 80 cm B2: zwak lemig, zeer fijn tot matig fijn zand;

voor *.SUB: 80 - 160 cm O1: leemarm, zeer fijn tot matig fijn zand.

en in vier lagen:

voor *.RTZ: 0 - 25 cm B2: zwak lemig, zeer fijn tot matig fijn zand;

25 - 70 cm O2: zwak lemig, zeer fijn tot matig fijn zand;

70 - 80 cm O1: leemarm, zeer fijn tot matig fijn zand;

voor *.SUB: 80 - 160 cm O1: idem.

Voor de kalibratie van MUST is gebruik gemaakt van gegevens van het groeiseizoen 1989. Er is door Hendriks et al. (1990) in 1989 gemeten van 1 mei (dag 121) tot 27 oktober (dag 300). Dit was een 10,6% droog jaar. Een $n\%$ droog jaar is een jaar met een verdamping- of neerslagtekort over een nader aan te geven periode (bv. groeiseizoen) die gemiddeld n maal per 100 jaren wordt overschreden. Een $n\%$ droog jaar is gelijk aan een $(100-n)\%$ nat jaar (CHO-TNO, 1986). Voor de ontbrekende klimatologische gegevens, e.g. van 1 januari (dag 1) tot 30 april (dag 120) en na 27 oktober (dag 301), zijn gegevens van het KNMI-station De Bilt (KNMI, 1988,1989) gebruikt. Dit wordt nader toegelicht in het volgende hoofdstuk.

Voor de validatie is gebruik gemaakt van het groeiseizoen van 1988. Op de boomgroei na, gelden in 1988 dezelfde waarden voor de parameters als in 1989. Verder zijn voor de validatie de geoptimaliseerde waarden voor de nog onbekende parameters gebruikt, zoals die zijn vastgesteld bij de kalibratie. Deze parameters worden besproken in hoofdstuk 5. De meteorologische gegevens van 1988 van het onderzoek van Hendriks et al. (1990) waren beschikbaar van 1 mei tot 30 september. Dit was een 'gemiddeld' jaar (44,5% droog jaar). De resultaten konden slechts vergeleken worden voor de periode van 12 juli (dag 193) tot 1 oktober (dag 274). Voor de ontbrekende meteo-gegevens van 1988 zijn eveneens De Bilt gegevens gebruikt.

De kalibratie en validatie van MUST geschiedt aan de hand van de berekende evapotranspiratie door Hendriks et al. (1990) met de energiebalans-Bowen-ratio methode (EBBR). Voor uitleg van de EBBR-methode wordt verwezen naar het rapport van Hendriks et al. (1990).

5 De simulaties

5.1 Inleiding

MUST is gecalibreerd door een grote verscheidenheid aan simulaties uit te voeren, waarbij de specifieke onderdelen in de berekening van de evapotranspiratie zijn geoptimaliseerd. De resultaten die besproken worden hebben betrekking op het optimaliseren van:

- het verloop van de grondwaterstand gedurende de simulatieperiode door het bepalen van de optimale instellingen van de parameters A, B en C van formule 31;
- de gewasweerstand voor vloeistofstroming R_{pl} en het opslagpunt P1 in de berekening van R_c (formules 22 en 23);
- de schematisatie van de bodemopbouw;
- de aanvang van de simulatie (dag 1 of dag 121);
- de tijdstapgrootte (1, 5 of 10 dagen).

Tevens is er een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd van de variabelen SIM, S_c , R_{pl} , de omslagpunten P1 en P2, R_b , R_m en de boomgroei. Daarnaast is er gerekend met verschillende meteorologische invoer gegevens, te weten meteo-gegevens:

- van het onderzoek te Ede;
- van het KNMI voor het station De Bilt.

Tenslotte zijn er drie programma-opties voor het bepalen van de evapotranspiratie doorgerekend, namelijk berekening met netto straling, zonneshijnduur of beide, zoals uitgelegd in hoofdstuk 3. Bovenstaande optimalisaties, gevoeligheidsanalyses en berekeningen met de verschillende meteo-opties zijn doorgerekend voor de landgebruik-opties loofbos en Amerikaanse eik. De verschillen in de berekening van de evapotranspiratie tussen deze twee landgebruik-opties zijn reeds uitgelegd in hoofdstuk 3. In de paragraaf 5.2 worden de kalibratie simulaties besproken en de gevoeligheidsanalyse van de verschillende invoer parameters. Er wordt gerekend met een tijdstap van 1 dag. De gevonden optimale instellingen zijn uiteindelijk gevalideerd aan de meetresultaten van het onderzoek te Ede voor het jaar 1988. Dit wordt in paragraaf 5.3 behandeld.

5.2 Kalibratie en gevoeligheidsanalyses

5.2.1 Optimalisatie van R_{pl} en P1 en de gevoeligheidsanalyses

Van vrijwel alle parameters die worden gebruikt in MUST, zijn waarden uit de literatuur bekend. Echter, waarden voor de gewasweerstand voor vloeistofstroming R_{pl} en het omslagpunt P1 zijn niet gevonden. Deze zijn derhalve proefondervindelijk vastgesteld. Deze parameters worden alleen gebruikt in de berekeningen met het landgebruik Amerikaanse eik. Het bleek mogelijk om met deze parameters de evapotranspiratie zodanig te sturen, uiteraard binnen bepaalde grenzen, dat het verschil

met de EBBR-berekening zo klein mogelijk werd. De grenzen die hierbij werden aangenomen betreffen de reeds in MUST aanwezige waarden van de parameters voor de andere gewassen (bijv. gras of maïs). Om het verschil met de EBBR-berekening nog kleiner te maken, zouden te extreme waarden van R_{pl} en P1 moeten worden aangenomen. Dit is niet gedaan. Zodoende zijn de optimale waarden:

$$R_{pl} = 18500 \text{ d en } P1 = -10000 \text{ mbar.}$$

Tevens werd van de variabelen P2, Rm, Rb, SIM, Sc boomhoogte en boomgroei een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. De resultaten staan in tabel 2. Er is onderscheid gemaakt tussen de berekeningen van de evapotranspiratie met landgebruik loofbos en landgebruik Amerikaanse eik, waarop in paragraaf 5.2.3 verder wordt ingegaan.

Tabel 2 Gevoeligheidsanalyse van modelparameters op de gecumuleerde actuele en potentiële evapotranspiratie, de interceptieverdamping en de grondwaterstand W (1989).

Para- meter	Verandering		(E_t+E_s) act ⁽¹⁾		(E_t+E_s) pot ⁽¹⁾		E_t (mm)		W (cm-mv) op t300
	absoluut	rel.	t300	rel. ⁽²⁾	t300	rel. ⁽²⁾	t300	rel. ⁽²⁾	
landgebruik: loofbos⁽³⁾									
Rb	40	-	343	++	386	++	28	=	538.9
	80	+	314	--	343	--	28	=	543.0
SIM	0.05	-	333	-	387	+	21	--	535.6
	0.09	+	324	+	385	-	34	++	538.4
Sc	0.38-0.5-0.4	-	314	--	355	--	21	--	539.4
	0.38-0.9-0.4	+	333	++	417	++	34	++	537.4
H	op 15 m.	-	326	-	383	-	28	=	539.2
	op 19 m.	+	330	+	390	+	28	=	538.7
Groei	17.2→17.3 m.	-	328	-	385	-	28	=	539.1
	17.2→17.6 m.	+	329	=	486	=	28	=	538.9
landgebruik: Amerikaanse eik⁽⁴⁾									
Rb	40	-	319	+	316	++	415	=	28537.4
	80	+	313	-	431	--	28	=	539.3
Rm	90	-	323	++	400	++	28	=	536.2
	130	+	311	-	450	++	28	=	538.6
R_{pl}	16000	-	317	+	393	--	28	=	537.0
	20500	+	316	=	425	++	28	=	537.8
P1	-8000	-	315	-	409	--	28	=	537.0
	-12000	+	316	=	411	-	28	=	537.7
P2	-16500	-	316	=	421	++	28	=	537.0
	-20500	+	316	=	411	-	28	=	537.2
			316	=	421	++	28	=	537.6

(1) Cumulatieve actuele (act) en potentiële (pot) evapotranspiratie (E_t+E_s) (mm) van dag 120 tot dag 300. De berekende EBBR-evapotranspiratie van dag 120 tot dag 300 bedraagt 311 mm.

(2) Betekenis van de symbolen: - tot 5 mm minder evapotranspiratie, -- meer dan 5 mm minder evapotranspiratie, = gelijke evapotranspiratie, + tot 5 mm meer evapotranspiratie, ++ meer dan 5 mm evapotranspiratie.

(3) Initiële instellingen: loofbos: Rb=60, SIM=0.07, Sc=0.38-0.7-0.4, H=op 17 m., Groei= 17.2→17.45 m.

(4) Initiële instellingen: Amerikaanse eik: Rb=60, Rm=110, R_{pl} =18500, P1=-10000, P2=-18500

De modelparameters worden gebruikt bij de berekening van de evapotranspiratie. Ze zijn niet direct van invloed op het verloop van de grondwaterstand. Doordat het hier een hangwaterprofiel betreft is het effect op de grondwaterstand op dag 300 minimaal. Veranderingen in de basis gewasweerstand Rb heeft zowel bij de loofbos

als de Amerikaanse eik berekeningen een relatief groot effect. Een relatief groot effect geldt ook voor de maximale gewasweerstand R_m bij Amerikaanse eik. De bodembedekking S_c laat eveneens een relatief groot effect zien, wanneer deze wordt gewijzigd. De boomhoogte H en de groei gedurende het groeiseizoen hebben weinig effect op de evapotranspiratie. De gewasweerstand voor vloeistofstroming R_{pl} en de omslagpunten P_1 en P_2 hebben alleen effect op de potentiële evapotranspiratie. De interceptieverdamping wordt alleen beïnvloed door de capaciteit van het interceptiereservoir SIM en de bodembedekkingsgraad S_c .

5.2.2 Het grondwaterstandsverloop

Het grondwaterstandsverloop is berekend met de lineaire afvoerrelatie van formule 31, waarbij een initiële grondwaterstand van 5 m beneden maaiveld en initiële fluxen van $-0,1 \text{ cm.d}^{-1}$ (omlaag gericht) zijn opgegeven. Door middel van een aantal simulaties zijn de volgende optimale waarden gevonden voor de parameters A , B en C in de afvoerrelatie:

$$A = -0.60, B = 600 \text{ en } C = -0.0075.$$

Alhoewel de (theoretische) laagste grondwaterstand (B) op 6 meter beneden maaiveld is ingesteld, bleef de grondwaterstand op ongeveer 5,5 m hangen. Simulaties met een diepere waarde voor B (bijv. 800) leverden geen verschil op. Met de optimale instellingen voor A , B en C fluctueert de grondwaterstand aan het begin van het groeiseizoen rond de 5 m om vervolgens te zakken naar 5,5 m. Aan het eind van het groeiseizoen treden er weer fluctuaties op. Door Hendriks et al. (1990) is de grondwaterstand gemeten met een tijdsinterval van circa tien dagen. In figuur 6 is dit verloop weergegeven, samen met het door MUST berekende verloop. Voor de interpretatie van deze gegevens moet worden opgemerkt dat:

- door de diepe grondwaterstand er sprake is van een hangwaterprofiel met grondwatertrap VII*;
- het onderzoeksgebied op een hellend vlak ligt en er laterale wegstroming van het grondwater plaatsvindt;
- er zich een drinkwaterpompstation in de buurt van het onderzoeksstation bevindt;
- de door Hendriks et al. (1990) gemeten waarden zijn opgegeven t.o.v. de bovenkant van de buis die zich op circa 5 cm onder maaiveld bevindt;
- het maaiveld plaatselijk zeer onregelmatig is (hoogteverschillen van ca. 20 cm).

Figuur 6 laat zien dat MUST met de waarden van A , B en C en de initiële grondwaterstand en boven en ondergrens fluxen, het verloop van het grondwater goed benaderd. Het verloop laat verder zien dat er alleen aanvulling van de neerslag aan het grondwater plaatsvindt aan het begin van het groeiseizoen. Berekeningen met meteorologische gegevens van een heel jaar gaven een geringe stijging van het grondwater te zien aan het eind van het jaar (december). In tabel 3 is een overzicht gegeven van het effect van veranderingen in A , B , C , de initiële grondwaterstand en de initiële fluxen op de grondwaterstand op drie tijdstippen en de gecumuleerde actuele en potentiële evapotranspiratie op dag 300.

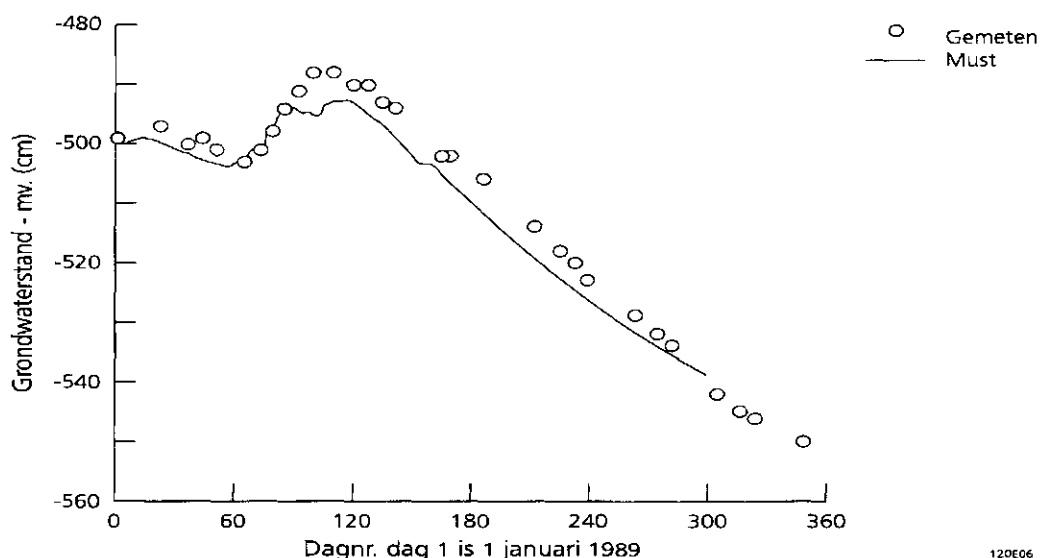


Fig. 6 Gemeten grondwaterstand en berekend door MUST in 1989.
Bron gemeten waarden: Hendriks et al., 1990.

Tabel 3 Gevoeligheidsanalyse van de parameters in de afvoerrelatie van het grondwater op de evapotranspiratie en de grondwaterstand in Ede (1989).

Parameter	Verandering		Eact Epot		W op t1	VG op t90	LG op t300
	absoluut	rel.	(mm, t300 ⁽¹⁾)	(mm, t300 ⁽¹⁾)	(cm.-mv)	(cm.-mv)	(cm.-mv)
loofbos	-		329	386	500.0 (2)	493.9 (2)	538.9 (2)
A	-0.4	-	329	386	492.0 -	477.5 --	514.6 --
	-0.8	+	329	386	505.9 +	506.5 ++	554.2 ++
B	550	-	329	386	489.9 --	475.6 --	505.5 --
	650	+	329	386	507.2 +	510.1 ++	570.4 ++
C	-0.005	-	329	386	500.0 =	493.9 =	538.9 =
	-0.010	+	329	386	500.0 =	493.9 =	538.9 =
Wini.	450	-	329	386	457.7 --	463.7 --	527.3 --
	550	+	329	386	537.1 ++	522.5 ++	550.7 ++
Upper bound.	-0.05	-	329	386	500.2 (=)	496.6 +	540.0 +
flux	-0.15	+	329	386	499.8 -	492.1 -	538.2 -
Lower bound.	-0.05	-	329	386	513.4 ++	503.8 ++	542.9 +
flux	-0.15	+	329	386	491.9 -	487.9 -	536.6 -

Initiële instellingen: loofbos: A=-0.6, B=600, C=-0.0075, Wini (initiële grondwaterstand)=500cm, Upper boundary flux & Lower boundary flux=-0.1 cm.d⁻¹

(1) Cumulatieve actuele (act) en potentiële (pot) evapotranspiratie (E_a+E_p) van dag 120 tot dag 300. De berekende EBBR-evapotranspiratie van dag 120 tot dag 300 bedraagt 311 mm.

(2) betekenis symbolen: - tot 10 cm ondieper, -- meer dan 10 cm ondieper, = gelijke diepte, + tot 10 cm dieper, ++ meer dan 10 cm dieper

Afk.: W=grondwaterstand, VG=voorjaarsgrondwaterstand op dag 90, LG=laagste grondwaterstand

Een verandering van A, B of C heeft, binnen één jaar, geen effect op de evapotranspiratie, doordat er sprake blijft van een hangwaterprofiel. Veranderingen in de grondwaterafvoer relatie hebben ook geen effect op de interceptieverdamping (niet in tabel, blijft 28 mm). Het verloop van het grondwater met een hangwaterprofiel zoals hier het geval is, wordt het sterkst beïnvloed door de waarden van A of B. Een verhoging

of verlaging van deze waarden levert een verhoging of verlaging van de grondwaterstand van maximaal 33,4 cm. Een verandering in C geeft geen verandering te zien in het verloop van de grondwaterstand.

5.2.3 Het landgebruik

Met het verschil in landgebruik wordt bedoeld het verschil in berekening van de evapotranspiratie tussen de programma-opties voor landgebruik 'loofbos' en 'Amerikaanse eik'. Deze verschillen zijn bij alle simulaties meegenomen. Ze worden hier niet in detail besproken. Het algemene beeld is, dat de gecumuleerde actuele evapotranspiratie (transpiratie + bodemverdamping) in de periode van dag 120 tot dag 300 van loofbos hoger is dan die van Amerikaanse eik. Beide berekeningswijzen geven voor die periode hogere waarden dan de met de EBBR-berekende actuele evapotranspiratie. De potentiële evapotranspiratie in deze periode van Amerikaanse eik is daarentegen - beduidend hoger dan die van loofbos. Zodoende is tevens het verschil tussen de actuele en potentiële evapotranspiratie veel groter bij Amerikaanse eik dan bij loofbos. In figuur 7 wordt het verschil tussen de landgebruik-opties verduidelijkt aan de hand van de cumulatieve evapotranspiratie.

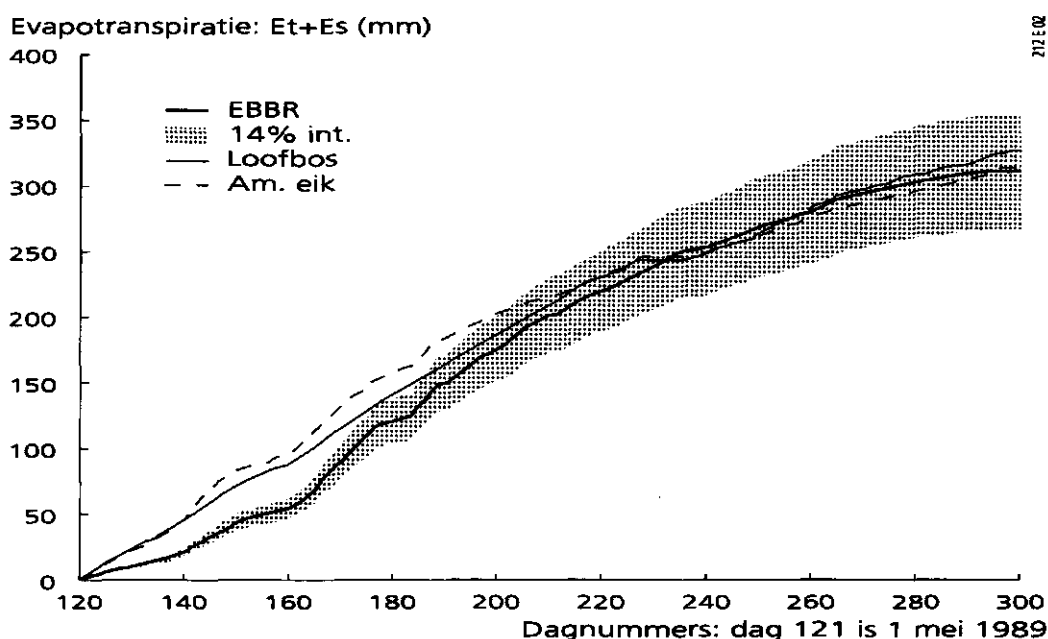


Fig. 7 Cumulatieve actuele evapotranspiratie ($E_t + E_s$) van Amerikaanse eik, loofbos en EBBR-evapotranspiratie in 1989. met E_t : actuele transpiratie, E_s : actuele bodemverdamping, 14% int.: 14% foutenmarge van de EBBR-evapotranspiratie

In figuur 7 wordt tevens de 14% foutenmarge afgebeeld. Dit is de procentuele fout die door Hendriks et al. (1990) berekend is voor de EBBR-methode. Wanneer deze cumulatief wordt uitgezet, moet de foutenmarge ook cumulatief worden meegenomen.

Dit resulteert in een uiteenwijkend gebied van de foutenmarge rond de eigenlijke EBBR-curve.

Figuur 7 laat zien dat de simulatie met MUST met landgebruik loofbos tot dag 190 buiten de foutenmarge bovengrens valt. Daarna valt de cumulatieve curve binnen de foutenmarge. Amerikaanse eik valt pas vanaf dag 205 binnen de foutenmarge van 14%. De evapotranspiratie berekeningen van MUST vertonen een enigszins gekromde curve in vergelijking met de S-vorm van de evapotranspiratie-curve met de EBBR-methode. Het bleek niet mogelijk deze karakteristiek S-vorm met MUST te simuleren. De door MUST berekende curves lopen van dag 227 tot dag 238 horizontaal. In deze periode is er geen actuele evapotranspiratie. Door het uitblijven van voldoende regenwater dat het bodemvocht kan aanvullen is de opname van water uit de bodem gestaakt en de evapotranspiratie afgenomen. Er treedt verdroging op. In figuur 8 worden de verschijnselen van verdroging verduidelijkt.

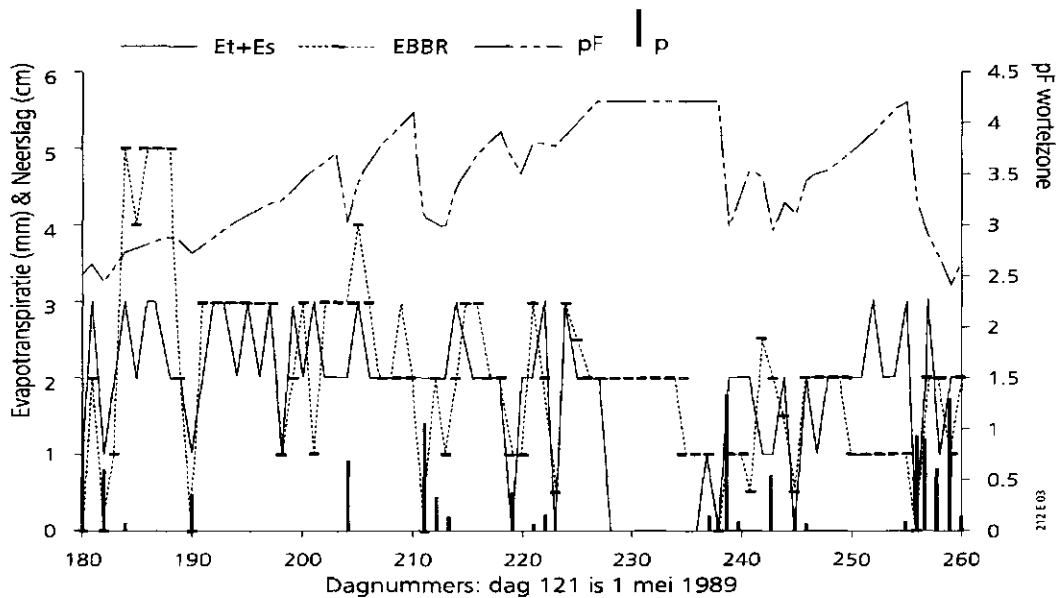


Fig. 8 Actuele evapotranspiratie (E_t+E_s) en de zuigspanning berekend door MUST voor landgebruik loofbos, de EBBR-evapotranspiratie en neerslag in 1989. met P:neerslag, E_t :actuele transpiratie, E_s :actuele bodemverdamping, pF: drukhoogte

Figuur 8 laat zien dat door het uitblijven van de neerslag van dag 224 tot 236, er een vochttekort ontstaat in de bodem. Dit is te zien aan de zuigspanning van de wortelzone die al vanaf dag 212 toeneemt tot de maximale waarde van pF 4.2 op dag 225, met een dip op dag 219 door neerslag op dag 218. Vanaf dat moment kunnen de bomen geen vocht meer onttrekken uit de onverzadigde zone en wordt de actuele evapotranspiratie nul. Op het moment dat er op dag 239 weer voldoende neerslag valt, daalt de zuigspanning en neemt de actuele evapotranspiratie weer toe. In MUST wordt bij een drukhoogte van pF = 4.21 de actuele evapotranspiratie nul. Dit is in tegenstelling tot de eigenlijke actuele evapotranspiratie zoals berekend met de EBBR-methode. Dit kan fouten opleveren, wanneer de droogte periode langer aanhoudt. In figuur 8 is tevens de evapotranspiratie waarde van de EBBR-methode afgebeeld. Deze

waarden liggen redelijk in de buurt van de door MUST berekende waarden. De hogere waarden van 0,4 en 0,5 mm worden echter niet gehaald.

Tabel 4, 5, 6 en 7 geven simulatie resultaten en de 'Root Mean Square Error' (RMSE), de gemiddelde dagelijkse absolute voorspelfout, van MUST t.o.v. de met de EBBR berekende evapotranspiratie (transpiratie + bodemverdamping). De berekeningswijze van de RMSE wordt uitgelegd in aanhangsel 4. In deze tabellen is de RMSE weergegeven in drie perioden om seizoensverschillen te verduidelijken. Uit de tabellen blijkt dat de berekening met landgebruik loofbos een kleinere RMSE oplevert t.o.v. de EBBR-methode dan met landgebruik Amerikaanse eik.

5.2.4 Schematisatie van de opbouw van de bodem

De bodem van het onderzoeksgebied te Ede is op twee manieren geschematiseerd ingevoerd in de *.RTZ en *.SUB-files; in twee lagen en meer gedetailleerd in vier lagen. Eén en ander is reeds uitgelegd in hoofdstuk 4. Simulaties met deze verschillen in schematisatie van de bodem geeft informatie over het effect van de mate van detaillering. In tabel 4 staan de belangrijkste simulatie resultaten en de RMSE t.o.v. de EBBR.

Tabel 4 Resultaten van de simulaties met verschillend landgebruik, verschillende bodemopbouw en de begin dag van de simulatie (1989).

bodem opbouw	begin simu- latie	land ge- bruik	$(E_t + E_b)$		RMSE (cm.d ⁻¹) ⁽²⁾				uit para- graaf
			Act (mm,t300) ⁽¹⁾	Pot	t120- t190	t190- t240	t240- t300	t120 t300	
4 lagen	1	lb	329	386	0.133	0.110	0.100	0.117	5.2.3, 5.2.4 & 5.2.5
		ae	316	415	0.129	0.136	0.093	0.120	
2 lagen	1	lb	356	386	0.132	0.087	0.107	0.113	5.2.4
		ae	356	415	0.131	0.114	0.088	0.133	
4 lagen	121	lb	335	385	0.130	0.102	0.100	0.113	5.2.5
		ae	321	415	0.137	0.130	0.089	0.121	

(1) Gecumuleerde EBBR actuele evapotranspiratie van dag 120 tot dag 300 = 311 mm.

(2) De RMSE van MUST berekend t.o.v. EBBR-methode voor 3 deel-periodes en de totaal-periode.

Met $(E_t + E_b)$ Act en Pot: respectievelijk actuele en potentiële Transpiratie+Bodemverdamping, lb:loofbos, ae:Amerikaanse eik.

Tabel 4 laat zien dat de gedetailleerde 4 lagen bodemopbouw en landgebruik loofbos een (gering) groter RMSE oplevert t.o.v. de met de EBBR berekende evapotranspiratie dan de 2 lagen bodemopbouw. Het vochtvasthoudend vermogen van de 2 lagen opbouw is door de dikkere humeuze laag van 80 cm (t.o.v. 70 cm in de 4 lagen opbouw) groter. De droogte periode is daardoor korter, wat terug te zien is in een hogere cumulatieve actuele evapotranspiratie. Juist in de droogte periode (dag 190-240) treedt het grootste verschil op tussen de 2 lagen en 4 lagen opbouw. Een gedetailleerde schematisatie van de bodem opbouw wordt echter wel noodzakelijk geacht. Het feit dat de simulaties met een minder gedetailleerde opbouw een gering beter simulatie resultaat opleverde, is vermoedelijk te wijten aan het algemene karakter van de bodemfysische bouwstenen van de Staringreeks. Mogelijk sluit in dit specifieke

ke geval de bouwstenen voor zwak lemig matig fijn zand beter aan bij de bewortelbare zone dan de overige bouwstenen. De seizoensverschillen (periode t120-t190-t240-t300) zijn over het algemeen gering.

5.2.5 Het effect van het begin van de simulaties (dag 1 of dag 121)

Berekeningen met MUST behoren te beginnen in de periode dat de vochtcondities van de bodem op of rond veldcapaciteit liggen ($pF=2,0$). Bij simulaties waarbij gerekend werd vanaf 1 mei (dag 121) waren de beginwaarden van de actuele evapotranspiratie hoger dan de met de EBBR-methode berekende waarden. Dit deed vermoeden dat de initiële vochtcondities van de bodem op tijdstap 1 (dag 121) van de simulaties te vochtig is. Om de initiële waarden op dag 121 beter in te stellen, moest er worden gesimuleerd vanaf een eerdere dag dan dag 121. Hiervoor is 1 januari gekozen (dag 1). Aangezien de meteorologische gegevens over de periode van 1 januari tot 30 april (dag 120) ontbraken in de gegevens van het onderzoek in Ede, zijn klimatologische gegevens van het meteorostation van de KNMI (1989) in De Bilt gebruikt. Hemelsbreed ligt De Bilt 'slechts' 40 km van het onderzoeksterrein vandaan. Verschillen tussen meteorologische gegevens uit De Bilt en Ede voor de periode van dag 121 tot dag 300 in 1989 zijn:

- in De Bilt was het gemiddeld $0,06$ °C warmer;
- in De Bilt was de relatieve luchtvochtigheid gemiddeld $2,4\%$ (1-5%) lager;
- in De Bilt was er aan het begin van het groeiseizoen $0,1-0,2$ m.s⁻¹ hardere wind en aan het eind van het groeiseizoen $0,1-0,2$ m.s⁻¹ minder harde wind;
- in De Bilt was er totaal 15 mm minder neerslag door het groeiseizoen heen;
- in De Bilt was de netto straling gemiddeld $11,2$ W.m⁻² hoger. In De Bilt wordt alleen de globale straling gemeten. Voor het omrekenen van de globale straling naar de netto straling is formule 37 gebruikt.

Deze verschillen worden naast het verschil in lokatie veroorzaakt door de verschillen bij de meetopstellingen; De Bilt: gras en Ede: bos. Omdat de meteo-gegevens uit De Bilt alleen worden gebruikt om een nauwkeuriger initiële vochtconditie van de bodem te creëren op dag 121, werden deze kleine verschillen acceptabel geacht.

In tabel 4 staan enkele simulatie resultaten. De cumulatieve actuele evapotranspiratie op dag 300 is lager met begin dag 1 dan met begin dag 121. De zuigspanning (pF) van de grond op dag 120 is lager met berekeningen vanaf dag 1 dan met begindag 120. De RMSE t.o.v. de berekende EBBR-evapotranspiratie van de simulatie met begindag 1, is (gering) groter dan met begindag 121.

5.2.6 Effect van de tijdstapgrootte

Simulaties zijn uitgevoerd met tijdstappen van 1, 5 en 10 dagen. Een grotere tijdstap heeft als voordeel dat het minder computerrekentijd kost. Daarvoor zijn de meteo-ur-gegevens uit Ede omgerekend naar 1, 5 en 10 daagse gemiddelden. Tabel 5 geeft de RMSE van de simulaties. De tijdstapgrootte van 1 dag geeft voor landgebruik loofbos een veel kleinere RMSE waarde t.o.v. de berekende EBBR-evapotranspiratie. Met de tijdstapgrootte van 5 of 10 dagen worden in de berekeningen de effecten van droge en natte perioden uitgemiddeld.

Aangezien het project bosverdroging juist geïnteresseerd is in die verdrogingseffecten, is het niet raadzaam om met een tijdstapgrootte van 5 of 10 dagen te gaan rekenen. Deze pieken van bijv. de zuigspanning uit figuur 8 zijn in een vergelijkbaar figuur met tijdstapgrootte 10 dagen geheel afwezig. Eén simulatie met MUST met tijdstap 1 dag en voor een heel jaar duurt met een huidige 'snelle' computer (80486 processor, 66 MHz kloksnelheid) ongeveer 1,5 sec, tegenover een simulatieduur van nog net geen seconde met een tijdstap van 10 dagen. Er is dus geen echt probleem met computerrekentijd. Een nadeel van een tijdstap van 1 dag is wel dat er meer gegevens moeten worden ingevoerd dan wel verzameld.

Tabel 5 Resultaten van simulaties met verschillende tijdstapgrootte (1989).

Tijdstap	land gebruik	$(E_t + E_p)$		RMSE (cm.d^{-1}) ⁽²⁾			
		Act (mm,t300) ⁽¹⁾	Pot	t120- t190	t190- t240	t240- t300	t120- t300
1	lb	329	386	0.133	0.110	0.100	0.117
	ae	316	415	0.129	0.136	0.093	0.120
5	lb	341	402	0.464	0.465	0.255	0.407
	ae	324	415	0.525	0.503	0.258	0.447
10	lb	404	351	0.832	0.623	0.586	0.701
	ae	341	410	0.849	0.492	0.402	0.633

(1) Gecumuleerde EBBR actuele evapotranspiratie van dag 120 tot dag 300 = 311 mm.

(2) De RMSE van MUST berekend t.o.v. EBBR-methode voor 3 deel-periodes en de totaal-periode.

Met $(E_t + E_p)$ Act en Pot: respectievelijk de actuele en potentiële Transpiratie+Bodemverdamping, lb:loofbos, ae:Amerikaanse eik.

In tabel 5 wordt naast de RMSE over de gehele simulatie periode (t120-t300), ook de seizoen verschillen duidelijk gemaakt. Hieruit blijkt dat de kleinste verschillen t.o.v. de EBBR-berekening worden gemaakt aan het eind van het groeiseizoen (t240-t300) en de grootste aan het begin van groeiseizoen (t120-t190).

5.2.7 Simulaties met meteo-gegevens uit De Bilt

Omdat in het project bosverdroging in eerste instantie waarschijnlijk gewerkt gaat worden met meteo-gegevens uit De Bilt, zijn de simulaties ook uitgevoerd met meteo-gegevens uit De Bilt. Hiervoor zijn alle benodigde weersgegevens van 1989 (365 dagen) van KNMI-station De Bilt (KNMI, 1989) ingevoerd. Hiermee werd inzicht verkregen in de absolute uitkomsten van de simulaties en werd gelijktijdig inzicht

verschafft in het verloop van de evapotranspiratie, zuigspanning en grondwaterstand gedurende een heel jaar. Voor de berekening van de netto straling uit de in De Bilt gemeten globale straling, is formule 37 gebruikt. Figuur 9 geeft hiervan een voorbeeld. In tabel 6 staan enkele simulatie resultaten.

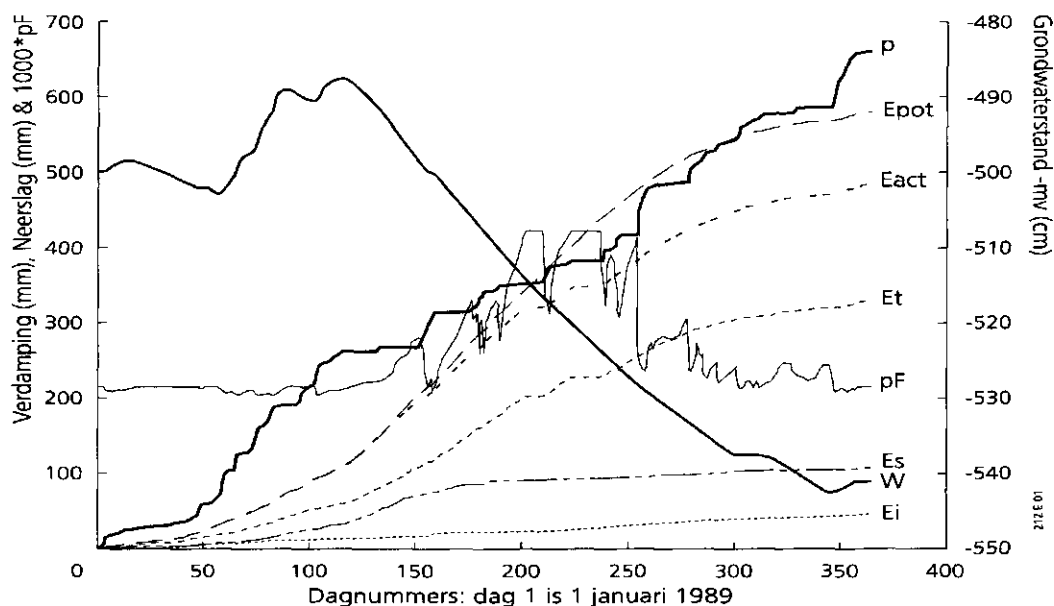


Fig. 9 Cumulatieve actuele (E_{act}) en potentiële (E_{pot}) verdamping ($E_t + E_s + E_i$), de afzonderlijke actuele verdampingstermen; Transpiratie (E_t), Bodemverdamping (E_s) en Interceptieverdamping (E_i), de grondwaterstand (W), de neerslag (P) en de zuigspanning van de wortelzone (pF) voor dag 1 tot dag 365, berekend met meteo-gegevens uit De Bilt in 1989.

Zoals te verwachten, is de RMSE van de berekeningen met meteo-gegevens uit Ede t.o.v. de berekende EBBR-evapotranspiratie kleiner dan met meteo-gegevens uit De Bilt. Met name de RMSE van dag 190 tot dag 240 is veel groter met meteo-gegevens uit De Bilt. In De Bilt is het iets warmer en er viel iets minder neerslag, zodat de verdroging een groter effect heeft, wat ook te zien is in figuur 9. Figuur 9 laat tevens zien dat de grondwaterspiegel vanaf dag 300 begint te fluctueren en uiteindelijk weer stijgt. De initiële grondwaterstand van 5 m beneden maaiveld wordt niet meer bereikt.

Tabel 6 Resultaten van de simulaties met verschillende meteostations (1989).

Meteo- station	land ge- bruik	$(E_t + E_s)$		RMSE (cm.d^{-1}) ⁽²⁾			
		Act (mm,t300) ⁽¹⁾	Pot	t190- t240	t240- t300	t120- t300	
Ede	loofbos	329	386	0.133	0.110	0.100	0.117
	Am. eik	316	415	0.129	0.136	0.093	0.120
De Bilt	loofbos	310	392	0.134	0.159	0.086	0.129
	Am. eik	298	424	0.131	0.172	0.129	0.130

(1) Gecumuleerde EBBR actuele evapotranspiratie van dag 120 tot dag 300 = 311 mm.

(2) De RMSE van MUST berekend t.o.v. EBBR-methode voor 3 deel-periodes en de totaal-periode. Met $(E_t + E_s)$ Act en Pot: respectievelijk de actuele en potentiële Transpiratie+Bodemverdamping.

5.2.8 Simulaties met verschillende meteo-opties (n/N , R_n en combinatie)

Zoals uitgelegd in hoofdstuk 3, wordt in de berekening van de evapotranspiratie de netto straling gebruikt. Deze wordt in de *.UPP file ingevoerd. De netto straling kan door MUST ook worden berekend uit de relatieve zonneshijnduur. Wanneer zowel netto straling als relatieve zonneshijnduur worden ingevoerd, wordt de relatieve zonneshijnduur alleen gebruikt bij de berekening van de Penman-verdamping (De Laat, 1985). In de meteorologische gegevens van het onderzoek van Hendriks et al. (1990) was alleen informatie aanwezig over de netto straling. Om toch een idee te krijgen van het effect van metingen met de relatieve zonneshijnduur, is de relatieve zonneshijnduur uit De Bilt gebruikt. Deze is gebruikt tezamen met de overige meteo-gegevens uit De Bilt. Zodoende kan de uitkomst worden vergeleken met de simulaties waarbij meteo-gegevens van De Bilt zijn gebruikt en de netto straling is berekend.

In tabel 7 staan enkele resultaten van zowel berekeningen van de evapotranspiratie met alleen de netto straling of de zonneshijnduur of met beide.

Tabel 7 Resultaten van de simulaties met verschillende meteo-opties in De Bilt (1989).

Methode	Meteo- optie	land ge- bruik	(E_t+E_p)		RMSE (cm.d^{-1}) ⁽²⁾			
			Act (mm,t300) ⁽¹⁾	Pot	t120- t190	t190- t240	t240- t300	t120- t300
n/N	1	loofbos	311	406	0.133	0.162	0.086	0.129
		Am. eik	300	439	0.137	0.176	0.078	0.134
R_n	2	loofbos	329	386	0.133	0.110	0.100	0.117
		Am. eik	316	415	0.129	0.136	0.093	0.120
R_n & n/N	3	loofbos	311	408	0.134	0.166	0.094	0.133
		Am. eik	301	440	0.137	0.182	0.089	0.138

(1) Gecumuleerde EBBR actuele evapotranspiratie van dag 120 tot dag 300 = 311mm.

(2) De RMSE van MUST berekend t.o.v. EBBR-methode voor 3 deel-periodes en de totaal-periode.

Met (E_t+E_p) Act en Pot: respectievelijk de actuele en potentiële Transpiratie+Bodemverdamping.

Uit deze simulaties volgt dat de verschillen tussen de berekeningen van de evapotranspiratie met verschillende meteorologische invoergegevens voornamelijk verschillen vertonen in de periode t190-t240. Het verschil in de RMSE over de totaal periode is gering. De verschillen in de foutenberekeningen en gecumuleerde actuele en potentiële evapotranspiratie tussen meteo-optie 1 en 3 zijn verwaarloosbaar. Berekeningen met alleen netto straling simuleert beter, wat te verwachten was, aangezien dit meteo-gegevens betreft die boven het bos te Ede verzameld zijn en bij optie 1 en 3 de ingevoerde zonneshijnduur uit De Bilt is meegenomen.

5.3 Validatie en vergelijking SWATRE/SWACROP

5.3.1 Validatie van de geoptimaliseerde parameters uit 1989 aan de evapotranspiratie in 1988

De geoptimaliseerde parameters voor het model bos te Ede in 1989 zijn gevalideerd aan de actuele en potentiële evapotranspiratie in 1988. Voor de parameters zijn dezelfde waarden gebruikt als voor uit 1989, maar nu met meteo-gegevens uit 1988. De bodembedekkingsgraad, interceptie-capaciteit, gewasweerstand en de omslagpunten zullen weinig verschillen vertonen tussen 1989 en 1988. De boomhoogte is wel aangepast (17,0→17,25 m), maar zoals uit gevoeligheidsanalyses bleek heeft de boomhoogte en -groei een zeer gering effect op de evapotranspiratie. Er zijn wel meteorologische verschillen tussen 1989 en 1988. Verdrogings-effecten zoals waargenomen in 1989, zullen in 1988 minder voorkomen aangezien 1988 een 'gemiddeld' jaar was (44,6% droog jaar) en 1989 een relatief droog jaar was (10,6% droog jaar). Helaas is er voor 1988 slechts informatie beschikbaar over de EBBR-berekeningen van dag 193 tot 275. Meteorologische gegevens die als invoer voor MUST dienen zijn wel aanwezig vanaf dag 121. De periode waarop de simulatie resultaten kunnen worden vergeleken is zodoende korter.

De begin dag van de simulatie is weer op 1 januari gesteld, zodat voor dag 1 tot dag 120 weer meteo-gegevens uit De Bilt (KNMI, 1988) van 1988 moesten worden ingevoerd. In tabel 8 zijn enkele resultaten uiteengezet en figuur 10 geeft het cumulatieve verloop van de evapotranspiratie berekend door MUST en met de berekende EBBR-methode.

Tabel 8 Resultaten van de validatie-simulaties van 1988 en kalibraties van 1989.

Jaar	land gebruik	(E_t+E_s)		RMSE (cm.d ⁻¹) ⁽²⁾			
		Act (mm,t274) ⁽¹⁾	Pot	t193- t 210	t210- t230	t230- t274	t193- t274
1988	loofbos	138	144	0.183	0.138	0.128	0.144
	Am. eik	119	131	0.162	0.155	0.148	0.153
Gelijke perioden RMSE berekening in simulatiejaar 1989:							
1989	loofbos	133	178	0.088	0.113	0.116	0.110
	Am. eik	102	179	0.143	0.127	0.109	0.122

(1) Gecumuleerde EBBR actuele evapotranspiratie in 1988 van dag 193 tot dag 274 = 159 mm en in 1989 EBBR t193-t274 = 159 mm.

(2) De RMSE van MUST berekend t.o.v. EBBR-methode voor 3 deel-periodes en de totaal-periode. Met (E_t+E_s) Act en Pot: respectievelijk de actuele en potentiële Transpiratie+Bodemverdamping.

Uit figuur 10 en tabel 8 blijkt dat de validatie-simulaties met MUST uit 1988 een veel grotere afwijking vertonen met de EBBR-methode berekende evapotranspiratie dan de kalibratie-simulaties uit 1989 in een vergelijkbare simulatieperiode. De gecumuleerde evapotranspiratie-curve in 1988 met landgebruik loofbos valt net niet binnen de 14% foutenmarge van de EBBR-curve. De curve van landgebruik Amerikaanse eik wijkt zelfs zeer sterk af. Een oorzaak kan zijn dat een aantal parameters zoals ze zijn ingesteld voor 1989 niet rechtstreeks te gebruiken zijn voor 1988. Dit kunnen de standaard instellingen van MUST zijn, maar ook de door Hendriks et al. (1990) opgegeven parameters.

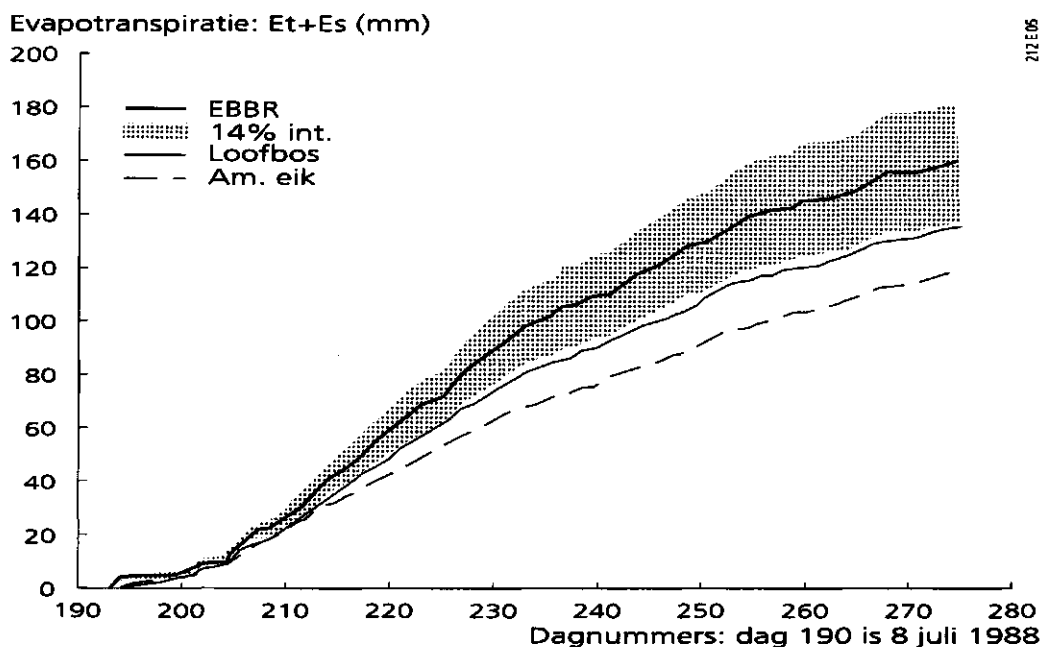


Fig. 10 Cumulatieve actuele evapotranspiratie ($E_t + E_s$) van loofbos, Amerikaanse eik en EBBR-evapotranspiratie in 1988.
 Met E_t : actuele transpiratie, E_s : actuele bodemverdamping, 14% int.: 14% foutenmarge EBBR.

Optimalisatie door aanpassing in minimale gewasweerstand R_b

Een mogelijke verbetering van de simulaties kan worden gezocht bij de minimale gewasweerstand R_b . De gevoeligheidsanalyses uit paragraaf 5.2.1 (tabel 2) tonen aan dat een verandering in R_b een relatief 'groot' effect heeft. Van Roestel (1984) geeft in een literatuur overzicht aan, dat de waarde van R_b tussen verschillende boomsoorten en binnen één boomsoort grote variaties kan vertonen. In het overzicht varieert de R_b van loofbomen tussen 44 en 86 $s.m^{-1}$ en van naaldbomen tussen 40 en 11 $s.m^{-1}$. Simulaties met een R_b in 1988 van 50 $s.m^{-1}$, een waarde die slechts weinig afwijkt van de originele 60 $s.m^{-1}$, geeft een gecumuleerde Transpiratie+Bodemverdamping op dag 274 van 151 mm en een RMSE voor de gehele simulatie-periode van 0,145 $cm.d^{-1}$ (1988). Deze gecumuleerde evapotranspiratie benadert de 159 mm van de EBBR-methode. Voor landgebruik Amerikaanse eik geeft deze veranderde R_b een gecumuleerde evapotranspiratie van 123 mm en een RMSE van 0,153 $cm.d^{-1}$. Dezelfde aanpassing van de minimale gewasweerstand in 1989 geeft, met landgebruik-optie loofbos, een RMSE over de gehele simulatie-periode van 0,122 $cm.d^{-1}$ en een gecumuleerde evapotranspiratie ($E_t + E_s$) op dag 300 van 335 mm (t.o.v. 311 mm EBBR-evapotranspiratie). Simulaties met de oorspronkelijke R_b waarde leverde een RMSE van 0,117 $cm.d^{-1}$ en een gecumuleerde evapotranspiratie van 329 mm. (zie tabellen). In figuur 11 worden de aangepaste curves voor landgebruik loofbos in respectievelijk 1988 (fig. 11A) en 1989 (fig. 11B) gegeven. De curve in 1989 (B) vertoont een gering hogere ligging t.o.v. de EBBR-curve. De curve in 1988 (A) is t.o.v. de oude curve (fig. 10) hoger komen te liggen en zodoende dichter op de EBBR-curve. De 1988-curve valt nu in ieder geval binnen de 14% foutenmarge van de EBBR-curve.

Voor een goede validatie is een derde simulatieperiode nodig. Deze was helaas niet beschikbaar.

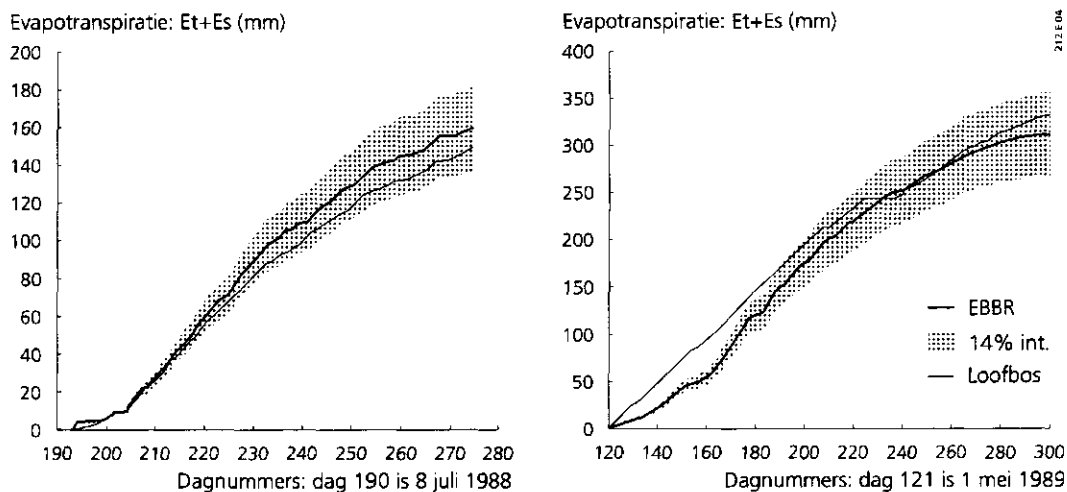


Fig. 11 Cumulatieve actuele evapotranspiratie ($E+E_s$) met aangepaste minimale gewasweerstand R_b voor loofbos en EBBR-curve in A: 1988 en B: 1989.

Met E_t : actuele transpiratie, E_s : actuele bodemverdamping, 14% int.: 14% foutenmarge EBBR.

5.3.2 Vergelijking MUST met SWATRE/SWACROP (1989)

Zoals al in hoofdstuk 2 is aangegeven, is MUST beter geschikt voor regionale studies die de waterbalans berekenen op kleinere, dus minder gedetailleerdere schaal, dan het aangepaste model SWATRE/SWACROP dat door Hendriks et al. (1990) is gebruikt. Een vergelijking van deze twee modellen, waarvan de kalibratie en validatie perioden niet gelijk zijn, met daaraan harde conclusies verbonden, is hier niet op zijn plaats. Voor de volledigheid worden in tabel 9 wel enkele resultaten gegeven van RMSE berekeningen. Hiervoor zijn de SWATRE/SWACROP waarden van het gecalibreerde model uit 1988 gebruikt.

Het door Hendriks et al. gebruikte SWATRE/SWACROP model is in hun studie gecalibreerd met de meetgegevens uit 1988 en gevalideerd met de meetgegevens uit 1989. In dit onderzoek zijn de kalibratie en validatie perioden omgedraaid; respectievelijk 1989 en 1988, omdat de simulatieperiode van 1989 langer was. De simulatie van het gecalibreerde SWATRE model uit 1988 is slechts gering beter dan voor dezelfde periode met het gecalibreerde MUST model uit 1989 (RMSE_{tot} SWATRE: 0,109 cm.d⁻¹ t.o.v. RMSE_{tot} MUST 0,110 cm.d⁻¹). De simulatiefout van MUST t.o.v. het SWATRE/SWACROP model in 1988 is lager dan de simulatiefout van MUST t.o.v. de EBBR-evapotranspiratie.

Tabel 9 *Vergelijking van de resultaten van MUST en SWATRE/SWACROP in 1988.*

methode	land	(E _t +E _p)		RMSE (cm.d ⁻¹) ⁽²⁾			
		Act	Pot	t193- t 210	t210- t230	t230- t274	t193- t274
RMSE	gebruik	(mm,t274) ⁽¹⁾					
MUST - EBBR	loofbos	138	144	0.183	0.138	0.128	0.144
MUST - EBBR	Am. eik	119	131	0.162	0.155	0.148	0.153
SWATRE - EBBR	--	162	--	0.118	0.100	0.109	0.109
SWATRE - MUST	loofbos	162	--	0.175	0.145	0.109	0.135
SWATRE - MUST	Am. eik	162	--	0.153	0.141	0.126	0.136

(1) Gecumuleerde actuele evapotranspiratie; EBBR t193-t274 = 159 mm.

(2) De RMSE van MUST en SWATRE/SWACROP berekent t.o.v. EBBR-methode voor 3 deel-periodes en de totaal-periode.

Met (E_t+E_p) Act en Pot: respectievelijk actuele en potentiële Transpiratie+Bodemverdamping.

Door Hendriks et al. (1990) is aangegeven dat de modellering met het door hun gebruikte model SWATRE/SWACROP beter kon. Voor een exactere vergelijking van MUST en SWATRE/SWACROP zou een geheel apart onderzoek noodzakelijk zijn, waarin beide modellen verder worden geoptimaliseerd. De modellen vergelijking zoals die is uitgevoerd door CHO-TNO (1984) toonde aan dat MUST en SWATRE zowel in de berekeningen aan de kant van de onverzadigde zone als aan de verdampingskant, nauwelijks verschillen vertonen.

6 Conclusies en discussie

6.1 Eindconclusies

Het simuleren van de evapotranspiratie met MUST, waarbij gegevens van het bos in Ede van het onderzoek van Hendriks et al. (1990) zijn gebruikt, is succesvol verlopen. De aangepaste programmatuur maakt MUST beter toepasbaar voor berekeningen van de evapotranspiratie van bos. De kalibratie van deze vernieuwde versie van MUST leverde met de geoptimaliseerde instellingen een RMSE over de gehele simulatieperiode op van $0,117 \text{ cm.d}^{-1}$ t.o.v. de berekende evapotranspiratie met de EBBR-methode uit het onderzoek van Hendriks et al. (1990). Dit geldt voor de berekening met als landgebruik loofbos, een opbouw van de bodem in 4 lagen en de begindag van de simulatie op 1 januari. Uit de behandelde simulaties van hoofdstuk 5 zijn de volgende conclusies te trekken:

1. Het gemeten en met MUST gesimuleerde grondwaterstandsverloop komen goed overeen. Enige kanttekeningen zijn hier wel op z'n plaats. Doordat het grondwater zich op 5 meter onder maaiveld bevindt is er sprake van een hangwaterprofiel. Nalevering van grondwater aan de onverzadigde zone is gering, evenals het effect op de verdamping. In de buurt van het bos is een grondwaterpompstation, die waarschijnlijk in de relatief droge zomer van 1989 (10,6% droog jaar) extra grondwater heeft gewonnen. Desalniettemin werd het grondwaterstandsverloop goed gesimuleerd.
2. Twee gewas-opties zijn doorgerekend, waarbij de methode voor het berekenen van de evapotranspiratie verschilt, te weten 'loofbos' (deciduous forest) en een 'eigen gewas' (Amerikaanse eik). Uit de simulaties bleek dat de berekeningswijze met als gewas-optie loofbos de beste resultaten opleverde (laagste RMSE t.o.v. de EBBR). Gewas-optie loofbos heeft als voordeel dat met deze methode minder gewasspecifieke parameters hoeven te worden opgegeven. Parameters waarvan de grootte uit de literatuur moet worden gehaald of proefondervindelijk moet worden bepaald. Beide tijdrovende bezigheden.
3. Een zo nauwkeurig mogelijke beschrijving van de bodemopbouw met bodemfysische bouwstenen is gewenst. Het feit dat de simulatie met een minder gedetailleerde opbouw een nauwelijks beter resultaat opleverde, is vermoedelijk te wijten aan het algemene karakter van de bodemfysische bouwstenen van de Staringreeks. Mogelijk sluiten in dit specifieke geval de bouwstenen voor zwak lemig matig fijn zand beter aan bij de bewortelbare zone dan de overige bouwstenen.
4. Alle invoergegevens zijn van invloed op de resultaten van de berekening van de verdamping. Zij moeten dan ook met zorg en zo nauwkeurig mogelijk worden ingevoerd.
5. De uitkomst van simulaties met een verschil in begindag (dag 1 of dag 120), nodig om de initiële vochtcondities te optimaliseren, leverden een zeer gering verschil op.

Het is niet bekend of dit onder andere meteorologische omstandigheden hetzelfde resultaat opleverd. In jaren met een nat of droog voorjaar lijkt het wenselijk om de simulaties eerder te laten aanvangen dan de periode waarover uitkomsten gewenst zijn, dan de initiële bodemvochtcondities van MUST aan te houden.

6. Naast een tijdstapgrootte van 1 dag, is gerekend met een tijdstapgrootte van 5 en 10 dagen. Een tijdstap van 1 dag geeft veruit de beste simulatieresultaten. In de berekeningen met 5 en 10 daagse tijdstappen worden verdrogingseffecten uitgemiddeld. Aangezien dit onderzoek juist geïnteresseerd is in verdrogingseffecten, valt de voorkeur op een tijdstap van 1 dag. De betere uitkomsten bij een tijdstap van 1 dag wegen hierbij zeker op tegen de hoeveelheid gegevens die daarvoor extra moeten worden ingevoerd. Het verschil in benodigde computerrekeningstijd tussen de verschillende tijdstapgroottes is bij het berekenen van één simulatiejaar met de huidige snelle computers verwaarloosbaar.

7. Berekeningen van de verdamping met gegevens van het KNMI-station De Bilt, leverden voor 1989, zoals verwacht, een hogere RMSE op t.o.v. de berekende verdamping met de EBBR-methode, dan berekeningen met lokale weersgegevens. Gezien de ruimtelijke meteorologische verschillen moeten deze absolute evapotranspiratiewaarden met de nodige voorzichtigheid worden gehanteerd. Voor berekeningen van de relatieve evapotranspiratie (actuele/potentiële evapotranspiratie), om de verdrogingsgevoeligheid van de bodem te bepalen, lijken de berekeningen met meteogegevens uit De Bilt goed bruikbaar.

8. Het voor 1989 gecalibreerde model is gevalideerd met een tweede gegevensreeks van 1988. De resultaten waren in eerste instantie met de geoptimaliseerde instellingen uit 1989 niet bevredigend. Correctie-simulaties met een aanpassing in de minimum gewasweerstand (R_b) van 60 s.m^{-1} naar 50 s.m^{-1} verbeterde de simulatiefout van de evapotranspiratie voor loofbos t.o.v. de EBBR in 1988 goed. Met deze nieuwe instelling komt de gecumuleerde evapotranspiratie ($E_t + E_c$) op 151 mm t.o.v. de niet-gecorrigeerde validatie-simulatie van 138 mm. Dit benadert de 159 mm van de gecumuleerde EBBR-evapotranspiratie beter. Met de gecorrigeerde R_b komt de gecumuleerde evapotranspiratie in 1989 op 335 mm t.o.v. de oorspronkelijk waarde van 329 mm. In beide simulatie-jaren vallen de gecorrigeerde evapotranspiratie-curves binnen de foutenmarge van de EBBR-curve. Helaas was geen derde dataset aanwezig om deze nieuwe instelling te valideren.

9. De voordelen van MUST zijn:

- een relatief eenvoudige invoer procedure;
- er worden geen invoer gegevens gevraagd die door de onderzoeker niet uit de literatuur gehaald kunnen worden (gewas-optie loofbos);
- het verloop van het grondwater gedurende een jaar hoeft niet te worden opgegeven, maar kan door MUST worden berekend. Daarnaast kan het ook worden opgegeven.

De nadelen van MUST zijn:

- er wordt gerekend met bodembedekking en niet met 'leaf area index', wat een nauwkeuriger maat voor het bladoppervlak is en daarmee het verdampingsoppervlak van de boomkruin;

- de netto straling moet worden ingevoerd. Dit is een gewasafhankelijke stralingsgrootte, zodat de door het KNMI verstrekte globale straling moet worden omgerekend. Dit is niet altijd mogelijk wegens gebrek aan gegevens.
- de berekeningsmodules voor de evapotranspiratie zijn niet allemaal even geschikt voor het rekenen aan bos. Hieraan wordt in de discussie paragraaf verder aandacht besteed.

6.2 Discussie

Wanneer bos als landgebruik wordt vergeleken met meer gangbare landbouwgewassen of grasland, zijn er een aantal verschillen in de berekening van de evapotranspiratie. Dit komt door de structuur van de bomen, waardoor vooral de netto neerslag, d.i. het deel van de neerslag dat de bodem bereikt, veel geringer is. De interceptieverdamping en transpiratie wordt een reductie in grondwatervoeding veroorzaakt. De interceptieverliezen kunnen 10 tot 50% van de jaarlijkse neerslag beslaan (Dolman en Moors, 1994). Bij transpiratie doet zich het omgekeerde voor. Doordat bomen sterk op atmosferische variabelen zoals luchtvochtigheid reageren, is de actuele transpiratie vaak minder groot dan je op grond van de meteorologische gegevens zou verwachten (Dolman en Nonhebel, 1988). Daarnaast vertoont bos een veel grotere ruimtelijke variabiliteit, bijv. gaten in het kronendak, dan cultuurgewassen. Het modelleren van bosverdamping vereist daardoor aanpassingen van modellen die voor cultuurgewassen worden gebruikt. Dolman en Moors (1994) gaan hier uitgebreid op in bij de opzet van een nieuw te ontwikkelen model voor berekeningen van de waterbalans van bossen. Een tweede probleem is de boomsoort waaruit het te onderzoeken bos is opgebouwd. Er zijn grote verschillen in fysiologie en structuur tussen de verschillende naald- en loofboomsoorten. Het werken met een 'gemiddeld bos' in detail studies moet daardoor vermeden worden.

De invoergegevens van het bos in Ede konden niet zondermeer worden gebruikt voor simulaties met MUST. Dit kwam doordat de windsnelheid werd gemeten *boven* het bos en niet in een meteostation op enige afstand van het bos. Om MUST toch toepasbaar te maken voor simulaties met de dataset van het bos te Ede, zijn er aanpassingen aangebracht in de berekening van de windcorrectiefactor en aërodynamische weerstand. In dit onderzoek is aan de overige berekeningsmethoden ten aanzien van de evapotranspiratie niet gesleuteld. Bij een verdere ontwikkeling van MUST voor berekeningen aan bos is het echter wel wenselijk om enkele modules aan de verdampingskant aan te passen dan wel geheel te herzien. Het betreft vier aanpassingen in de verdampingsmodule:

- 1) Ten eerste moet nogmaals de windcorrectiefactor worden aangepast. In de huidige opzet wordt de mesowind op 100 m boven maaiveld gezet en in navolging van Wieringa en Rijkoort (1983), niet gecorrigeerd voor de nulvlaksverplaatsing d van de ondergrond (paragraaf 3.5, formules 33 en 34). Theoretisch is dat niet juist. Formule 33 zou moeten worden geschreven als:

$$c_{um} = \frac{\ln\left[\frac{H+2-d_b}{z_{0b}}\right] \ln\left[\frac{100-d_m}{z_{0m}}\right]}{\ln\left[\frac{100-d_b}{z_{0b}}\right] \ln\left[\frac{HU_m-d_m}{z_{0m}}\right]} \quad (38)$$

met d_b en z_{0b} respectievelijk de nulvlakverplaatsing en ruwheidslengte van bos en d_m en z_{0m} respectievelijk de nulvlakverplaatsing en ruwheidslengte van het meteorostation. Wanneer er gemeten wordt in een meteorostation in de buurt van het te onderzoeken bos (met $H_{\text{kort gras}} = 3$ cm i.p.v. de 30 cm uit de paragrafen 3.3.2 & 3.5) wordt d_m : $0,7 * 3$ cm = 0,021 m, wat verwaarloosbaar klein t.o.v. de 100 m waar het van wordt afgetrokken en d_b : $0,7 * 20$ m = 14 m (uitgaande van een boomhoogte H van 20 m), wat niet verwaarloosbaar klein is. Bij berekeningen boven bos (formule 34) valt de term met deze correctie op de mesowindhoogte weg, zodat dit probleem niet aanwezig is. Voor de duidelijkheid; dit laatste is het geval voor het gekalibreerde en gevalideerde model uit dit onderzoek.

2) Een tweede aanpassing kan worden verricht in de interceptie-module. De interceptieverdamping kan op dit moment maximaal het produkt van de bodembedekking en de maximale opslagcapaciteit bedragen. Dit is maximaal $0,7 * 0,7 = 0,49$ mm.d⁻¹ interceptieverdamping voor het bos in Ede. Uit de meetgegevens van Hendriks et al. (1990) is bekend dat de maximale interceptieverdamping in 1989 rond de 1,5 mm.d⁻¹ ligt met een uitschieter naar 6,4 mm.d⁻¹. Het vergroten van de interceptiecapaciteit (SIM) lost dit probleem niet op en de ingevoerde waarde voor SIM zou onjuist zijn. Een soortgelijke correctie zou bovendien niet mogelijk zijn in studies waarvan geen interceptieverdampingsgegevens bekend zijn. Dit probleem kan worden opgelost door de bestaande module in MUST voor het berekenen van de interceptieverdamping te vervangen door een meer gedetailleerd model voor het berekenen van de interceptieverdamping van bos. Gedacht kan worden aan het model van Gash (1979), die de interceptieverdamping berekent bij tijdstappen van 1 dag (dus niet korter, bijv. uurwaarden). Als extra invoer wordt dan een gemiddelde neerslagintensiteit (mm.h⁻¹), gemiddelde verdamping tijdens buien (mm.h⁻¹), vrije doorvalcoëfficiënt (-) en stamafvoercoëfficiënt (-) gevraagd. Deze waarden zijn over het algemeen wel te vinden in de literatuur, zelf te berekenen of op te vragen bij het KNMI.

3) Voor berekeningen aan bossen over meerdere simulatiejaren moet er nog een derde aanpassing worden aangebracht. De berekening van de gewashoogte gaat er in MUST impliciet vanuit dat het gewas aan het eind van het groeiseizoen wordt geoogst. Dit houdt dus in dat het gewas van het land wordt verwijderd, zodat aan het begin van een nieuw simulatiejaar het gewas weer vanaf niets moet opgroeien. Aangezien bos een meerjarig gewas is, moet de gewasgroei-module dusdanig worden aangepast, dat de bereikte boomhoogte aan het eind van het simulatiejaar de beginhoogte is voor het nieuwe simulatiejaar.

4) Tenslotte doet er zich nog een probleem voor met simulaties over meerdere jaren. Bij loofbos mag worden verondersteld dat de transpiratie in de winterperiode nul is.

Voor éénjarige gewassen levert dat geen problemen op. De bodembedekkingsgraad is in de winterperiode nul en daardoor wordt de transpiratie conform formule 26 ook nul. Aangezien een kale loofboom nog een bodembedekking heeft in de winterperiode van zo'n 30 tot 40%, zal er zodoende een geringe transpiratie plaatsvinden, wat onjuist is.

Een van de nadelen van MUST is het rekenen met de bodembedekkingsgraad i.p.v. de LAI, wat een nauwkeuriger bladbezettingsgraad is. Het inbrengen van de LAI in de berekening van de evapotranspiratie van bos vergt een aanzienlijke aanpassing in de programmastructuur van MUST, maar zou de moeite waard kunnen zijn.

In de simulaties zoals ze in dit rapport zijn gepresenteerd is gerekend met een hysteresis van 0,5. CHO-TNO (1984) vond de beste simulatieresultaten met het niet meenemen van een hysteresis effect. Tevens werd in dit onderzoek neerslag, die niet direct kan infiltreren in de bodem, als run-off afgevoerd. Vooral in bos kan water voor enige tijd als plassen op de bodem achterblijven (ponding). Deze twee modelopties verdienen zodoende in het vervolgonderzoek enige nadere bestudering.

Een verdere uitwerking van het interceptiemodel alsmede de kalibratie ervan en de toepassing in bosverdrogingsstudies en de overige punten die in deze discussie aan de orde zijn gekomen, zullen in het vervolgonderzoek naar verdrogingsgevoelige bosgroeiplaatsen worden uitgewerkt. Daarin zal MUST verder worden uitgewerkt voor waterbalansstudies van bos van regionale aard, waarbij gedacht moet worden aan de invoer van bodemgegevens afkomstig van de bodemkaart 1 : 50 000 en klimaatgegevens die niet ter plaatse zijn verzameld.

Literatuur

Ad hoc groep verdamping, 1984. *Herziening van de berekening van de gewasverdamping in het hydrologisch model GELGAM*. Begeleidingsgroep GELGAM, Provincie Gelderland, Dienst waterbeheer secretariaat, Rijkswaterstaat, Dienst informatieverwerking, Arnhem.

Bouwmans, J.M.M., 1990. *Achtergrond en toepassing van de TCGB-tabel. Een methode voor het bepalen van de opbrengstdepressie van grasland op zandgrond als gevolg van een grondwaterstandsverlaging*. Technische Commissie Grondwater Beheer Utrecht.

Braat, L.C. (ed.), 1989. *Verdroging van natuur en landschap in Nederland. Hoofdrapport*. Lelystad, Min. van Verkeer en Waterstaat.

Bruin, H.A.R. de, 1977. *Een computerprogramma voor het berekenen van de inkomende straling aan de rand van de atmosfeer per dag door een horizontaal oppervlak*. KNMI De Bilt, Verslagen V-294.

Burg, J. van den, 1987. *Relaties tussen het vochtleverend vermogen van de grond, het waterverbruik en de groei van een aantal boomsoorten: een literatuurstudie*. SWNBL rapport 7e.

CHO-TNO, 1984. *Vergelijking van modellen voor het onverzadigd grondwatersysteem en de verdamping*. Verslag van de 4^e CHO-studiebijeenkomst in samenwerking met de Studiegroep Hupselse beek. Samengesteld door J.C. Hooghart, Den Haag, Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO, Serie: Rapporten en Nota's no. 13.

CHO-TNO, 1986. *Verklarende hydrologische woordenlijst*. Den Haag, Gespreksgroep Hydrologische Terminologie, Commissie voor Hydrologische Onderzoek TNO, rapporten en Nota's no 16.

Delft, S.P.J. van, 1991. *Invloed van grondwaterstandsval op de houtbijgroei van bos rond het pompstation Vesseem*. Wageningen, DLO-Staring Centrum, rapport 87.

Dolman, A.J., en S. Nonhebel, 1988. *Modelling forest water consumption in the Netherlands*. *Agric. Wat. Manag.* 14: 413-422

Dolman, A.J., en E.J. Moors, (1994). *Hydrologie en waterhuishouding van bosgebieden in Nederland; Fase 1: Toetsing instrumentarium*. Wageningen, DLO-Staring Centrum, Rapport 333.

Feddes, R.A., 1971. *Water, heat and crop growth*. Proefschrift Landbouwniversiteit Wageningen.

- Gash, J.H.C., 1979. An analytical model of rainfall interception by forest. *Quart. J. R. Met. Soc.*, **105**: 43-55.
- Hendriks, C.M.A., 1988. *Onderzoek naar de invloed van grondwaterstands daling op de houtbijgroei van bos*. Wageningen, STIBOKA, rapport 1998.
- Hendriks, C.M.A., 1994. *De verdrogingsstoestand en de verdrogingsgevoeligheid van het Nederlandse bos*. Wageningen, DLO-Staring Centrum, rapport 289.
- Hendriks, M.J., P. Kabat, F. Homma en J. Postma, 1990. *Onderzoek naar de verdamping van een loofbos. Meetresultaten en enkele modelberekeningen*. Wageningen, DLO-Staring Centrum, rapport 90.
- KNMI, 1988,1989. *Maandoverzicht van het weer in Nederland*. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, De Bilt.
- Laat, P.J.M. de, 1980. *Model for unsaturated flow above a shallow water-table, applied to a regional sub-surface flow problem*. Pudoc Wageningen proefschrift.
- Laat, P.J.M. de, 1985. *MUST a simulation model for unsaturated flow*. IIHEE rapport 16, Delft.
- Laat, P.J.M. de, 1989. *MUST version 2.0 a simulation model for unsaturated flow*. IIHEE, Delft.
- Lanen, H.A.J. van, 1984. *Toelichting op de in- en uitvoer van de programma's UN-SAT2 en MUST2*. Interne notitie RIVM/LBG.
- LNv, 1993. *Bosbeleidsplan. Regeringsbeslissing*. Min. van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij, dir. Natuur, Bos, Landschap en Fauna.
- Monteith, J.L., 1965. Evaporation and environment. In: The state and movement of water in living organisms, ed. G.E. Fogg. *Sympos. Soc. Exper. Biol.*, Vol. **19**: 205-234. Academic Press, N.Y.
- Nonhebel, S., 1987. *Waterverbruik van de Nederlandse bossen: een modellen studie*. SWNBL rapport 7g.
- Phelps, J.E., J.L. Chambers and T.M. Hinchkley, 1976. *Some morphological, ecological and physiological traits of forest species*. In: J.S. Fralis, G.T. Weaver and R.C. Schlesinger (eds.). First central hardwood forest conference proceedings. Southern Illinois University, Carbondale. pp. 231-243.
- Roestel, J. van, 1984. *Transpiratie en interceptie van bos; een literatuurstudie*. SWNBL rapport 7b.

Soesbergen, G.A. van, C. van Wallenburg, K.R. van Lynden en H.A.J. van Lanen, 1986. *De interpretatie van bodemkundige gegevens*. Wageningen, STIBOKA, rapport 1967.

Steenvoorden, J.H.A.M., L.C.P.M. Stuyt, P.J.T. van Bakel, R.H. Kemmers en J. Hoeks, 1991. *Van verdrogen naar vernatten*. 's-Gravenhage, Nat. Raad voor Landbouw. Onderz. rapport 91/10.

Vries, F. de en C.M.A. Hendriks, (in prep.). *Gevoeligheid van bosgroeiplaatsen voor grondwaterstands daling. Methode en toepassing op provinciaal niveau*. Wageningen, DLO-Staring Centrum.

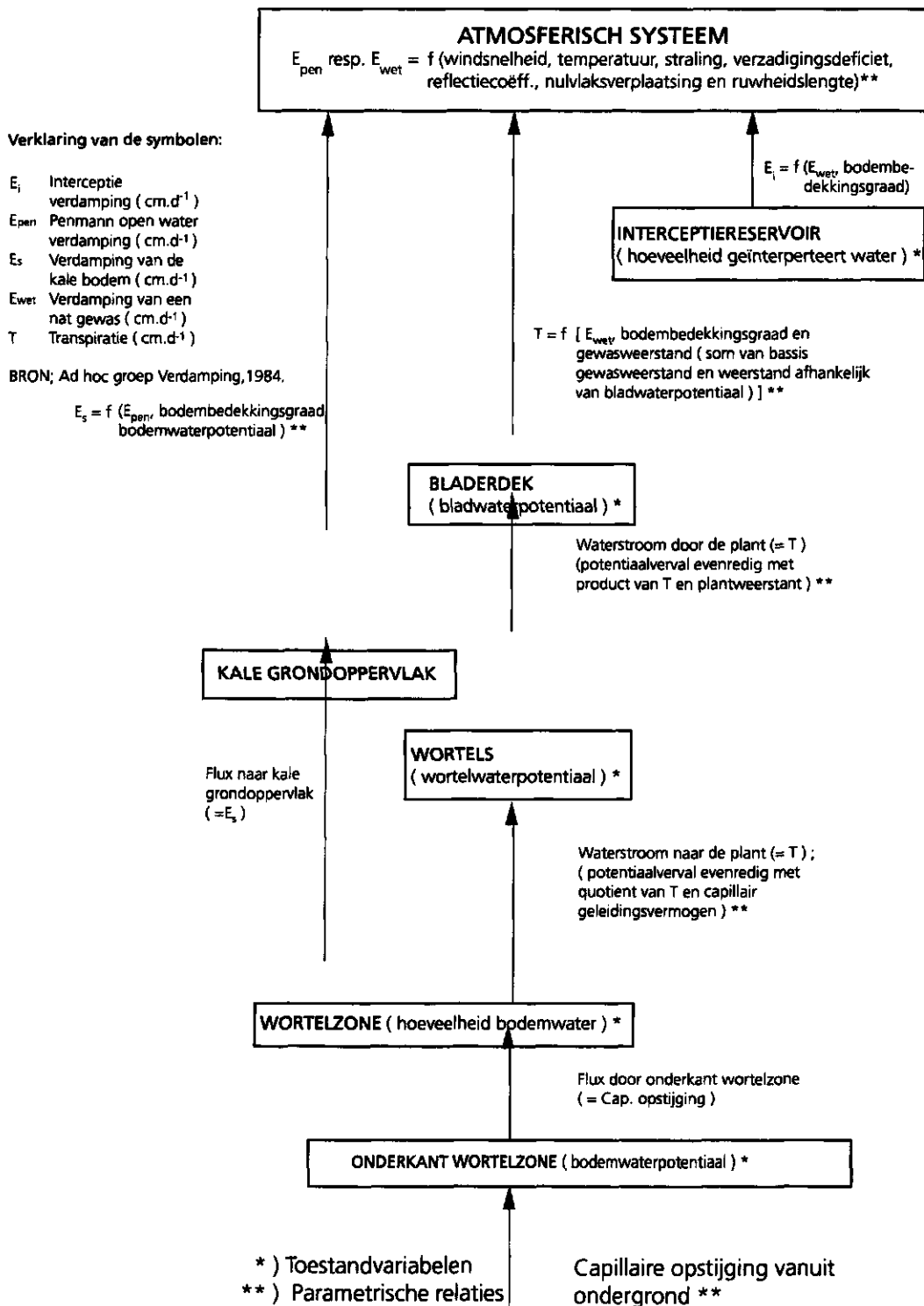
Waenink, A.W. en K.R. van Lynden, 1988. Een systeem voor de geschiktheidsbeoordeling van gronden voor bos. *Ned. Bosbouw tijdschrift* 60(1): 12-22.

Werkgroep bosschade, 1986. *Een oriëntatie naar de mogelijkheden om de aard en de omvang van produktieschade vast te stellen aan bossen als gevolg van grondwaterwinning*. Utrecht, Techn. Comm. Grondwater Beheer.

Wieringa, J. en P.J. Rijkoort, 1983. *Windklimaat van Nederland (II). Klimaat van Nederland: no. 2*. Staatsuitgeverij, Den Haag.

Wösten, J.H.M., M.H. Bannink & J. Beuving, 1987. *Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks*. STIBOKA rapport 1932, ICW rapport 18.

Aanhangsel 1 Schematische voorstelling van het verdampingsproces van MUST



Aanhangsel 2 De ingevoerde variabelen in de invoerfiles *.DEF, *.RTZ, *.SUB, *.INV, *.UPP en *.OUT

De onderstaande invoerfiles hebben betrekking op een simulatie met landgebruik loofbos, meteo-gegevens uit Ede, opbouw van de bodem in 4 lagen en begindag van de simulatie op 1 januari (dag 1) lopende tot en met 27 oktober (dag 300). In de *.DEF file staan tevens de benodigde parameters voor Amerikaanse eik. De overige landgebruik parameters zijn weggelaten. De *.RTZ en *.SUB files zijn voor loofbos en Amerikaanse eik gelijk. De *.UPP file bevat de meteorologische invoer gegevens voor simulaties met 1 dag (10 tijdstappen). De *.DEF, *.INV en *.UPP files hebben betrekking op het clibratie-simulatiejaar 1989 en het meteostation boven het bos te Ede, tenzij anders aangegeven. De uitvoerfile *.OUT is de standaard uitvoerfile met slechts uitvoer gegevens voor enkele tijdstappen.

*.DEF

```

1 *.RTZ
2 *.SUB
3 *.INV
4 *.UPP
5 *.LOW
6 *.DEF
7 *.OUT
1 No plot (0), plot procedure activated (1)
1 No ponding (1), ponding of rainfall excess (2)
14 Array number of maximum PF in root zone1
Sink Term Function: -----
    PF      ALPHA
    .00      .00
    .70      .00
    1.00     1.00
    2.70     1.00
    2.78     1.00
    4.20     .00
52. Latitude in degrees
.200 Coefficient A in: Rsh = Ra*(A + B*n/N)
.600 Coefficient B in: Rsh = Ra*(A + B*n/N)
Names of standard crops: -----
6 DECIDUOUS FOREST
7 CONIFEROUS FOREST
8 AMERIKAANSE EIK
Relation day number and crop height (m): -----
DECIDUOUS FOREST en AMERIKAANSE EIK
    (1989) (1988)
    1. 17.200 17.000
    121. 17.200 17.000
    151. 17.250 17.050
    180. 17.300 17.100
    260. 17.400 17.200
    304. 17.450 17.250
    367. 17.450 17.250
Relation day number and soil cover: -----
DECIDUOUS FOREST en AMERIKAANSE EIK
    1. .380
    121. .380
    180. .700
    260. .700
    304. .400
    366. .400
    367. .400
Coefficients to adjust SIM for length of time interval: -----
.76160 .29350 -.00170 DECIDUOUS FOREST
.76160 .29350 -.00170 AMERIKAANSE EIK

```

¹ Dit 'array'-nummer verwijst naar pF 4.2.

```

Reflection coefficients (albedo): -----
.18   DECIDUOUS FOREST
.18   AMERIKAANSE EIK
Capacities interception reservoir SIM in cm: -----
.07   DECIDUOUS FOREST
.07   AMERIKAANSE EIK
Crop resistances for liquid flow Rpl in days: -----
0.    DECIDUOUS FOREST
17500. AMERIKAANSE EIK
Minimum or basic canopy resistance in s/m: -----
60.   DECIDUOUS FOREST
60.   AMERIKAANSE EIK
Coefficients P1 and P2 in the relation for RC: -----
0.    0.    DECIDUOUS FOREST
-10000. -18500. AMERIKAANSE EIK
Maximum canopy resistance in s/m: -----
0.    DECIDUOUS FOREST
110.  AMERIKAANSE EIK

```

***.RTZ**

```

1   Total number of root zones in this file

1   ***** Serial number root zone *****
3   Number of layers
1   Serial number of layer
25  Thickness of layer in cm
.4320 .4010 .3920 .3810 .3510 .2760 .2030
.1550 .1180 .0870 .0670 .0530 .0450
.3221E+02 .4560E+01 .2420E+01 .1380E+01 .7700E+00 .1400E+00 .8400E-02
.1900E-02 .6300E-03 .1700E-03 .6200E-04 .2700E-04 .1200E-04
2   Serial number of layer
45  Thickness of layer in cm
.3810 .3540 .3400 .3270 .3040 .1970 .0990 .0730 .0570
.0460 .0390 .0330 .0290
.6388E+02 .1513E+02 .8400E+01 .5520E+01 .2680E+01 .2900E+00 .2600E-02
.3000E-03 .3800E-04 .5600E-05 .1400E-05 .3100E-06 .8200E-07
3   Serial number of layer
10  Thickness of layer in cm
.3540 .3160 .3030 .2860 .2420 .1210 .0560
.0370 .0270 .0200 .0160 .0130 .0110
.9967E+02 .2403E+02 .1010E+02 .5100E+01 .1260E+01 .7500E-01 .8700E-03
.1100E-03 .2400E-04 .4700E-05 .1000E-05 .2600E-06 .6300E-07
Average hydraulic conductivity (cm/d)
.5452E+02 .1102E+02 .5826E+01 .3544E+01 .1652E+01 .1951E+00 .3271E-02
.4712E-03 .8629E-04 .1592E-04 .4389E-05 .1225E-05 .3769E-06
Saturation deficit relation
5.3900 6.6640 7.9102 9.3809 11.9301 16.3084 21.8749
24.1277 25.7458 27.0577 27.9015 28.5450 28.9450
80  Total depth root zone in cm
.5  Hysteresis factor

```

***.SUB**

```

1   Total number of subsoils in this file

1   ***** Serial number subsoil *****
1   Number of layers
1   Serial number of layer
0   Thickness of layer
1   Parameter to indicate change in hydr. cond. rel. (0=no change, 1=yes)
.3540 .3160 .3030 .2860 .2420 .1210
.0560 .0370 .0270 .0200 .0160 .0130 .0110
.9967E+02 .2403E+02 .1010E+02 .5100E+01 .1260E+01 .7500E-01
.8700E-03 .1100E-03 .2400E-04 .4700E-05 .1000E-05 .2600E-06 .6300E-07
1   0. .0000 9.7594 19.1044 28.7131 41.9915 53.7267
55.7475 56.0710 56.1747 56.3119 56.4157 56.5195 56.5899
2   0. .0000 9.8787 19.5440 29.7959 45.3758 63.4229
67.0736 67.3275 67.5814 67.9170 68.0595 68.1480 68.2080
3   0. .0000 9.9028 19.6339 30.0243 46.1770 66.5175
71.0316 71.2721 71.5126 71.8304 72.0278 72.1221 72.1860
4   0. .0000 9.9270 19.7244 30.2626 47.0319 70.4338
76.1246 76.5658 77.0015 77.1215 77.2123 77.3031 77.3647
5   0. .0000 9.9512 19.8156 30.5048 47.9481 75.7347
83.9817 84.3934 84.7907 85.0716 85.1616 85.2517 85.3127
6   0. .0000 9.9634 19.8615 30.6273 48.4329 79.2600

```

89.6027	90.2797	90.6546	91.0389	91.1360	91.2331	91.2990	
7 0.	.0000	9.9695	19.8844	30.6888	48.6816	81.3666	
93.3478	94.1654	94.4990	94.9400	95.0868	95.1925	95.2642	
8 0.	.0000	9.9756	19.9075	30.7506	48.9339	83.7912	
98.1791	99.1230	99.4740	99.9380	100.0901	100.1996	100.2738	
9 0.	.0000	9.9804	19.9259	30.8002	49.1407	86.0257	
103.1357	104.2095	104.6977	105.1006	105.2437	105.3868	105.4838	
10 0.	.0000	9.9853	19.9444	30.8499	49.3516	88.6021	
109.7104	111.1499	111.7034	112.1373	112.3119	112.4866	112.6050	
11 0.	.0000	9.9902	19.9629	30.8998	49.5651	91.6433	
119.4339	121.4589	122.2213	122.8000	123.0721	123.2047	123.2946	
12 0.	.0000	9.9927	19.9722	30.9248	49.6728	93.3916	
126.6944	129.3738	130.3039	131.0299	131.2378	131.4457	131.5867	
13 0.	.0000	9.9951	19.9814	30.9498	49.7812	95.3343	
137.3394	141.3230	142.6538	143.5285	144.0192	144.1824	144.2931	
14 0.	.0000	9.9963	19.9861	30.9624	49.8357	96.3921	
145.1924	150.4553	152.2075	153.2899	153.8252	154.1275	154.2558	
15 0.	.0000	9.9975	19.9907	30.9749	49.8903	97.5167	
156.5726	164.3903	167.0081	168.5698	169.1912	169.5516	169.7960	
16 0.	.0000	9.9988	19.9953	30.9874	49.9450	98.7161	
176.5768	191.6134	196.7223	199.8722	201.0308	201.5553	201.9110	
17 0.	.0000	9.9997	19.9991	30.9975	49.9890	99.7366	
218.5689	276.3901	300.7902	316.2931	321.7408	324.2542	325.1823	
18 0.	.0000	10.0000	20.0000	31.0000	50.0000	100.0000	
250.0000	500.0000	1000.0000	2500.0000	5000.0000	10000.0000	16000.0000	
1 0.	.0000	.1849	.6001	1.1708	2.3462	4.1391	
4.6547	4.7511	4.7867	4.8338	4.8694	4.9050	4.9291	
2 0.	.0000	.1875	.6173	1.2267	2.6155	5.4306	
6.3354	6.4192	6.5031	6.6139	6.6617	6.6920	6.7126	
3 0.	.0000	.1880	.6208	1.2384	2.6806	5.8794	
6.9990	7.0789	7.1588	7.2645	7.3304	7.3627	7.3846	
4 0.	.0000	.1885	.6244	1.2511	2.7507	6.4691	
7.8756	8.0163	8.1553	8.1965	8.2276	8.2588	8.2799	
5 0.	.0000	.1890	.6279	1.2638	2.8266	7.3072	
9.3494	9.4820	9.6107	9.7030	9.7339	9.7648	9.7857	
6 0.	.0000	.1892	.6297	1.2702	2.8675	7.8874	
10.4478	10.6568	10.7796	10.9060	10.9394	10.9727	10.9952	
7 0.	.0000	.1894	.6305	1.2734	2.8883	8.2430	
11.2052	11.4556	11.5657	11.7111	11.7606	11.7969	11.8215	
8 0.	.0000	.1895	.6314	1.2766	2.9093	8.6596	
12.2203	12.5093	12.6250	12.7781	12.8294	12.8670	12.8924	
9 0.	.0000	.1896	.6321	1.2792	2.9268	9.0499	
13.2908	13.6202	13.7794	13.9125	13.9615	14.0106	14.0439	
10 0.	.0000	.1897	.6329	1.2817	2.9448	9.5084	
14.7519	15.1907	15.3709	15.5146	15.5745	15.6344	15.6750	
11 0.	.0000	.1898	.6336	1.2843	2.9629	10.0592	
16.9855	17.6040	17.8494	18.0416	18.1327	18.1782	18.2090	
12 0.	.0000	.1898	.6339	1.2856	2.9720	10.3806	
18.7070	19.5233	19.8225	20.0620	20.1333	20.2046	20.2529	
13 0.	.0000	.1899	.6343	1.2869	2.9811	10.7416	
21.2946	22.5080	22.9364	23.2262	23.3906	23.4466	23.4845	
14 0.	.0000	.1899	.6345	1.2876	2.9857	10.9399	
23.2475	24.8505	25.4129	25.7707	25.9508	26.0533	26.0973	
15 0.	.0000	.1899	.6346	1.2882	2.9903	11.1521	
26.1325	28.5129	29.3528	29.8689	30.0781	30.2014	30.2850	
16 0.	.0000	.1900	.6348	1.2889	2.9949	11.3796	
31.3364	35.9159	37.5549	38.5933	38.9822	39.1613	39.2828	
17 0.	.0000	.1900	.6350	1.2894	2.9986	11.5744	
42.6811	60.3224	68.1504	73.2599	75.0877	75.9402	76.2575	
18 0.	.0000	.1900	.6350	1.2895	2.9995	11.6245	
51.4495	128.3245	289.3245	785.0745	1625.0760	3322.5840	5374.5130	
Average hydr. cond. rel. of top 100 cm:							
.9967E+02	.2403E+02	.1010E+02	.5100E+01	.1260E+01	.7500E-01		
.8700E-03	.1100E-03	.2400E-04	.4700E-05	.1000E-05	.2600E-06	.6300E-07	
.1789	-.0417	Parameters A and B in STORC = A + B*LOG(-QW)					

***.INV**

1	IUPP (Evapotranspiration is computed)
1	ILOW (Flux is a function of water-table depth)
21.0000	Height of measurement windspeed (m)
1.00	Length time step in days
300	Total number of time steps
1	Number of the day in the year at the start of the simulation
1989	Year in which the simulation starts
1	Total number of cases or nodes
.0000	Depth of irrigation water application (cm)
.0000	Minimum time interval between two irrigations (days)
.0000	Critical difference between E_p and E_a since last irrigation (cm)

```

.0000 Critical pF-value at interface root zone subsoil (=4.2)
  3 Type of lower boundary relation for ILOW = 1
-.6000 A
600.0000 B
-.0075 C
.0000 Dummy parameter value
.0000 Dummy parameter value
.0000 Dummy parameter value
.0000 Dummy parameter value
.0000 Dummy parameter value
.0000 Dummy parameter value

  1 Case number *****
  1 Serial number root zone
  1 Serial number subsoil
  6 Type of land use
500.000 Initial water-table depth
-.1000 Initial UPPER boundary flux
-.1000 Initial LOWER boundary flux

```

Meteostation De Bilt:

```

10.0000 Height of measurement windspeed (m)
  1.00 Length time step in days
  365 Total number of time steps
  1 Number of the day in the year at the start of the simulation
1989 Year in which the simulation starts

```

Validatie-simulatiejaar 1988:

```

21.0000 Height of measurement windspeed (m)
  1.00 Length time step in days
  274 Total number of time steps
  1 Number of the day in the year at the start of the simulation
1988 Year in which the simulation starts

```

*.UPP

```

  2 KMETEO=1 (no RNET) , KMETEO=2 (no FR SUN) KMETEO=3 (all are read)
  1 0.75 86.00 7.3 0.000 7.772
  2 1.13 87.00 5.7 0.000 11.255
  3 1.88 89.00 2.4 0.000 11.866
  4 3.38 90.00 3.1 0.710 4.778
  5 3.00 91.00 4.8 0.720 14.922
  6 1.88 94.00 7.3 0.260 10.950
  7 1.50 92.00 6.6 0.030 14.066
  8 2.63 93.00 9.4 0.020 5.511
  9 3.38 94.00 8.1 0.030 5.205
 10 2.25 92.00 6.3 0.330 7.711

```

*.OUT

MUST Model for Unsaturated flow above a Shallow water-Table
Version 2.1 April 1990
P.J.M. de Laat, IHE, POB 3015, 2601 DA Delft

Soil physical data root zone(s)

Total number of root zones defined: 1

*** 1 ***

Layer	Depth	pF:	.0	1.0	2.0	3.0	4.0	4.2
1	25	MC:	.432	.401	.276	.118	.053	.045
		K:	.322E+02	.456E+01	.140E+00	.630E-03	.270E-04	.120E-04
2	45	MC:	.381	.354	.197	.057	.033	.029
		K:	.639E+02	.151E+02	.290E+00	.380E-04	.310E-06	.820E-07
3	10	MC:	.354	.316	.121	.027	.013	.011
		K:	.997E+02	.240E+02	.750E-01	.240E-04	.260E-06	.630E-07
		Average K:	.545E+02	.110E+02	.195E+00	.863E-04	.123E-05	.377E-06
		Sat deficit (cm):	5.390	6.664	16.308	25.746	28.545	28.945

The total depth of the root zone is: 80 cm.
Root zone hysteresis factor equals: .5

Soil physical data subsoil

Total number of subsoils defined: 1

*** 1 ***

Layer Depth pF: .0 1.0 2.0 3.0 4.0 4.2
 1 0 MC: .354 .316 .121 .027 .013 .011
 K: .997E+02 .240E+02 .750E-01 .240E-04 .260E-06 .630E-07
 Average K: .997E+02 .240E+02 .750E-01 .240E-04 .260E-06 .630E-07
 The coefficients in STORC = A + B*LOG(-QW) are A = .179 and B = -.042

Upper boundary condition : Evapotranspiration is computed
 Rainfall excess runs off overland
 Lower boundary condition : Flux is function of water-table depth
 Height of windspeed measurement = 21.00 m
 Length of time step = 1.00 days
 Number of time steps = 304
 Simulation starts on day number = 1 of year 1989
 Number of cases = 1
 Irrigation scenario : No irrigation

Evapotranspiration is computed with the following data:

 Windspeed
 Relative humidity
 Temperature
 Net radiation

The lower boundary condition is described with (one of) the following flux (QW), water-table depth (W) relations:
 LQ Type of relation

- 1 Hyperbolic function : $QW = (A + W)/B + C$
 2 Exponential function: $QW = A*EXP(B*W)$
 3 Linear relation : $QW = A - A/B*W$; IF(QW.GT.C) QW = C

This run uses relation number: 3
 where A = -.6000
 B = 600.0000
 C = -.0750

Initial values and time-invariable data per case

 Case no. 1
 Serial no. root zone 1
 Serial no. subsoil 1
 Depth root zone (cm) 80.
 Type of land use DECIDUOUS
 Water table depth (cm) 500.0
 Upper boundary flux (cm/d) -.100
 Lower boundary flux (cm/d) -.100
 pF interface rootz/subsoil 1.97

STEP	CASE	RAIN	ETI	ETIP	SRAIN	SETI	SETIP	SEPEN	PFRZ	QW	W
----	----	CM/D	CM/D	CM/D	CM	CM	CM	CM	(-)	CM/D	CM
1	1	.00	.04	.04	.0	.0	.0	.0	2.13	-.100	500.0
2	1	.00	.04	.04	.0	.1	.1	.1	2.14	-.100	500.1
3	1	.00	.03	.04	.0	.1	.1	.1	2.14	-.100	500.2
4	1	.71	.06	.06	.7	.2	.2	.1	2.11	-.100	500.1
5	1	.72	.06	.06	1.4	.2	.2	.2	2.09	-.100	499.9
6	1	.26	.05	.05	1.7	.3	.3	.2	2.09	-.100	499.6
7	1	.03	.04	.04	1.7	.3	.3	.2	2.10	-.100	499.4
8	1	.02	.04	.04	1.7	.4	.4	.3	2.10	-.101	499.3
9	1	.03	.04	.04	1.8	.4	.4	.3	2.11	-.101	499.3
10	1	.33	.05	.05	2.1	.4	.5	.3	2.10	-.101	499.1

Aanhangsel 3 Gewijzigde FORTRAN programmaregels van MUST in de sub-routine EVAP.FOR

ORIGINEEL

```

C -----
C COMPUTATION OF EWET
C -----
60 RNT = RNET
   IF(KMETEO.EQ.1) RNT = (1.0-REFLC(LUSE))*RNS - RNL
   IF(KMETEO.EQ.1) RNET = RNT
   IF(LUSE.EQ.6.OR.LUSE.EQ.7) GO TO 70
   DSMALL = 0.7*CROPH
   ZZERO = 0.1*CROPH
   CU = ALOG(60./0.03)/ALOG(HU/0.03)*ALOG(2./ZZERO)/ALOG(60./ZZERO)
   USTAR = CU*U + 0.0001
   IF(LUSE.EQ.1) GO TO 90
   RA = (ALOG(2.0/ZZERO))**2/(0.16*USTAR)
   GO TO 80
90 RA = 4.72*(ALOG(2.0/ZZERO))**2/(1.0+0.54*USTAR)
   GO TO 80
70 RA = 10.
80 EWET = 8640.*(DELTA*RNT*4.08E-7 + 4.956E-4*SVP*(1.0-RH)/
  1 RA)/(DELTA + 0.67)

```

AANGEPAST

```

C -----
C COMPUTATION OF EWET
C -----
60 RNT = RNET
   IF(KMETEO.EQ.1) RNT = (1.0-REFLC(LUSE))*RNS - RNL
   IF(KMETEO.EQ.1) RNET = RNT
   DSMALL = 0.7*CROPH
   ZZERO = 0.1*CROPH
   IF(LUSE.EQ.6.OR.LUSE.EQ.7.OR.LUSE.EQ.8) GO TO 70
   CU = ALOG(60./0.03)/ALOG(HU/0.03)*ALOG(2./ZZERO)/ALOG(60./ZZERO)
   USTAR = CU*U + 0.0001
   IF(LUSE.EQ.1) GO TO 90
   RA = (ALOG(2.0/ZZERO))**2/(0.16*USTAR)
   GO TO 80
90 RA = 4.72*(ALOG(2.0/ZZERO))**2/(1.0+0.54*USTAR)
   GO TO 80
70 IF(HU.GT.CROPH) GO TO 75
C ---WINDSPEED MEASUREMENT METEOSTATION (NEAR FOREST WITH GRASS)---
   CU = (ALOG((CROPH+2-DSMALL)/ZZERO)*ALOG(100/0.03))/
  1 (ALOG(100/ZZERO)*ALOG((HU-0.21)/0.03))
   USTAR = CU*U + 0.0001
   RA = (ALOG((CROPH+2-DSMALL)/ZZERO))**2/(0.16*USTAR)
   GO TO 80
C ---WINDSPEED MEASUREMENT ABOVE FOREST-----
75 CU = (ALOG((CROPH+2-DSMALL)/ZZERO))/(ALOG((HU-DSMALL)/ZZERO))
   USTAR = CU*U + 0.0001
   RA = (ALOG((CROPH+2-DSMALL)/ZZERO))**2/(0.16*USTAR)
80 EWET = 8640.*(DELTA*RNT*4.08E-7 + 4.956E-4*SVP*(1.0-RH)/
  1 RA)/(DELTA + 0.67)

```


Aanhangsel 4 Fouten berekening (RMSE)

Om de met MUST berekende evapotranspiratie te vergelijken met de evapotranspiratiewaarden berekent met de EBBR-methode, zijn de resultaten van MUST uitgedrukt als schattingsfout t.o.v. de EBBR-evapotranspiratie over verschillende perioden. De schattingsfout is berekent met de 'Root Mean Square Error'- methode (RMSE).

Voor het berekenen van de RMSE van MUST t.o.v. de EBBR-methode of SWATRE/SWACROP is de volgende formule gebruikt;

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Waarneming_t - Voorspelling_t)^2}$$

waarin de waarneming de evapotranspiratie waarde van de EBBR-methode of SWATRE/SWACROP is en de voorspelling de evapotranspiratie waarde van MUST, t de tijdstappen met n het aantal tijdstappen. De RMSE wordt zodoende uitgedrukt als de gemiddelde absolute voorspelfout per tijdstap met de eenheid 1, 5 of 10 dagen, al naar gelang de tijdstap. Met deze methode is elke RMSE te berekenen voor elke periode.