

# **Nationaal Onderzoeksprogramma Verdroging**

---

## **DE PARAMETERISATIE VAN DE VERDAMPING VAN NATUURTERREINEN IN HYDROLOGISCHE MODELLEN**

Nationaal Onderzoeksprogramma Verdroging (NOV)

Thema 4

J.F.M. Spieksma  
A.J. Dolman  
J.M. Schouwenaars

NOVEMBER 1995

Vakgroep Fysische Geografie  
Rijksuniversiteit Groningen

Staring Centrum (SC-DLO)

## COLOFON

omslagontwerp: Beek Visser  
produktie: Koninklijke Vermande bv  
druk: 1996

samenstelling begeleidingscommissie NOV  
voorzitter: dr J. Hoeks

leden: ing. G.P. Beugelink  
dr A.J. Dolman  
drs H. Gehrels  
dr J. Schouvenaars  
ir N. Straathof  
prof. dr J.J. de Vries  
ir J.A.P.H. Vermulst

DLO-Staringcentrum

RIVM  
DLO-Staringcentrum  
Vrije Universiteit Amsterdam  
Rijksuniversiteit Groningen  
Natuurmonumenten  
Vrije Universiteit Amsterdam  
RIZA

CIP-GEGEVENS KONINKLIJKE BIBLIOTHEEK, DEN HAAG

(CIP-GEGEVENS)

@ copyright RIZA, februari 1996

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotocopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder uitdrukkelijke bronvermelding.

prijs: f 25, =

bestellingen: Hageman Verpakkers  
Postbus 281  
2700 AG Zoetermeer  
fax: 079 - 3613927

## **WOORD VOORAF**

Verschillende mensen hebben belangrijke bijdragen geleverd bij het uitvoeren van deze studie en de totstandkoming van dit rapport. In de eerste plaats wil ik de leden van de begeleidingkommissie bedanken voor hun advies en commentaar. Daarnaast bedank ik Han Stricker voor het verstrekken van de mikrometeorologische data van de Engbertsdijksvenen. Eddy Moors en Marc Ashby ben ik erkentelijk voor hun ondersteuning bij het gebruik van het model SWAPS. Ook Harry Lankreijer heeft mij vele malen van advies voorzien bij het modelleren. Wim Klaassen en Arthur Veen waren ook vaak bereid om mij van advies te voorzien. Tenslotte wil ik de beide projectleiders en mede auteurs, Jos Schouwenaars en Han Dolman, bedanken voor hun grote inzet en voor de goede samenwerking.

Jan Spieksma



## VOORWOORD

Maatregelen ter compensatie of bestrijding van de verdroging kunnen aanzienlijke effecten hebben op de verdamping van een gebied. Vernatting leidt in het algemeen tot een toename van de verdamping. Hierdoor kan het effect van anti-verdrogingsmaatregelen, althans op de regionale schaal, deels teniet worden gedaan. Ook kan de wateraanvoerbehoefte van een gebied toenemen. Verdamping is een belangrijke post in de waterbalans van regionale modelstudies, zoals toegepast ter voorbereiding van herstelmaatregelen. Kennis op het gebied van de verdamping van natuurterreinen is in het licht van de verdrogingsbestrijding dan ook van groot belang.

Tot nu toe is het verdampingsonderzoek in Nederland, zowel het veldonderzoek als de modelontwikkeling, voornamelijk gericht geweest op landbouwgronden en recentelijk ook op bossen. Over de verdamping van natuurterreinen, met name die met een heterogene begroeiing, is nog relatief weinig bekend. Er is tot op heden slechts beperkt veldonderzoek uitgevoerd, waardoor onvoldoende gegevens beschikbaar zijn voor de parametrisatie van hydrologische modellen.

In opdracht van de Stuurgroep van het Nationaal Onderzoeksprogramma Verdroging is daarom een studie uitgevoerd met als doel meer inzicht te krijgen in de verdamping van verschillende typen natuurterreinen. De studie is uitgevoerd door de Vakgroep Fysische Geografie van de Rijksuniversiteit Groningen in samenwerking met het DLO-Staringcentrum. De studie had vooral een verkennend karakter. Op basis van literatuuronderzoek is de nu aanwezige kennis op het gebied van de verdamping van natuurterreinen operationeel gemaakt. De studie heeft tevens duidelijk gemaakt dat de huidige inzichten nog tekort schieten om de verdamping van diverse natuurlijke heterogene vegetaties te kunnen beschrijven. Aanvullend veldonderzoek is dringend gewenst. Mede namens de uitvoerders en de begeleidingscommissie spreek ik dan ook de hoop uit dat de aanbevelingen uit het voorliggende rapport hun beslag krijgen in een vervolgonderzoek.

dr ir J. Hoeks,

Voorzitter van de begeleidingscommissie



## INHOUDSOPGAVE

<b>SAMENVATTING</b> .....	i
<b>SUMMARY</b> .....	iii
<b>INLEIDING</b> .....	iv
<i>Achtergrond</i> .....	iv
<i>Probleemstelling</i> .....	iv
<i>Doelstelling</i> .....	v
<i>Aanpak van het onderzoek</i> .....	v
<i>Leeswijzer</i> .....	vi
<b>DEEL 1: LITERATUURVERKENNING</b>	
<b>1 INLEIDING</b> .....	1
1.1 <i>Doel van de literatuurverkenning</i> .....	1
1.2 <i>Verschillen tussen verdamping van landbouwgewassen en natuurterreinen</i> .....	1
1.3 <i>Indeling in type natuurterreinen</i> .....	3
<b>2 VERSCHILLENDE BENADERINGEN OM DE VERDAMPING TE BEPALEN</b> .....	5
2.1 <i>Inleiding</i> .....	5
2.2 <i>Begrippen</i> .....	5
2.3 <i>Meetmethoden ter bepaling van de verdamping</i> .....	6
2.3.1 <i>Lysimeters</i> .....	6
2.3.2 <i>Pan verdamping</i> .....	7
2.3.3 <i>Waterbalans van een stroomgebied of polder</i> .....	7
2.3.4 <i>Indikkingsmethode</i> .....	7
2.3.5 <i>Bowen Ratio methode</i> .....	8
2.3.6 <i>Eddy korrelatie</i> .....	9
2.4 <i>Rekenmethoden ter bepaling van de verdamping</i> .....	10
2.4.1 <i>Benadering met gewasfactoren met Penman en Makkink</i> .....	10
2.4.2 <i>Haude</i> .....	14
2.4.3 <i>Bepaling van de verdamping met plantweerstand modellen</i> .....	15
2.5 <i>Diskussie</i> .....	18

<b>3 VERDAMPING VAN HALF-NATUURLIJKE VEGETATIES.....</b>	<b>21</b>
3.1 <i>Verdamping van laagveenmoeras.....</i>	21
3.2 <i>Verdamping van kustduinen.....</i>	26
3.3 <i>Verdamping van (half-)natuurlijk grasland.....</i>	30
3.4 <i>Verdamping van heide .....</i>	33
3.5 <i>Verdamping van hoogveen.....</i>	36
<b>4 KONKLUSIE.....</b>	<b>43</b>
<b>LITERATUUR.....</b>	<b>47</b>
<b>DEEL 2: VOORBEELDSTUDIE; TOEPASSING VAN HET MODEL SWAPS OP DE           ENGBERTSDIJKSVENEN</b>	
<b>1 INLEIDING.....</b>	<b>57</b>
<b>2 LOKATIE EN METINGEN.....</b>	<b>59</b>
<b>3 HET VERDAMPINGSMODEL SWAPS.....</b>	<b>61</b>
<b>4 METHODE.....</b>	<b>65</b>
<b>5 RESULTATEN.....</b>	<b>69</b>
<b>6 DISKUSSIE.....</b>	<b>77</b>
<b>7 KONKLUSIES.....</b>	<b>81</b>
<b>LITERATUUR.....</b>	<b>83</b>



## DEEL 3: ADVIES

<b>1 INLEIDING</b> .....	87
<b>2 DE BETEKENIS VAN DE STRUKTUUR VAN DE VEGETATIE VOOR DE VERDAMPING</b> .....	89
<b>3 DE PARAMETERISATIE VAN VERDAMPING VAN NATUURTERREINEN IN REGIONAAL HYDROLOGISCHE MODELLEN</b> .....	91
3.1 <i>Typen modellen</i> .....	91
3.2 <i>Het gebruik van Makkink gewasfactoren</i> .....	92
3.3 <i>Aanbevelingen voor regionale modellen</i> .....	93
<b>4 AANBEVELINGEN VOOR VELDEXPERIMENTEN TEN BEHOEVE VAN MODELONTWIKKELING</b> .....	95
<b>BIJLAGE</b> .....	97





## SAMENVATTING

In dit onderzoek wordt een overzicht gegeven van de bestaande kennis over de verdamping van de in Nederland voorkomende natuurterreinen. Op basis daarvan en met behulp van een voorbeeldstudie met het door SC-DLO ontwikkelde onverzadigde zone-verdampingsmodel SWAPS, wordt aangegeven hoe adequaat de parameterisaties van de verdamping van natuurterreinen zijn. Tenslotte wordt een advies opgesteld voor de parameterisatie van de verdamping in hydrologische modellen. Hierbij wordt ingegaan op de noodzaak van aanvullende studies en langjarige experimenten.

### Deel 1

In deel 1 van dit rapport wordt de beschikbare kennis ten aanzien van de verdamping van in Nederland voorkomende natuurterreinen geïnterpreteerd. In de praktijk wordt de verdamping van natuurterreinen veelal geschat aan de hand van de veronderstelde mate van overeenkomst met grasland en open water. Hierbij wordt gebruik gemaakt van sporadisch beschikbare informatie. Het verdampingsonderzoek in Nederland heeft zich tot dusver voornamelijk gericht op homogene landbouwgewassen en recentelijk ook op bossen. Het is echter aannemelijk dat tussen landbouwgebieden en natuurterreinen verscheidene voor de verdamping relevante verschillen bestaan. Hierbij moet gedacht worden aan de heterogeniteit en de daarmee samenhangende verschillen in straling en wind. Andere relevante verschillen kunnen zijn: de aanwezigheid en de dikte van de strooisellaag, wortelstelsel en wateropname, alsmede de nutriënten beschikbaarheid.

Eerst wordt een overzicht gegeven van verschillende benaderingen om de verdamping te bepalen. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen meetmethoden en rekenmethoden. Dit overzicht is noodzakelijk voor een goed begrip van de bestudeerde literatuur. Tevens komen de voor- en nadelen van deze methoden aan de orde. Vervolgens wordt, met een indeling in vijf typen natuurterreinen (laagveenmoeras, kustduinen, half-natuurlijk grasland, heide en hoogveen), een overzicht gegeven van de beschikbare kennis. Zowel waarden voor verdampingsparameters als belangrijke verdampingskenmerken worden per type natuurterrein besproken. Tevens is, in tabel-vorm, per type natuurterrein, een samenvatting van de literatuur opgesteld. Opvallend is het gebruik van uiteenlopende meet- en rekenmethoden in de literatuur. Bovendien is er een grote mate van variatie in de resultaten binnen één studie met één benadering alsook tussen verschillende studies met verschillende benaderingen.

### Deel 2

Deel 2 is een voorbeeldstudie waarbij de verdamping van het hoogveengebied de Engbertsdijksvennen wordt gesimuleerd met een model. Geprobeerd wordt na te gaan welke fysische processen en parameters juist bij de verdamping van natuurterreinen een belangrijke rol spelen. Een gedetailleerd, op fysische processen gebaseerd verdampingsmodel voor heterogene vegetatie en onverzadigde zone ("SWAPS"), wordt gebruikt om inzicht te krijgen in deze processen en parameterisaties. Dit model wordt met behulp van meetgegevens boven de pijpestrootje vegetatie in de Engbertsdijksvennen, gekalibreerd en gevalideerd. Bovendien worden een tweetal varianten met verschillende vegetatie-structuren doorgerekend. In de eerste variant wordt een vegetatie gesimuleerd die bestaat uit 50 % berken en 50 % pijpestrootje, terwijl bij de tweede variant sprake is van 50 % veenmos en 50 % pijpestrootje. Hierdoor kunnen de consequenties van de heterogeniteit van de vegetatie op de verdamping worden geëvalueerd.

Tevens komt de bruikbaarheid van de Makkink vergelijking -in combinatie met gewasfactoren- bij de verdamping van natuurterreinen aan de orde.

De structuur van de vegetatie blijkt een belangrijke invloed te hebben op de processen die de verdamping bepalen. De verdamping van beschutte of lage delen van de vegetatie wordt goed voorspeld met behulp van op straling gebaseerde verdampingsformules, zoals Makkink. Voor onbeschutte of hoge vegetaties zullen dergelijke benaderingen te kort schieten, omdat in zo'n geval de turbulentie een grote rol gaat spelen bij de verdamping. Dit betekent dat voor heterogene vegetaties het gebruik van verdampingsformules die alleen rekening houden met de energieterm (Makkink), niet tot een goede inschatting van de verdamping leiden. Een goede verdampingsformule waar beide termen beschreven worden is de Penman-Monteith vergelijking. Voor het gebruik van deze formule is informatie nodig over gewasweerstand en aerodynamische weerstanden.

Makkink is niet goed toepasbaar voor het inschatten van de verdamping op dagbasis, wel voor het inschatten van de verdamping voor langere perioden. De fout in de verdamping uitgerekend met Makkink kan op dagbasis soms wel 20% tot 40 % bedragen. Voor berekeningen aan processen met een korte tijdschaal is Makkink niet geschikt. Voor langdurige effectstudies of waterbalans studies is het gebruik van Makkink wel verdedigbaar.

Uit deze studie is duidelijk geworden dat de strooisellaag een rol kan spelen in het verdampingsgedrag van een natuurterrein. De mate waarin een strooisellaag invloed heeft op de bodemverdamping en bodeminterceptie is niet helemaal duidelijk.

### Deel 3

In deel 3 wordt op basis van de literatuurverkenning (deel 1) en de model studie (deel 2) een advies uitgebracht over de parameterisatie van de verdamping in hydrologische modellen. Voor het inschatten van de verdamping van een beperkt aantal vegetaties kan Makkink gebruikt worden. Dit betreft vooral open en korte begroeiingen waarbij strooisel, kale bodem of mossen geen rol van betekenis spelen. Voor deze terreinen wordt een Makkink-gewasfaktor van 1.0 tot 1.1 geadviseerd. Voor de grootste groep van vegetaties/terreintypen blijkt het echter niet goed mogelijk richtlijnen voor gewasfactoren te formuleren. Een ander knelpunt is de onbekendheid van de grootte van de verdamping in het winterseizoen.

Omdat de Penman-Monteith vergelijking de relevante processen beter beschrijft verdient deze de formule de voorkeur. Goed gebruik van deze formule vereist echter nauwkeurige informatie ten aanzien van in te voeren weerstanden. Juist deze informatie is nauwelijks beschikbaar.

Processen die aandacht verdienen bij de verdamping van natuurterreinen zijn het effect van de aerodynamische ruwheid, de rol van open water, de rol van interceptie en het effect van een strooisellaag. Het is echter duidelijk geworden dat deze relevante processen nog niet goed onderzocht zijn. Daarom wordt een aanzet gegeven voor een onderzoeksprogramma met specifieke aandacht voor de voor de verdamping van natuurterreinen kenmerkende eigenschappen en processen.

## SUMMARY

This report presents the results of a literature review and a model study on the evaporation of natural vegetation. The study was carried out within the framework of the National Research Programme on Dehydration, theme 4.

### Literature review

In part 1 of this report an inventory is made of literature on the evaporation of natural vegetation. A summary of methods to determine evaporation is given. The evaporation of natural vegetation is most commonly estimated, assuming a similarity with grassland or open water. Subsequently, an overview is compiled of the available knowledge on evaporation, for five types of natural vegetation (fens and marshes, dunes, grassland, heathland and bogs). Both values of evaporation parameters and evaporation characteristics of each type are presented and discussed. A large variation in results is found. This variation is attributed to the high diversity in the applied methods of the different studies. Many of these methods neglect important processes.

### Model study

Research on evaporation has largely been focused on homogeneous agricultural crops and forests. As a consequence, most evaporation models are based on the relevant processes in these vegetation types. However, there are important differences between agricultural crops and forests on one side and natural vegetation on the other side. Some of these differences involve the presence of open water, the presence of a mulch layer of litter and the heterogeneous structure of most natural vegetation types.

The model study of part 2 concentrates on the part of heterogeneity in the evaporation of natural vegetation. A detailed, physically based evaporation model for heterogeneous vegetation and unsaturated soil water flow "SWAPS", is used. This model is calibrated and validated with field measurements. The model enables evaluation of the significance of heterogeneity on the evaporation of natural vegetation.

It is concluded that vegetation structure strongly influences the processes that determine the evaporation. The evaporation of the lower components of the vegetation can be accurately predicted via "radiation-based" (model relating evaporation to radiation only) models. For exposed components of the vegetation, such models are not likely to predict evaporation correctly. This implies that for a heterogeneous vegetation in general, evaporation models should be used that take both radiation and vapour pressure deficit into account.

### Recommendation

Based upon the results of part 1 and 2 a recommendation concerning the evaporation of natural vegetation is formulated. More attention has to be paid to the role of aerodynamic surface roughness, open water, interception and the accumulation of soil litter. Until now, these parameters are insufficiently investigated. The need for long term, process-oriented experiments is emphasized.



## INLEIDING

### *Achtergrond*

In het Nationaal Onderzoeksprogramma Verdroging (1993-1997) wordt aangegeven dat er voor het waterbeheer in en rond natuurterreinen dringend behoefte is aan betere modelparameters voor beleids- en beheersondersteunende berekeningen. Dit onderwerp is als thema 4 in het NOV-programma opgenomen. In 1994 is aan de Vakgroep Fysische Geografie van de Rijksuniversiteit Groningen en het Staring Centrum in Wageningen gevraagd dit probleem nader te onderzoeken. Het project is eind 1995 afgerond.

### *Probleemstelling*

Bij maatregelen die worden genomen ter bestrijding van de verdroging in natuurterreinen, komen veelvuldig vragen naar voren die betrekking hebben op de verdamping van deze gebieden. Vaak worden maatregelen voorbereid en genomen om de grondwaterstand te verhogen waarbij het onduidelijk is in hoeverre de verdamping zich zal wijzigen. Tevens worden op enkele plaatsen maatregelen voorbereid om bosgebieden te vervangen door natuurterreinen met een lagere begroeiing om een toename van de grondwateraanvulling te bereiken. Daarbij wordt gedacht aan struweelvorming in duinen (Vlieland), herstel van heide vegetaties (Veluwe) en de ontwikkeling van extensief begraaasd grasland (Meinweg). Kennis van de verdamping is hierbij van groot belang.

De recente ontwikkeling van regionale hydrologische modellen en de inzet hiervan bij studies naar de waterhuishouding van natuurterreinen hebben het gebrek aan kennis over de verdamping van natuurterreinen zichtbaar gemaakt. Deze modellen gebruiken in het algemeen sterk vereenvoudigde beschrijvingen van de verdamping. In hoeverre op deze wijze een goed inzicht in de waterbalans van natuurterreinen kan worden verkregen hangt sterk af van de juistheid van de gebruikte verdampingsberekeningen.

In de praktijk wordt de verdamping van natuurterreinen veelal geschat aan de hand van de veronderstelde mate van overeenkomst met graslanden en open water. Daarbij wordt gebruikt gemaakt van uiteenlopende meet- en rekenmethoden om de verdamping te bepalen. In Nederland wordt gebruik gemaakt van sporadisch beschikbare informatie, verkregen uit empirisch onderzoek (Koerselman en Beltman, 1988; Schouwenaars, 1993; Janssen 1994) en enkele fragmentarische overzichten (Bakker, 1984; Janssen, 1986; Ovaa, 1990). In het rapport van de Ad Hoc Groep Verdamping (1984) en de Project- en begeleidingsgroep verdampingsberekeningen (1988) worden adviezen en parameters verstrekt voor de modellering van de verdamping van landbouwgewassen en bossen in hydrologische modellen. Natuurterreinen worden echter niet behandeld, wel wordt deze lacune in kennis gesignaleerd door de Ad Hoc Groep Verdamping (1984).

Welke gegevens noodzakelijk zijn om verdamping voor natuurterreinen goed te kunnen modelleren is niet goed bekend. Dergelijke informatie wordt bij voorkeur verkregen uit directe metingen van de



verdampingsflux boven een aantal natuurterreinen. Micrometeorologische metingen van verdamping van natuurterreinen in Nederland zijn schaars (Duyzer en Bosveld, 1988; Moors et al., 1995).

### **Doelstelling**

In het kader van de bestrijding en evaluatie van de verdrogingsproblematiek met behulp van regionaal hydrologische modellen is het doel van dit onderzoek:

- A. Een overzicht te geven van de bestaande kennis over de verdamping van de in Nederland voorkomende natuurterreinen.
- B. Te verkennen hoe de verdamping in regionale hydrologische modellen wordt beschreven en hoe adequaat de parameterisaties zijn.

### **Aanpak van het onderzoek**

De hierboven genoemde doelstellingen en de daarmee samenhangende activiteiten zijn verdeeld in de volgende onderdelen:

#### deel 1: literatuurverkenning

Een overzicht is samengesteld van de beschikbare kennis ten aanzien van de verdamping van natuurterreinen, zowel in Nederland als in landen met vergelijkbare klimatologische omstandigheden. Deze informatie is zodanig bewerkt dat de verkregen gegevens toegankelijk zijn voor gebruik in hydrologische studies. Daarbij gaat het met name om gewasfactoren die gekoppeld kan worden aan de Makkink-referentiewaarde voor verdamping.

#### deel 2: modelverkenning

De hydrologische modellen die bij verdrogingsonderzoek het meest gebruikt worden zijn verkend ten aanzien van hun verdampingsmodulen. Hierover is gerapporteerd in de bijlage.

Het door SC-DLO ontwikkelde, gedetailleerde verdampingsmodel voor heterogene vegetaties SWAPS is gebruikt voor simulatie van de verdamping in het hoogveengebied de Engbertsdijksvennen. De data die hiervoor gebruikt is, is verkregen van de vakgroep Waterhuishouding van de LUW. Hiermee is inzicht verkregen in de benodigde parameterisaties voor de beschrijving van de verdamping in heterogene gebieden. Daarbij wordt met name ingegaan op het belang van een gevarieerde structuur of de "aerodynamische ruwheid" in een natuurterrein. Ook de rol van een strooisellaag is aan de orde gesteld. Daarnaast vindt een analyse plaats van de mogelijkheden voor het gebruik van gewasfactoren en de Makkink vergelijking voor het inschatten van de verdamping in natuurterreinen.

#### deel 3: advies

Op basis van de resultaten van deel 1 en 2 is een advies opgesteld voor de parameterisatie van de verdamping in hydrologische modellen. Verschillende processen blijken tot nu toe onvoldoende bestudeerd te zijn. Er wordt ingegaan op de noodzaak van aanvullende studies en langjarige experimenten.

## ***Leeswijzer***

In deel 1 worden de resultaten beschreven van de literatuurverkenning. Dit deel begint met een behandeling van de verschillende benaderingen om de verdamping te bepalen. Daarna wordt de beschikbare kennis samengevat van de volgende typen natuurterrein: laagveenmoerassen, kustduinen, (half-)natuurlijke graslanden, heide en hoogvenen.

In deel 2 wordt gerapporteerd over de voorbeeldstudie met het SWAPS model in de Engbertsdijkswen. Hieruit worden conclusies afgeleid over de betekenis van een aantal kenmerken en processen, karakteristiek voor natuurterreinen. Er wordt ingegaan op de mogelijkheid voor een beschrijving met gewasfactoren en Makkink-verdamping.

In deel 3 wordt geadviseerd over aan te brengen verbeteringen in de parameterisatie van de verdamping in hydrologische modellen. Tevens wordt een aanzet gegeven voor een aanvullend onderzoeksprogramma met specifieke aandacht voor de voor de verdamping van natuurterreinen kenmerkende eigenschappen en processen.



# **DEEL 1**

## **LITERATUURVERKENNING**





## 1 INLEIDING

### **1.1 Doel van de literatuurverkenning**

Voor de verdrogingsbestrijding is het essentieel de kwantitatieve betekenis van de verdamping in de waterbalans van natuurterreinen duidelijk in beeld te brengen. Het doel van deze literatuurverkenning (*deel 1*) is een overzicht samen te stellen van de beschikbare kennis ten aanzien van de verdamping van in Nederland voorkomende natuurterreinen. Dergelijke overzichten bestaan reeds voor landbouwgewassen (Ad Hoc Groep Verdamping, 1984; Project- en begeleidingsgroep verdampingsberekeningen, 1988), terwijl aan een dergelijk advies voor bossen wordt gewerkt (Dolman en Moors, 1994).

In hoofdstuk 2 worden verscheidene meet- en rekenmethoden om de verdamping te bepalen, besproken. Vervolgens wordt in hoofdstuk 3 een literatuuroverzicht gegeven van de beschikbare kennis over de verdamping van natuurterreinen. Maar, eerst worden in hoofdstuk 1 de belangrijkste kenmerken van de verdamping van natuurterreinen vergeleken met die van de verdamping van landbouwgewassen.

### **1.2 Verschillen tussen verdamping van landbouwgewassen en natuurterreinen**

Zoals eerder opgemerkt is het verdampingsonderzoek in Nederland, zowel wat betreft veldonderzoek als modelontwikkeling, voornamelijk gericht geweest op homogene landbouwgewassen en recentelijk ook bossen. De in hydrologische modellen gebruikte parameters zijn veelal afgeleid van kenmerken van landbouwgewassen. Het is echter aannemelijk dat tussen natuurterreinen en landbouwgebieden de volgende voor de verdamping relevante verschillen bestaan:

#### Transpiratie

Het is niet bekend of in voedselarme natuurterreinen de aan groei gekoppelde transpiratie<sup>1</sup> als gevolg van gebrek aan bepaalde nutriënten, lager is dan in goed van nutriënten voorziene landbouwgebieden. Onderzoek van Snyder en Boyd (1987) met behulp van lysimeters aan de verdamping van een tweetal moerasvegetaties (*Water hyacint (Eichhornia crassipes)* en Grote

---

<sup>1</sup> Verdamping vanuit de plant

Lisdodde (*Typha latifolia*) in Alabama wijst overigens wel in die richting. De auteurs meten dat bij een hogere mestgift de LAI (Leaf Area Index), plantdichtheid en planthoogte toeneemt. Bovendien neemt de verdamping toe. Ook De Busk et al. (1983) meten de verdamping van Water hyacint (*Eichhornia crassipes*) bij drie mestgiften. Bij hogere mestgiften nam de stamlengte, LAI en verdamping toe. Daarnaast toonde Schouwenaars (1993) aan dat bij Pijpestrootje de verdamping nauw aan de LAI is gerelateerd. In zijn algemeenheid zijn deze effecten echter nog niet voldoende onderzocht.

#### Heterogeniteit

Alleen in homogene vegetaties kunnen mikro-meteorologische variabelen, zoals temperatuur, dampdruk en wind, op relatief eenvoudige wijze worden beschreven. Cultuurgewassen zijn veelal homogene gewassen, zodat de mikro meteorologische karakterisering hier geen grote problemen oplevert. Ook sommige half-natuurlijke vegetaties kenmerken zich door homogeniteit. Voorbeelden hiervan zijn heide, pijpestrootje, rietvelden en kwelders. In zulke gevallen kan de aërodynamische weerstand een functie van de hoogte van het gewas zijn.

De meeste natuurlijke plantengemeenschappen kenmerken zich door diversiteit en heterogeniteit. De biodiversiteit van deze gebieden brengt met zich mee dat voor verschillende verdampingsparameters niet één enkele waarde die bij één bepaalde plantensoort hoort, kan worden gebruikt. Wellicht zal rekening moeten worden gehouden met de verschillende soorten die in het gebied voorkomen. Ook de ontwikkelingsstadia van verschillende soorten binnen een jaar lopen niet synchroon. Dit zou zijn weerslag kunnen hebben op de verdamping. Daarnaast kan de vitaliteit van een bepaalde vegetatie de verdamping beïnvloeden. Daar komt nog bij dat de stomata van iedere plantensoort misschien weer anders reageren op vochtgehalte in bodem, temperatuur, dampdruk in de lucht, enz.

#### Beschikbaarheid van energie

Vele natuurgebieden zijn bovendien niet alleen soortenrijk maar hebben ook een complexe oppervlaktestructuur. De pollenstructuur van vele half-natuurlijke graslanden, bijvoorbeeld, geeft aanleiding tot expositieverschillen die met sterke temperatuur-verschillen tussen noord- en zuidzijde van elke pol gepaard kunnen gaan (Barkman en Stoutjesdijk, 1987).

Een voorbeeld van extreme heterogeniteit is het geval in natte natuurgebieden waar open water en land in wisselende hoeveelheden voorkomen, in zowel ruimte als tijd. In zulke gevallen kunnen grote verschillen in bodemwarmteflux optreden, zodat de beschikbare energie voor verdamping sterk variabel kan zijn. Ook lokale advectie kan dan van grote invloed zijn op de verdamping.

#### Bodembedekking

In veel natuurgebieden blijft een afgestorven plantenmassa (strooisellaag) de bodem bedekken. Deze laag van organisch afval, humus of "mulch", kan leiden tot het verminderen van de bodemevaporatie, anderzijds kan het de hoeveelheid interceptie verdamping vergroten. Beide effecten werken tegengesteld. Volgens Denmead (1984) is het eerste effect *in bossen* het sterkst. Hij rapporteert dat een strooisellaag van 30 mm dik in een naaldbos in Australië de totale evaporatie (bodemevaporatie en bodeminterceptie) ongeveer met de helft reduceert in vergelijking met evaporatie vanaf kale grond. Gekonkludeerd wordt dat na verwijdering van de strooisellaag de bodemevaporatie aanzienlijk kan toenemen.



### Onverzadigde zone

De aanwezigheid van een bodembedekkende laag en, zoals bij veengronden, de aanwezigheid van zwel en krimp processen, maken dat het bodemprofiel en de bodemwaterhuishouding bij natuurterreinen anders is dan bij landbouwgewassen. Bovendien is onder half-natuurlijke vegetaties een heterogeen wortelstelsel aanwezig. Meer nog dan bij landbouwgewassen is het onduidelijk hoe de wateropname door de wortels van niet-landbouwgewassen wordt beperkt door bodemvochttekorten. Eggink en Vink (1989) onderzochten deze relatie tussen bodemvocht en beperking van de verdamping bij pijpestrootje, veenmos en struikheide met behulp van lysimeters en modelstudies.

Aangezien het verdampingsonderzoek tot nu toe voornamelijk gericht is geweest op de verdamping van landbouwgewassen en gezien de in par 1.1 gesignaleerde behoefte aan een inventarisatie van de verdamping van natuurterreinen, wordt in dit rapport (deel 1) een overzicht gegeven van de beschikbare kennis over de verdamping van in Nederland voorkomende natuurterreinen.

### **1.3 Indeling in type natuurterreinen**

Bij het samenstellen van dit overzicht zijn de volgende typen natuurterreinen onderscheiden:

- 1) laagveenmoeras
- 2) kustduinen
- 3) half-natuurlijk grasland
- 4) heide
- 5) hoogveen

Deze indeling is enerzijds gebaseerd op de indeling die wordt aangehouden in het boek "Levensgemeenschappen" van het Rijksinstituut voor Natuurbeheer (1984). Dit is een ecologische indeling gebaseerd op de samenstelling van soorten, de structuur van de vegetatie, enz. Anderzijds is uitgegaan van de gehanteerde indelingen in de beschikbare literatuur op het gebied van de verdamping van natuurterreinen.

Bossen zijn in deze studie buiten beschouwing gelaten. In het kader van het boshydrologie project (Dolman en Moors, 1994) wordt reeds aan de verdamping van bossen gewerkt. In dit project wordt de beschikbare kennis op het gebied van de boshydrologie geïnventariseerd en wordt een gevoeligheidsanalyse gemaakt van het voor de praktijk ontwikkelde SWNBL-model. Alhoewel in Nederland voor een groot aantal lokaties experimenteel is vastgesteld hoe groot de interceptie en transpiratie zijn, ontbreekt het nog aan mogelijkheden deze informatie te interpreteren en naar andere lokaties te extrapoleren (Dolman en Moors, 1994).



## 2 VERSCHILLENDE BENADERINGEN OM DE VERDAMPING TE BEPALEN

### 2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden een aantal begrippen gedefinieerd die in dit rapport gebruikt worden. Vervolgens worden verschillende, voor natuurterreinen relevante benaderingen om de verdamping te bepalen, besproken.

De beschikbare methoden voor de bepaling van de verdamping kunnen op vele manieren worden ingedeeld. Voor deze studie is een onderscheid gemaakt tussen meetmethoden en rekenmethoden.

In paragraaf 2.3 worden een zestal meetmethoden geïntroduceerd; lysimeters, verdampingspannen, waterbalansen van een stroomgebied, indikkingsmetingen Bowen ratio en eddy correlatie. Vervolgens worden in par 2.4 bij rekenmethoden een tweetal benaderingen ingeleid: de benaderingen volgens Penman en Makkink met gewasfactoren en de benadering volgens Penman-Monteith met gewasweerstand.

Bij de meeste onderzoeken naar de verdamping van een bepaalde vegetatie of natuurterrein wordt zowel een methode uit de meetmethoden als uit de rekenmethoden gebruikt. Zo wordt in vele onderzoeken de meetmethode lysimeters gebruikt om met de rekenmethode volgens Penman of Makkink tot gewasfactoren te komen. De Bowen ratio methode wordt daarentegen vaak in combinatie met gewasweerstand gebruikt.

Deze indeling pretendeert overigens niet volledig te zijn. Gekozen is, die benaderingen te bespreken, die:

- gebruikt worden of zijn bij onderzoek naar de verdamping van natuurterreinen
- voor natuurterreinen een goede theoretische grondslag hebben.

### 2.2 Begrippen

De verdamping van een begroeid oppervlak,  $E$ , is gelijk aan de som van de verdamping van interceptiewater,  $E_i$ , de bodemverdamping,  $E_s$ , en de verdamping vanuit de plant,  $E_t$ :

$$E = E_i + E_s + E_t \quad (1)$$

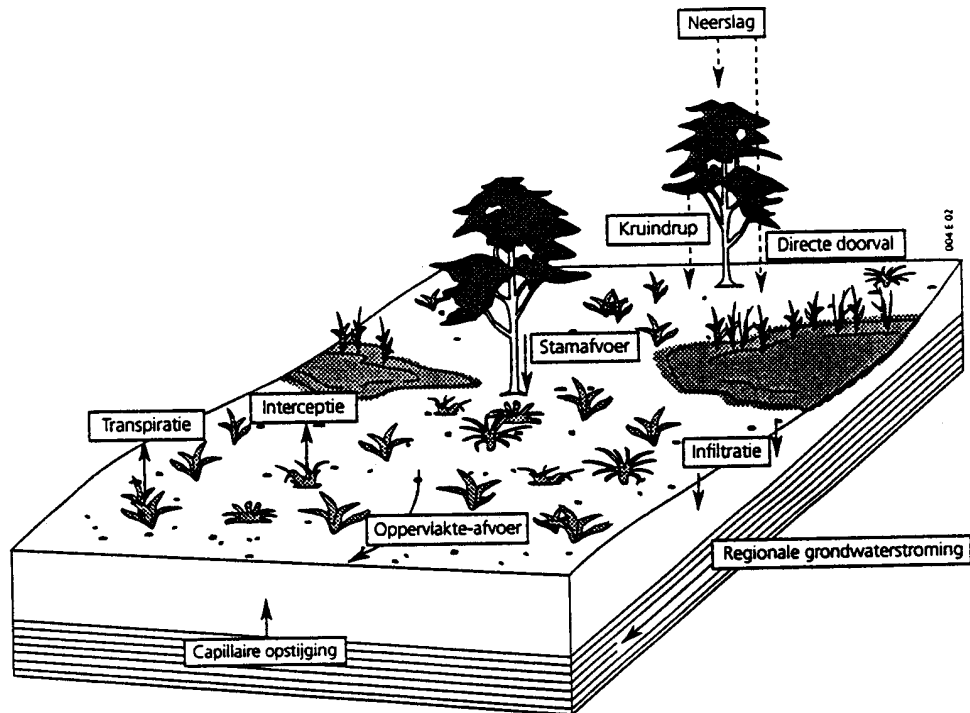
(allen in  $\text{mm s}^{-1}$ )

De verdamping uit de bodem en van interceptiewater worden samen evaporatie genoemd. De verdamping direct vanuit de plant heet transpiratie. De drie termen tesamen worden evapotranspiratie genoemd, al is het gebruik van deze term verwarrend aangezien het geen onderscheid maakt tussen de drie termen..

Indien het gewasoppervlak droog is, dan is de interceptieverdamping  $E_i$  gelijk aan nul. Indien tevens de watervoorziening van de wortels en het grondoppervlak optimaal is, dan is sprake van potentiële evapotranspiratie  $E_{pot}$ . Potentiële evapotranspiratie is dus de verdamping vanaf een droog gewas bij goede vochtvoorziening.

Een term die vaak gebruikt wordt is referentie verdamping. Dit is de verdamping vanaf een referentie oppervlak. Dit kan bijvoorbeeld de Penman open waterverdamping zijn of de Makkink verdamping vanaf een goed van water voorziene, korte grasvegetatie. In Nederland werd voor 1 april 1987 de Penman open waterverdamping door het KNMI als referentie gehanteerd, na deze datum is men de Makkink verdamping gaan gebruiken (Project- en begeleidingsgroep verdampingsberekeningen, 1988).

De aktuele verdamping  $E_{akt}$  is de feitelijk optredende verdamping vanaf een oppervlak.



Figuur 1: Begrippen bij de verdamping van natuurterreinen

### 2.3 Meetmethoden ter bepaling van de verdamping

Hier volgt een beschrijving van een aantal meetmethoden om de verdamping te bepalen. Bij al deze meetmethoden speelt het probleem van gebiedsrepresentatieve gemiddelden een rol. De veronderstelling dat een puntwaarneming representatief is voor grotere gebieden leidt tot fouten.

#### 2.3.1 Lysimeters

Een wijd verbreide methode om de verdamping te bepalen is het gebruik van lysimeters. Een lysimeter is een van de bodemomgeving geïsoleerde ingegraven tank, waarin al dan niet vegetatie groeit. Men onderscheid weegbare en niet weegbare lysimeters. Neerslag, afvoer en bodemvochtveranderingen worden in de tijd geregistreerd. (Bij weegbare lysimeters kunnen bergingsveranderingen eenvoudig door middel van weging worden bepaald.) Uit de waterbalans is de verdamping als restterm te berekenen.

De methode heeft als voordeel dat het waternivo en de vochtvoorziening bekend zijn waarbij de verdamping als restterm nauwkeurig kan worden gemeten. Een nadeel is echter het feit dat de randen iets boven maaiveld uitsteken, hetgeen het mikro-klimaat in en rond de lysimeter zal beïnvloeden. Ook is het bodemvochtgehalte in de lysimeter vaak niet gelijk aan het bodemvochtgehalte in de bodem rond de lysimeter. Tenslotte zal aandacht moeten worden besteed aan de vegetatie. Deze zal wat betreft soorten-samenstelling, structuur, hoogte, enz. in en buiten de lysimeter hetzelfde moeten zijn.

### **2.3.2 Pan verdamping**

In vele onderzoeken wordt de verdamping van een vegetatie vergeleken met de verdamping van verdampingspannen (eng: pan evaporimeters). Verdampingspannen zijn met water gevulde lysimeters en worden beschouwd als een "monster" van een meer. Dergelijke verdampingspannen verdampen meer dan open water vlakten, als gevolg van advektie, zonneshijn op de zijkanen, enz. Een standaard verdampingspan als de U.S. Class A pan verdampt circa 1.4 maal zoveel als een meer (Linacre, 1976).

### **2.3.3 Waterbalans van een stroomgebied of polder**

Een traditionele methode om de verdamping te schatten is met behulp van een waterbalans van een stroomgebied of polder. Net als bij een lysimeter worden neerslag, afvoer en bodemvochtveranderingen bijgehouden. Ook nu is de sluit- of restterm van de waterbalans de verdamping. Het probleem bij deze methode ligt onder andere op het gebied van gebiedsrepresentatieve waarnemingen. Ook de termen kwel of wegzijging uit het gebied zijn vaak moeilijk te bepalen. Tenslotte zijn de grenzen van een stroomgebied ook niet altijd duidelijk.

### **2.3.4 Indikkingsmethode**

Een andere methode om de verdamping te schatten is de bepaling van de ratio tussen het ionen gehalte in het regenwater en het grondwater. Deze ratio kwantificeert het indikkingsproces van het grondwater als gevolg van waterverlies door evapotranspiratie. Met behulp van deze ratio en de hoeveelheid neerslag kan de evapotranspiratie geschat worden. Met name chloride (Cl) is een geschikt ion bij deze bepalingen omdat het slechts weinig deelneemt aan bodemprocessen. In formule, met verdamping E en neerslag P:

$$E = P - \frac{[Cl(\text{neerslag})]}{[Cl(\text{grondwater})]} * P \quad (2)$$

Deze methode kan echter alleen gebruikt worden indien het grondwater uitsluitend door infiltrerend regenwater gevoed wordt. Verder kan de methode verstoord worden door antropogene vervuiling van het grondwater. Bovendien doet zich het probleem voor dat een deel van het regenwater de bodem nooit bereikt (interceptie en oppervlakkige afstroming), terwijl aan de andere kant een extra hoeveelheid chloride het grondwater bereikt als gevolg van droge depositie. Tevens is het chloride gehalte van de neerslag niet konstant.

### 2.3.5 Bowen Ratio methode

De basis voor deze methode vormt de energiebalans aan het aardoppervlak:

$$R_n = \lambda E + H + G \quad (3)$$

$R_n$ = netto stralingsdichtheid	$W\ m^{-2}$
$\lambda E$ = latente warmtestroomdichtheid	$W\ m^{-2}$
$H$ = voelbare warmtestroomdichtheid	$W\ m^{-2}$
$G$ = warmtestroomdichtheid naar bodem of water	$W\ m^{-2}$

Hierbij worden warmte opslag in de vegetatie, energie voor fotosynthese en advektie (horizontale energie-aanvoer) verwaarloosd. De Bowen Ratio  $\beta$  wordt als volgt gedefinieerd:

$$\beta = \frac{H}{\lambda E} \quad (4)$$

De Bowen ratio kan ook worden afgeleid van temperatuur  $\Delta T$  en dampspanning  $\Delta e$  gradienten volgens:

$$\beta = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (5)$$

Zoals blijkt uit het bovenstaande is de formulering van deze methode vrij eenvoudig, echter aan de meetnauwkeurigheid om gelijktijdig op twee verticale nivo's temperatuur en dampspanning te meten moeten zeer hoge eisen worden gesteld. Bovendien stelt de meetapparatuur beperkingen aan metingen s'nachts. Daarnaast levert de Bowen ratio problemen indien de noemer ( $\Delta e$ ) klein wordt of indien de advectie niet meer te verwaarlozen is.

Deze methode is overigens minder geschikt voor toepassingen in gebieden waar de bodemwarmte flux  $G$  of de netto straling  $R_n$  moeilijk te bepalen is. Dit geldt bijvoorbeeld in heterogene gebieden waar stukken open water of plassen en land elkaar afwisselen.

### 2.3.6 Eddy korrelatie

Deze methode is gebaseerd op het gelijktijdig, op één hoogte meten van de fluktuaties in verticale windsnelheid en luchtvochtigheid. Verdamping treedt op indien bij omhoog gerichte wind de luchtvochtigheid hoger is dan gemiddeld en indien bij omlaag gerichte wind de luchtvochtigheid lager is dan gemiddeld, volgens:

$$E = \rho \overline{w'} \overline{q'} \quad (6)$$

E	= verdamping (waterdampflux)	kgm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
ρ	= dichtheid van lucht	kgm <sup>-3</sup>
w'	= afwijking van de gemiddelde verticale windsnelheid	ms <sup>-1</sup>
q'	= afwijking van de gemiddelde luchtvochtigheid	-

Het grote voordeel van deze methode is dat de waterdamp fluxen direkt gemeten worden. De metingen dienen circa 10 - 20 maal per seconde uitgevoerd te worden met zeer snel reagerende meetinstrumenten. Dit vereist complexe meet- en verwerkingsapparatuur.

## 2.4 Rekenmethoden ter bepaling van de verdamping

### 2.4.1 Benadering met gewasfactoren met Penman en Makkink

De grondslag van deze methode is om de verdamping van een referentie-oppervlak te bepalen en deze vervolgens met behulp van een korrektie-faktor (gewasfaktor) te vertalen naar de potentiële verdamping  $E_{pot}$  van een zeker gewas. Tenslotte kan deze potentiële waarde gereduceerd worden tot een aktuele verdamping  $E_{akt}$ , afhankelijk van de vochtvoorraad in de wortelzone.

Twee gangbare vergelijkingen zijn in gebruik om tot verdamping van een referentie-oppervlak te komen. De Penman vergelijking levert een "open water verdamping" en de Makkink vergelijking levert een verdamping voor een goed van water voorziene, korte, grasvegetatie.

#### 2.4.1.1 De Penman vergelijking

Penman (1948) stelde een vergelijking op voor de verdamping. Hij beschouwde het geval dat de lucht aan het oppervlak verzadigd is. Er ontstond een formule die er, in de in dit rapport gebruikte notatie, als volgt uitziet:

$$\lambda E = \frac{s(Q^* - G) + \rho c_p (e_s(T_a) - e_a)/r_a}{s + \gamma} \quad (7)$$



$\lambda$	= specifieke verdampingswarmte van water	J kg <sup>-1</sup>
E	= evapotranspiratie	kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
s	= helling van de verzadigingsdampdruk curve	mbar K <sup>-1</sup>
Q*	= netto stralingsdichtheid	W m <sup>-2</sup>
G	= bodemwarmte stroomdichtheid	W m <sup>-2</sup>
$\rho$	= dichtheid van lucht	kg m <sup>-3</sup>
c <sub>p</sub>	= specifieke warmte van lucht	J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
r <sub>a</sub>	= aërodynamische weerstand	sm <sup>-1</sup>
$\gamma$	= psychrometer konstante	mbar K <sup>-1</sup>
T <sub>a</sub>	= temperatuur op waarnemingshoogte	K
e <sub>s</sub>	= verzadigingsdampdruk bij temperatuur T <sub>a</sub>	mbar
e <sub>a</sub>	= dampdruk bij temperatuur T <sub>a</sub>	mbar

De eerste term in vergelijking (7) is gebaseerd op de energiebalans, de tweede term op aërodynamische processen. Vaak wordt de r<sub>a</sub> in de tweede term benaderd door een functie van de windsnelheid:

$$r_a = \frac{\rho c_p}{\gamma f(u)} \quad (8)$$

f(u) = een functie van de windsnelheid u

De windfunctie wordt empirisch vastgesteld en verschillende windfuncties zijn in omloop.

Voor het schatten van de verdamping wordt vaak de bodemwarmte flux G verwaarloosd. Dit resulteert in verdamping van een hypothetisch wateroppervlak zonder warmteberging, die "open water verdamping" E<sub>o</sub> wordt genoemd:

$$\lambda E_o = \frac{sQ^* + \gamma \lambda E_a}{s + \gamma} \quad (9)$$

E<sub>a</sub> = isotherme verdamping (verdamping vanaf water met dezelfde temperatuur als de lucht) (kgm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>)

Overigens dient te worden opgemerkt dat de "open water verdamping" E<sub>o</sub> vaak geen goede maat is voor de verdamping van oppervlaktewater. In het bijzonder voor diep oppervlaktewater is de warmteberging van groot belang (Project- en begeleidingsgroep verdampingsberekeningen, 1988).

#### 2.4.1.2 De Makkink vergelijking

Gebleken is dat de verdamping van goed van water voorziene, korte gewassen voornamelijk wordt bepaald door de netto straling en in geringe mate luchttemperatuur. Met het dampspanningsdeficiet en de windsnelheid uit de tweede term van de Penman formule blijkt de verdamping van zulke gewassen minder sterk samen te hangen. Voor grasland, dat goed van water is voorzien, stelde Makkink (1957) de volgende formule op:

$$\lambda E = C1 \frac{s}{s + \gamma} K \downarrow + C2 \quad (10)$$

$K \downarrow$  = globale stralingsstroomdichtheid Wm<sup>-2</sup>  
 C1 en C2 = konstanten -

De Bruin (1981) vond dat de verdamping van gras in Nederland goed te beschrijven was met C1=0.65 en C2=0. Vergelijking (10) kan nu als volgt worden geschreven:

$$\lambda E_{ref} = 0,65 \frac{s}{s + \gamma} K \downarrow \quad (11)$$

$E_{ref}$  = Makkink verdamping of referentie gewasverdamping = verdamping van kort grasland, dat goed van water is voorzien kg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>

#### 2.4.1.3 Potentiële verdamping en gewasfactoren

Potentiële verdamping is de verdamping die optreedt indien een droog gewas optimaal van water is voorzien. Een eenvoudige manier om van een bepaald droog gewas de potentiële verdamping te bepalen, is om deze grootheid empirisch af te leiden van een referentie verdamping. De potentiële verdamping kan worden berekend door de referentie verdamping te vermenigvuldigen met een gewasfactor. Hierbij kan bijvoorbeeld de "open water verdamping" volgens Penman ( $E_o$ ) uit vergelijking (9) als referentie verdamping gebruikt worden:

$$E_{pot} = f_p * E_o \quad (12)$$

$E_{pot}$  = potentiële evapotranspiratie mm d<sup>-1</sup>  
 $f_p$  = gewasfactor -  
 $E_o$  = open water verdamping mm d<sup>-1</sup>

In plaats van de open water verdamping, kan men ook Makkink verdamping als referentiewaarde nemen:

$$E_{pot} = f_r * E_{ref} \quad (13)$$

$E_{pot}$  = potentiële evapotranspiratie mm d<sup>-1</sup>  
 $f_r$  = gewasfactor -  
 $E_{ref}$  = referentie verdamping volgens Makkink (vergelijking (11)) mm d<sup>-1</sup>

De verschillende referentie verdamping kunnen slechts gebruikt worden in combinatie met hun eigen gewasfactoren. In dit rapport wordt bij berekening van de potentiële verdamping steeds gebruik gemaakt van vergelijking (12). Indien een gewasfactor  $f$  gegeven wordt, is deze dus afgeleid van  $E_o$ . Voor deze werkwijze is gekozen om aansluiting met buitenlandse literatuur mogelijk te maken. De referentie

verdamping volgens Makkink wordt buiten Nederland slechts weinig gebruikt. Voor omrekeningen tussen beide typen gewasfactoren wordt verwezen naar tabel 1.

Een gewasfactor varieert niet alleen per gewas, maar ook met de tijd van het jaar en de vitaliteit van het gewas. Gewasfactoren worden meestal afgeleid uit waterbalansonderzoekingen, waarbij het gewas optimaal van water wordt voorzien. Voor agrarische gewassen zijn inmiddels gewasfactoren afgeleid en hun verloop gedurende het groeiseizoen. Zo bedraagt de gewasfactor van grasland in het groeiseizoen ongeveer 0.8. De gewasfactoren van andere agrarische gewassen kunnen worden ontleend aan (Feddes, 1987; Cultuurtechnisch vademecum, 1988; Project- en begeleidingsgroep verdampingsberekeningen, 1988).

okt	nov	dec	jan	feb	mar	apr	mei	jun	jul	aug	sep
0.98	0.81	0.34	0.50	0.90	1.35	1.30	1.30	1.32	1.27	1.19	1.17

#### Winterperiode

Vaak wordt bij studies in de winterperiode  $E_0$  of  $0.8 * E_0$  als schatting voor de verdamping genomen. In de winter overheersen de aerodynamische processen uit de tweede term van de Penman vergelijking de verdamping. Penman's  $r_a$  geldt voor een zeer glad oppervlak (relatief hoge  $r_a$ ). Dit betekent dat de Penman "open water verdamping" de verdamping in de winter onderschat.

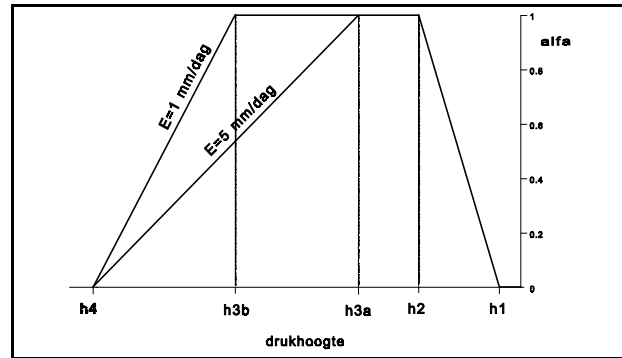
Voor de Makkink formule ontbreekt in de winter de fysische basis, omdat werd aangenomen dat de verdamping voornamelijk wordt bepaald door de straling en luchttemperatuur. In de winter is dit niet het geval.

Het gebruik van de Penman en de Makkink formule in de winter kan daardoor leiden tot fouten in de waterbalans van 50 tot 100 mm. Dit betekent dat, in principe, beide formules in de winter niet toepasbaar zijn. In de praktijk blijkt dat gebruik van  $E_0$  voor de verdamping in de winter leidt tot een onderschatting van de verdamping, maar dat de Makkink verdamping  $E_{ref}$  in de winter kan worden gebruikt voor hele ruwe waterbalans-berekeningen voor weidegebieden. Voor korte perioden kan dit niet, juist vanwege het ontbreken van een fysische basis in de winter (Project- en begeleidingsgroep verdampingsberekeningen, 1988).

#### **2.4.1.4 Aktuele verdamping**

De aktuele verdamping van een gewas zal alleen dan gelijk zijn aan de potentiële verdamping, indien het gewas inderdaad optimaal van water is voorzien. In de praktijk zal zich dat niet altijd voordoen. In natte gebieden zoals hoog- en laagvenen en natte graslanden mag men veronderstellen dat de aktuele verdamping vrijwel gelijk is aan de potentiële. Bij droge vegetaties, zoals droge heide en duinvegetaties, zal de verdamping veelal lager zijn dan de potentiële verdamping.

Een methode om de actuele verdamping te berekenen, is de grootte van de reductie van de potentiële verdamping te relateren aan het bodemvochtgehalte, door middel van een "sink" term  $\alpha$  (Feddes et al., 1978). De opname van water door het gewas wordt nu een functie van de drukhoogte van het water in de wortelzone. Indien de bodem te nat of te droog is dan wordt  $\alpha$  kleiner dan 1. De actuele verdamping is vervolgens gelijk aan het product van  $\alpha$  en de potentiële verdamping. De genoemde "sink" term is een empirische relatie die afhangt van de verdampingsvraag en die bovendien verschilt van gewas tot gewas (afbeelding 2).



Bakker (1984) kiest voor een meer pragmatische benadering. Hij maakt onderscheid tussen natte en droge begroeiingstypen. Droge begroeiingstypen zijn voor hun watervoorziening afhankelijk van bodemvocht. Natte begroeiingstypen daarentegen onttrekken hun water aan het grondwater, daarbij gebruik makend van de capillaire werking van de bodem. Bakker (1984) stelt dat de actuele verdamping van een gewas van het droge type sterk afhangt van de hoeveelheid beschikbaar bodemvocht. Dit bodemvocht bestaat voornamelijk uit hangwater dat alleen wordt aangevuld door neerslag. Het lijkt dan ook aannemelijk dat de actuele verdamping van droge begroeiingstypen niet alleen afhangt van  $E_o$ , maar evenzeer van de totale neerslag. Voor de bepaling van een gewasfactor van droge begroeiingstypen kiest Bakker (1984) voor de volgende benadering:

$$E_{akt} = \frac{g * (E_o + P)}{2} \quad (14)$$

- P = neerslag mm jr<sup>-1</sup>
- g = gewasfactor van droog begroeiingstype (volgens Bakker, 1984) -
- E<sub>akt</sub> = actuele verdamping mm jr<sup>-1</sup>

Natte vegetatietypen beschikken bijna altijd over voldoende water, zodat de verdamping niet wordt beperkt door vochttekorten. In dat geval geldt:

$$E_{akt} = E_{pot} = f * E_o \quad (15)$$

Het is twijfelachtig in hoeverre deze benadering goede resultaten levert.

#### 2.4.2 Haude

In Duitsland wordt veel gebruik gemaakt van de verdampingsformule van Haude (1955). Deze methode is gebaseerd op het dampdeficiet. De benodigde gegevens zijn de dampdruk en luchttemperatuur om 14.00 uur op een standaardhoogte. De potentiële verdamping wordt als volgt berekend:

$$E_{pot} = b * (E - e) \quad (14 \text{ uur}) \quad (16)$$

$E_{\text{pot}}$	= potentiële verdamping	mmdag <sup>-1</sup>
$b$	= variabele maandfactor	mm/(mmHg dag) of mm/(mbar dag)
$E$	= verzadigingsdruk bij luchttemperatuur om 14.00 uur	mmHg of mbar
$e$	= aktuele dampdruk om 14.00 uur	mmHg of mbar

De empirische faktor  $b$  varieert gedurende het jaar. De fysische basis van deze benadering is zeer wankel, omdat de verdamping niet alleen afhangt van het dampdeficiet, maar voor een belangrijk deel ook door de beschikbare hoeveelheid energie wordt bepaald.

### 2.4.3 Bepaling van de verdamping met plantweerstand modellen

Met de Penman-Monteith vergelijking worden niet alleen fysische maar ook fysiologische aspecten van het verdampingsproces in beschouwing genomen. De vergelijking is enerzijds gebaseerd op de beschikbare hoeveelheid energie en anderzijds op het gedrag van de plant om waterdamp te diffunderen vanuit de huidmondjes naar de atmosfeer. De intensiteit van het diffusieproces wordt gereguleerd door de huidmondjes. Dit wordt tot uitdrukking gebracht in de gewasweerstand  $r_c$ .

$$\lambda E = \frac{s(Q^* - G) + \rho c_p (e_s(T_a) - e_a) / r_a}{s + \gamma (1 + r_c / r_a)} \quad (17)$$

$r_c$	= gewasweerstand	sm <sup>-1</sup>
$r_a$	= aërodynamische weerstand	sm <sup>-1</sup>

In het konsept van deze vergelijking wordt de vegetatie op een eenvoudige manier beschreven. De vegetatie wordt namelijk beschouwd als één groot blad. De stomatale en aërodynamische weerstanden van de individuele bladeren van het betreffende gewas zijn vervangen door een hypothetisch groot blad met een enkele oppervlakte weerstand of gewasweerstand,  $r_c$ , en een enkele aërodynamische weerstand,  $r_a$ .

De Penman-Monteith vergelijking ((17)) berekent direkt de aktuele verdamping.

Vergelijking (17) is strikt genomen niet in staat de evapotranspiratie te beschrijven van een droog gewas dat niet volledig de grond bedekt. De bodemevaporatie kan in principe niet met Penman-Monteith-achtige formules worden berekend (Project- en begeleidingsgroep verdampingsberekeningen, 1988). Bij onvolledige bodembedekking moet de gewasweerstand worden opgevat als een oppervlakteweerstand  $r_s$ . In deze weerstand zijn zowel de gewasweerstand als de weerstand voor waterdamptransport vanaf het bodemoppervlak opgenomen.

In plaats van een benadering met weerstanden, wordt vaak gebruik gemaakt van een benadering met geleidbaarheden. Geleidbaarheid is de reciproke van weerstand.

### Gewasweerstand

Factoren die de gewasweerstand kunnen beïnvloeden zijn: de fotosynthetische straling, CO<sub>2</sub> concentratie van de lucht, dampdruktekort, bladtemperatuur en het bodemvochtgehalte (Jarvis, 1976). De weerstand van een blad kan met een porometer gemeten worden. Echter, de vertaling van bladweerstand naar gewasweerstand door middel van LAI<sup>2</sup> is problematisch.

De Penman-Monteith vergelijking ((17)) is afgeleid voor een droog gewas dat de grond volledig beschaduwd. Bij optimale vochtvoorziening van een droog gewas is de gewasweerstand op te vatten als een zogenaamde basisweerstand, r<sub>b</sub>. Indien het gewas volledig nat is, wordt de gewasweerstand r<sub>c</sub> gelijk aan 0 en beschrijft vergelijking (17) de verdamping van het interceptiewater. De Penman-Monteith vergelijking ((17)) is in dat geval gelijk aan de Penman formule (vergelijking (7)). Indien een gewas gedeeltelijk nat is wordt gewoonlijk geïnterpoleerd tussen r<sub>c</sub>=0 (nat) en r<sub>c</sub>r<sub>b</sub> (droog). Men kan overigens ook aparte verdampingsfluxen uitrekenen vanaf natte en droge stukken gewas.

De gewasweerstand wordt meestal bepaald door de Penman-Monteith vergelijking om te draaien waarbij de verdamping onafhankelijk bepaald wordt. Bij deze werkwijze dient de aërodynamische weerstand, r<sub>a</sub>, ook bekend te zijn.

In het rapport van de Ad Hoc Groep Verdamping (1984) worden aanbevelingen gedaan ten aanzien van de waarden van gewasweerstand van landbouwgewassen en bos. De gewasweerstand van gras bedraagt circa 65-500 sm<sup>-1</sup>, van bos circa 50-150 sm<sup>-1</sup> (Ad Hoc Groep Verdamping, 1984). Ook Kelliher et al. (1995) brengen adviezen uit over de geleidbaarheid van vegetatietypen.

### Aërodynamische weerstand

De aërodynamische weerstand wordt als volgt beschreven:

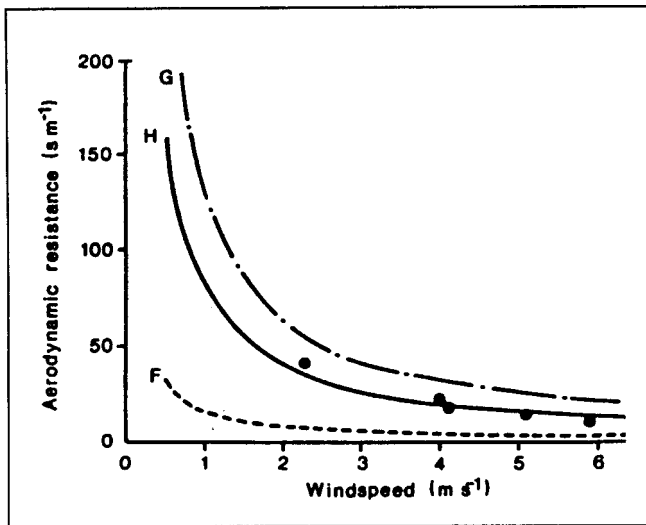
$$r_a = \frac{1}{k^2 u} \left[ \ln \frac{(z-d)}{(z_o)} + \psi \right]^2 \quad (18)$$

- k = Von Karman konstante (0.41) -
- u = windsnelheid op hoogte z ms<sup>-1</sup>
- z<sub>0</sub> = ruwheidslengte (z<sub>0</sub> ≈ 0.1 \* gewashoogte) m

<sup>2</sup>

LAI = Leaf Area Index

z	= meethoogte	m
d	= nulvlaksverplaatsing: op hoogte (d + z <sub>0</sub> ) is de windsnelheid 0 d ≈ 0.7 * gewashoogte	m
σ	= stabiliteitscorrectie	-



**Figuur 3:** Aërodynamische weerstand van drie vegetatietypen G = gras, H = heide, F = Bos (Wallace et al., 1982).

In het algemeen geldt dat hoe ruwer de vegetatie hoe kleiner de aërodynamische weerstand,  $r_a$ , wordt. De  $r_a$  van een open water oppervlakte bedraagt grofweg, afhankelijk van de windsnelheid, circa  $200 \text{ s m}^{-1}$ , van kort gras circa  $70 \text{ s m}^{-1}$  en van een volgroeid bos circa  $5\text{-}10 \text{ s m}^{-1}$ .

In een bos is, onder droge omstandigheden, de verhouding  $r_c:r_a$  ongeveer 10 (Dolman en Moors, 1994). In dat geval bepaalt de gewasweerstand van het gewas (bos) in belangrijke mate de snelheid van verdamping (zie vergelijking (17)). Bij kortere vegetaties is de verhouding  $r_c:r_a$  echter veel kleiner, omdat bij korte vegetaties de aërodynamische weerstand,  $r_a$ , groter is dan bij bossen.

In een neutrale atmosfeer is de stabiliteitscorrectie,  $\Delta$ , nul. Indien sprake is van een onstabiele atmosfeer vindt er, bijvoorbeeld door convectie, meer transport plaats, zodat de  $r_a$  kleiner wordt. In zo'n geval is de stabiliteitscorrectie negatief. Daaruit volgt dat bij een stabiele atmosfeer de stabiliteitscorrectie positief is en de  $r_a$  groter wordt.

In afbeelding 3 wordt het verloop van de aërodynamische weerstand,  $r_a$ , ten opzichte van de windsnelheid voor drie vegetatie typen weergegeven.

## 2.5 Diskussie

Hier worden een aantal voor- en nadelen opgesomd van de besproken meetmethoden en rekenmethoden ter bepaling van de verdamping.

### Meetmethoden

Lysimeters	<ul style="list-style-type: none"> <li>-advectie gevoelig</li> <li>-verdamping is sluitterm van waterbalans, waarin een foutenmarge zit</li> <li>-eenvoudig konsept</li> <li>-verdamping is "meetbaar"</li> </ul>
Panverdamping	<ul style="list-style-type: none"> <li>-zeer veel verschillende uitvoeringen</li> <li>-zeer advectie gevoelig</li> <li>-waardeloos als referentie</li> </ul>



Waterbalans	<ul style="list-style-type: none"> <li>-degelijk basisprincipe</li> <li>-problemen ten aanzien van gebieds-representatieve waarnemingen</li> <li>-kwel/wegzijging moeilijk te bepalen</li> <li>-verdamping is sluitterm van waterbalans, waarin een foutenmarge zit</li> </ul>
Indikkingsmethode	<ul style="list-style-type: none"> <li>-grondwater mag alleen door regenwater gevoed worden</li> <li>-interceptie verwaarloosd</li> <li>-droge depositie vormt probleem</li> <li>-antropogene vervuilingen vormen probleem</li> </ul>
Bowen ratio	<ul style="list-style-type: none"> <li>-fysische basis is solide</li> <li>-stelt hoge eisen aan apparatuur</li> <li>-ongeschikt in heterogene, natte gebieden</li> </ul>
Eddy korrelatie	<ul style="list-style-type: none"> <li>-direkte meting van waterdamp fluktuaties</li> <li>-stelt hoge eisen aan apparatuur</li> </ul>

Rekenmethoden<sup>3</sup>

In het rapport van de Ad Hoc Groep Verdamping (1984) werd gesteld dat de invloed van de aërodynamische weerstand,  $r_a$ , op de verdamping relatief gering is. Echter, zoals eerder werd opgemerkt, worden korte vegetaties gekenmerkt door lage ruwheidslengtes en hoge aërodynamische weerstanden. Dit betekent dat de aërodynamische term (tweede term) uit de Penman-Monteith vergelijking zeer klein wordt. Hieruit volgt dat de verdamping bij korte vegetaties primair door de beschikbare energie (eerste term) wordt bepaald en niet door het dampdeficiet of aërodynamische processen. Men spreekt dan van evenwichtsverdamping:

$$\lambda E_{equi} = \frac{s(Q^* - G)}{s + \gamma} \tag{19}$$

Deze evenwichtsverdamping  $E_{equi}$  vertoont grote gelijkenis met de Makkink vergelijking (11). Geconkludeerd kan worden dat voor korte vegetaties de aanpak volgens Makkink een goede fysische grondslag heeft. Daarentegen is deze basis bij hoog opgaande vegetaties (bos) minder solide en verdient een aanpak met plantweerstandsmodellen vermoedelijk voorkeur.

---

<sup>3</sup> Janssen (1986) vergelijkt de Penman, gewasfactor methode en de Penman-Monteith methode. Hij berekent hiertoe met één dezelfde dataset de potentiële verdamping van een blauwgrasland en een loofbos met de twee genoemde methoden en de volgens de methode van Priestley en Taylor (1972), die hier verder niet aan de orde komt. De betrouwbaarheid van de resultaten van deze vergelijking hangt sterk af van de gebruikte gewasfactoren en weerstanden. Janssen (1986) gebruikt voor blauwgrasland een gewasfactor van 0.75, een gewasweerstand van  $65 \text{ sm}^{-1}$  en een aërodynamische weerstand van  $10 \text{ sm}^{-1}$ . Hij constateert dat zowel de dagtotalen als maantotalen volgens beide methoden goed overeenkomen.



### 3 VERDAMPING VAN HALF-NATUURLIJKE VEGETATIES

In dit hoofdstuk wordt voor vijf typen natuurterreinen (laagveenmoeras, kustduinen, half-natuurlijk grasland, heide en hoogveen) de verdamping besproken. Per type natuurterrein komen zowel de waarden van parameters als de belangrijkste verdampingskenmerken aan de orde. Iedere paragraaf eindigt met een overzicht van de literatuur in tabel-vorm.

#### 3.1 Verdamping van laagveenmoeras

Laagveenmoerasgebieden worden gekenmerkt door open water, moerassen en broekbossen. Laagveenmoerassen bestaan in Nederland vaak uit vegetaties met riet, lisdodden, biezen, zeggen, enz. Op sommige plaatsen kunnen, samenhangend met het gevoerde beheer, kraggehooilanden en trilvenen ontstaan. Moerasbossen worden buiten beschouwing gelaten.

##### algemeen

Bij laagveen vegetaties kan men er vanuit gaan dat het gewas gedurende vrijwel het gehele jaar voldoende van water wordt voorzien. Slechts na een lange periode van droogte zou de verdamping eventueel gereduceerd kunnen worden. Echter, in de meeste gevallen is de actuele verdamping gelijk aan de potentiële verdamping.

De indruk bestaat dat soorten van natte vegetatietypen pas laat hun stomata sluiten. Met andere woorden, ze zijn minder goed aangepast aan droge omstandigheden, en dus ook gevoeliger voor verdroging dan andere vegetatietypen. Dit verschijnsel wordt onder andere genoemd in Šmid (1975) en Janssen en Kemmers (1985). Deze konkluderen op grond van onderzoek naar de verdamping van de freatofyt<sup>4</sup> moerasspirea en de afreatofyt<sup>5</sup> gewoon knoopkruid dat beide plantensoorten onder natte omstandigheden kunnen voorkomen, maar dat de afreatofyt tijdens droogte al in een eerder stadium met de reductie van verdamping begint.

Bij de verschillende onderzoekers heerst consensus over het feit dat advectie de metingen nogal kan beïnvloeden. Vooral bij studies met verdampingspannen of lysimeters kan dit de resultaten ernstig verstoren. Advectie van droge lucht leidt tot een overschatting van de verdamping.

---

<sup>4</sup> freatofyt: een plant die aan de invloedssfeer van het grondwater is gebonden.

<sup>5</sup> afreatofyt: een plant die niet aan invloedssfeer van het grondwater is gebonden.

advektie

Laagveenmoerassen kunnen zowel uitgestrekte gebieden zijn als langwerpige linten langs een meer of een rivier. De verdamping van dergelijke gebieden kan nogal verschillen. Verdamping van planten aan randen wordt namelijk versterkt door wind met een lage luchtvochtigheid en een hoge temperatuur. Deze aanvoer van extra energie voor de verdamping wordt advektie genoemd. Advektie versterkt in het bijzonder de verdamping van een oase, zodat de gevolgen van advektie ook wel "het oase effect" wordt genoemd. De effecten van advektie zouden wel eens een belangrijke faktor kunnen zijn bij de verdamping van moerassen (Linacre, 1976). Dit geldt uiteraard in grote mate voor lintvormige moerassen langs meren of rivieren en in iets mindere mate voor uitgestrekte moerassen. In het laatste geval zal de advektie in de centrale delen een minder belangrijke rol spelen dan aan de randen.

Bij de interpretatie van resultaten van verdampingsstudies zal in bepaalde gevallen rekening moeten worden gehouden met de effecten van advektie.

Onderzoek naar verdamping van laagveen moerassen

Veel onderzoek is gedaan naar de verdamping van wetlands (laagveenmoerassen, rietvelden, boezemlanden en dergelijke natuurterreinen). De discussie concentreert zich rond de vraag of een wetland meer of minder verdampt dan open water. De vele onderzoeken op dit gebied komen tot zeer uiteenlopende uitkomsten. De uiteenlopende resultaten kunnen een gevolg zijn van verschillen in plantdichtheid en hoogte (Idso en Anderson, 1988; Snyder en Boyd, 1987), groeistadium (Eisenlohr, 1966) en vegetatiesamenstelling (Brezny et al., 1973; Bernatowicz et al., 1976; DeBusk et al., 1983; Ingram, 1983). Linacre (1970) en Koerselman en Beltman (1988) rapporteren daarentegen geen grote verdampfingsverschillen tussen verschillende vegetaties. Bovendien worden uiteenlopende meetmethoden gebruikt om de verdamping van een vegetatie te bepalen. Meetmethodes als Bowen ratio's en lysimeters worden het meest gebruikt. Ook de bepaling van de referentie verdamping (de open water verdamping  $E_0$ ) gebeurt op verschillende manieren. Methodes als panverdamping, Bowen ratio, verdamping uit een met water gevulde controle lysimeter en verdamping uit een meer berekend met een waterbalans worden gehanteerd.

Hieronder (tabel 3) volgt een korte opsomming van een aantal onderzoeken ingedeeld naar het criterium of een verdamping gerapporteerd wordt die groter of kleiner is dan de open water verdamping. Tevens wordt de meetmethode vermeld.

---

$E/E_0 > 1$  (Brezny et al. 1973, lysimeters; Van der Weert en Kamerlingh 1971, lysimeters; Bernatowicz et al. 1976, lysimeters; Ingram 1983; Snyder en Boyd 1987, lysimeters)

$E/E_0 < 1$  (Eisenlohr 1966, Bowen-ratio; Linacre 1970, Bowen-ratio; Koerselman en Beltman 1988, lysimeters; Van Wirdum 1991, lysimeters; Lafleur 1990, Bowen-ratio; Lafleur en Roulet 1992, bowen ratio; Price 1994, Bowen-ratio)

$E/E_0 > \text{en} < 1$  (Šmid 1975, Bowen-ratio; DeBusk et al., 1983, lysimeters; Dolan et al., 1984, grondwaterstands-fluctuaties; Anderson en Idso 1987, lysimeters)

---

Wat opvalt is het feit dat onderzoeken die een verdamping melden groter dan open water verdamping ( $E/E_0 > 1$ ) veelal verricht zijn met lysimeters. Dit zou te maken kunnen hebben met de advektieve invloeden waaraan lysimeters bloot staan. Onderzoeken verricht met de Bowen ratio meetmethode

worden daarentegen gekenmerkt door een verdamping kleiner dan de open water verdamping ( $E/E_o < 1$ ). Deze meetmethode wordt wellicht minder beïnvloed door advektie, mede omdat vaak veel aandacht wordt besteed aan de fetch<sup>6</sup>.

Deze denkwijze wordt bevestigd door de twee lysimeter onderzoeken die wèl een verdamping kleiner dan open water verdamping rapporteren ( $E/E_o < 1$ ). Deze twee (Nederlandse) onderzoeken van Koerselman en Beltman (1988) en Van Wirdum (1991) worden namelijk gekarakteriseerd door pogingen de effecten van advektie te onderdrukken. Zowel Koerselman en Beltman (1988) als Van Wirdum (1991) verzonken de lysimeters tussen de vegetatie in de bodem ter reductie van de advektie. Bovendien had Van Wirdum (1991) het voordeel dat de meetopstelling in het uitgestrekte laagveenmoeras "De Weerribben" was geplaatst. Uiteraard spelen advektieve invloeden hier een beperktere rol. Overigens zou het verschil in uitkomsten tussen lysimeters en Bowen ratio's ook kunnen liggen in het feit dat de vegetatie in lysimeters niet altijd representatief is. Men heeft vaak de neiging om "mooie" stukken vegetatie uit te zoeken, die doorgaans veel verdampen. Tenslotte kan in natte gebieden in de zomer warmte worden afvoerd via het open water, zodat minder energie beschikbaar is voor verdamping. Met lysimeters zal dit effect niet meegenomen worden, bij Bowen ratio-technieken wel.

Koerselman en Beltman (1988) voerden hun onderzoek uit tijdens het groeiseizoen op drie lokaties in trilvenen ten noorden van Utrecht. Zij konkludeerden dat de verschillen in verdamping tussen de sterk in structuur verschillende standplaatsen gering waren. Zij stelden op grond van verdampingsonderzoek aan drie moerasvegetaties een algemene regressievergelijking op voor "moerasvegetaties met een hoge waterstand en overeenkomstige klimatologische omstandigheden":

$$E = 0.73 E_o + 0.16 \quad (20)$$

Van Wirdum (1991) acht voor het trilveengebied de Weerribben een veel lagere gewasfactor van 0.6 van toepassing, met een variatie van 30%. Verschillen met de studie van Koerselman en Beltman (1988) zouden verklaard kunnen worden door de mindere vitaliteit van de vegetatie in de lysimeters van Van Wirdum (1991), de geringere invloed van advektie in de Weerribben en bovendien was de studie van Van Wirdum (1991) uitgevoerd gedurende het groeiseizoen van twee droge jaren: 1975 en 1976.

Wat betreft de discussie of een moerasvegetatie meer of minder verdampt dan open water, dient men zich te realiseren wat met open water wordt bedoeld. Zo berekent Price (1994) bij Lake Ontario in Canada de verdamping van een lisdodde moeras. De verhouding tussen de verdamping van de lisdodde en de verdamping van open water in hetzelfde moeras ( $E_{lis}/E_{o,moeras}$ ) bedroeg 0.97. Hij toont echter tevens aan dat de verhouding  $E/E_{o, Lake Ontario}$  tussen 3.7 en 12.5 ligt. Dit heeft te maken met de grote warmteberging in een diep meer als Lake Ontario<sup>7</sup>. Bernatowicz et al. (1976) toont vergelijkbare effecten aan in Polen. Zij meten dat de verdamping van een meer en van verdampingspannen die op het land geplaatst waren respectievelijk een factor 2.1 en 1.8 hoger ligt dan de verdamping van

<sup>6</sup> fetch = de afstand tot de rand van een gebied waarvan de verdampingseigenschappen vrijwel konstant zijn (ofwel: aanstrijk lengte).

<sup>7</sup> De verdamping uit een diep meer is minder dan de verdamping vanuit ondiep water. Dit is een gevolg van het feit dat bij een diep meer een groot aandeel van de binnenkomende stralingsenergie wordt besteed aan opwarming van het water, zodat een gering aandeel overblijft voor verdamping.

verdampingspannen in een rietveld. Het gebruik van verschillende referenties kan dus tot uiteenlopende resultaten leiden.

Overigens lijkt het, op grond van verschillende onderzoeken (Eisenlohr, 1966; Koerselman en Beltman, 1988; Lafleur, 1990; Van Wirdum, 1991) dat wanneer open water dichtgroeit met een vegetatiedek, de verdamping afneemt. Verschillen in vegetatie (fysieke en fysiologische) zijn volgens Lafleur (1990) van grote invloed op dit verschijnsel en verklaren wellicht ook de konflikerende resultaten in de literatuur. Zo komt Lafleur (1990) voor een droge en een natte zegge lokatie tot een andere relatie tussen  $E$  en  $E_o$  dan Koerselman en Beltman (1988):

$$E = 0.85 E_o + 0.18 \quad \text{nat (21)}$$

$$E = 0.62 E_o + 0.41 \quad \text{droog (22)}$$

Lafleur (1990) doet daarom de aanbeveling om te werken aan de ontwikkeling van "physically based evapotranspiration models which include climatological and plant factors". Hij konkludeert dat individuele case-studies, ook langjarige, het probleem niet oplossen.

#### konklusie

De interpretatie van de diverse onderzoeken naar verdamping van laagveenmoerassen is lastig door de uiteenlopende meetmethoden en meetresultaten. Bij de onderzoeken met lysimeters kunnen advectieve invloeden leiden tot een overschatting van de verdamping. Verdamping van grote en kleine percelen laagveen kunnen nogal verschillen als gevolg van randeffekten.

Het gebruik van een gewasfaktor van circa 0.8 voor korte laagveenmoeras-vegetaties (zegge) in het groeiseizoen in Nederland lijkt, gezien de geraadpleegde literatuur, redelijk. Of zo'n gewasfaktor, of eventueel formules 20,21 of 22, *algemeen* gebruikt kunnen worden bij de verdamping van elke moerasvegetatie, zoals Koerselman en Beltman (1988) beweren, lijkt onwaarschijnlijk.

Tabel 4: Literatuuroverzicht verdamping van laagveenmoerassen

auteurs	gewas faktor (*) / gewas weerstand	vegetatie	Meetmethode	
Linacre (1970)	$f=0.6$	Riet	Bowen ratio	Australië
Eisenlohr (1966)	$f \approx 0.9$		Bowen ratio	USA
Šmid (1975)	$f=0.88-1.86$	Riet	Bowen ratio/pan	Tjechosl.
Lafleur (1990)	$f=0.74$ $f=0.90$	Zegge (droge lokatie) Zegge (natte lokatie)	Bowen ratio	Canada
Lafleur en Roulet (1992)	$f=0.77$	Zegge	Bowen ratio	Canada
Price (1994)	$f=0.97$ $r_a=31 \text{ sm}^{-1}$ $r_c=74 \text{ sm}^{-1}$	Lisdodde	Bowen ratio	Canada
Koerselman & Beltman (1988)	$f=0.81$ $f=0.74$ $f=0.76$	Ronde Zegge Moeraszegge, Veenmos Lisdodde	lysimeters	Nederland
Van Wirdum (1991)	$f=0.67$ $f=0.45$ $f=0.55$ $f=0.56$ $f=0.47$	Veenmos Polytrichum (mos) Galigaan Scorpidium (mos) Riet	lysimeters	Nederland
Brezny et al. (1973)	$f=1.4$	Water Hyacint (**)	lysimeter & pan	India
Bernatowicz et al. (1976)	$f=1.7-4.0$	Riet, Lisdodde, Mattenbies	lysimeter & pan	Polen
DeBusk et al. (1983)	$f=0.9$ $f=1.7$	Klein Kroos Water Hyacint <sup>1</sup>	lysimeter & pan	USA
Dolan et al. (1984)	$f=0.32-0.71$ (gem. 0.5)	Pijlkruid, Moerashyacint	g'waterfluctuaties lysimeter & pan	USA
Anderson & Idso (1987)	$f=0.87$ $f=1.40$	Water Hyacint <sup>1</sup> (kort) Water Hyacint <sup>1</sup> (lang)	lysimeter & pan	USA
Snyder & Boyd (1987)	$f=1.31-2.52$ gem. (1.75) $f=1.05-2.50$ gem. (1.62)	Water Hyacint <sup>1</sup> Lisdodde	lysimeter & pan	USA

(\*) De gewasfaktor  $f$  is steeds genomen t.o.v. open water verdamping. Indien in de kolom meetmethoden "pan" vermeld staat is de open water verdamping direkt gemeten, anders is deze berekend met Penman(achtige) formules.

(\*\*) Water Hyacint (*Eichhornia crassipes*) komt in West-Europa niet voor. Geen Nederlandse naam is voorhanden, zodat de Amerikaanse benaming is aangehouden.

### 3.2 Verdamping van kustduinen

De kustduinen vormen een langgerekt en grotendeels aaneengesloten zandgebied, dat wordt gekenmerkt door reliëf en een kustklimaat. In de duingebieden komen diverse vegetatietypen voor. Droge pioniermilieus leggen het stuivende zand vast. Karakteristieke soorten zijn, langs de kust, helm en biestarwegras, met meer landinwaarts, zandzegge, buntgras en het duinsterretjesmos. Bij afnemende over- of uitstuiving ontwikkelt zich een duingrasland of een duinstruweel (duindoorn, liguster). In kalkarme duinen kan ook droge duinheide tot ontwikkeling komen. Indien uitstuiving plaatsvindt tot aan het grondwater ontstaan natte duinvalleien. Duinbossen worden buiten beschouwing gelaten.

De verdamping in kustduinen zal in grote delen en gedurende lange perioden beperkt worden door bodemvochttekorten. Slechts in natte duinvalleien zullen veel minder vaak bodemvochttekorten optreden. Hierom wordt in dit overzicht onderscheid gemaakt tussen droge duinen en natte duinvalleien. Omdat bovendien de verdamping van kaal duinzand andere karakteristieken heeft dan verdamping van vegetatie wordt ook de verdamping van kaal duinzand apart besproken.

#### klimaat

Een belangrijke faktor die de verdamping van kustduinen beïnvloed is het klimaat. Het klimaat van de Nederlandse kustduinen wijkt enigszins af van het klimaat in de rest van Nederland. Enkele klimaatfactoren bereiken juist in het kustgebied hun maximum (tabel 5), zoals relatieve luchtvochtigheid, windsnelheid en aantal uren zonschijn.

klimaat faktor	Zeeuws Vlndrn t/m Goeree	Voorne tot Camperduin	Petten Schierm.	De Bilt
gem. wind (m/s)	6.1	6.0	6.5	4
rel luchtvtcht(*)	69	68	73	63
Eo (mm)	760	750	780	690
Abs luchtvtcht	14.9	14.7	14.7	14.7
gem. temperatuur	10	9.5	9	9.5
Neerslag (mm)	675-725	725-800	700-740	750

(\*) gemiddelde waarde om 14.00 uur gedurende juni, juli en augustus, wanneer de relatieve luchtvochtigheid het kleinst is en de absolute luchtvochtigheid het grootst.

#### Onderzoek naar verdamping van kustduinen

Slechts weinig onderzoek naar verdamping van kustduinen is voorhanden. De meeste gegevens stammen af van enkele lysimeter opstellingen in Nederland. Het belangrijkste onderzoek is een langjarige opstelling van een viertal lysimeters in Castricum. Twee hiervan zijn begroeid met bos, één met duindoorn en één is kaal. Verscheidene auteurs hebben over deze lysimeters gerapporteerd (bijvoorbeeld: Wind, 1960; Rijtema, 1968; Ter Hoeve, 1978; Dolman en Oosterbaan, 1986)



*Kaal duinzand*

De gemiddelde jaarsom van de verdamping van de Castricumse lysimeter met kaal duinzand bedraagt ruim 200 mm (Wind, 1960; Rijtema, 1968; Ter Hoeve, 1978). Uitgaande van een  $E_o$  van 750 mm (Bakker et al., 1979) kan men een verhouding  $E_{akt}/E_o$  van circa 0.3 uitrekenen.

Rijtema (1968) komt echter op grond van dezelfde gegevens tot een hogere waarde. Hij geeft de volgende vergelijking voor de verdamping vanaf **nat** kaal duinzand:

$$E_{pot} = 0.68 * E_o + 0.27 \quad (23)$$

Het verschil zit hem wellicht in het feit dat Rijtema (1968) uit gaat van nat duinzand (en dus van  $E_{pot}$ ), terwijl in de bewerking die leidt tot lagere factoren uitgegaan is van de aktuele verdamping  $E_{akt}$ . De verdamping van kaal duinzand zal zich echter niet lang op potentieel nivo kunnen handhaven indien niet regelmatig neerslag valt. Uitdroging van de toplaag leidt tot een sterke afname van de doorlatendheid in deze laag, zodat toevoer van water naar het oppervlak stagneert. Hierdoor blijft tijdens uitdroging de aktuele verdamping,  $E_{akt}$ , ver achter bij de potentiële,  $E_{pot}$ . Ritchie (1972) beschrijft de bodemverdamping na regen in twee fasen. Fase één, met een konstante bodem-verdamping, wordt gevolgd door fase twee, waarbij als gevolg van uitdroging, de bodemverdamping afneemt volgens de wortel van de tijd:

$$\sum E_s = \alpha \sqrt{t} \quad (24)$$

$\alpha$  = faktor die afhangt van bodemfysische eigenschappen (mm dag<sup>-1/2</sup>)  
 t = tijd (dag)

Indien de bovenlaag van het duinzand uitgedroogd is, neemt de verdamping af tot vrijwel nul. Alle binnenkomende stralingsenergie wordt dan gebruikt om de lucht en het duinzand op te warmen zodat de temperatuur hoog kan oplopen.

*Droge duinvegetatie*

De vegetatie in droge duinen (duindoorn, duingrasland) is veelal in staat de verdamping te reguleren. Daartoe heeft bijvoorbeeld duindoorn licht viltige bladeren, die het waterverlies uit het blad beperken. Andere soorten zoals het muizenootje rollen onder droge omstandigheden hun bladeren op, waardoor het vochtverlies vermindert (Ovaa, 1990).

Bakker et al. (1979) komen voor een droge duinvegetatie tot een verhouding  $E_{akt}/E_o$  van circa 0.45, terwijl Janssen (1986) 0.75 aanhoudt. Beide geven echter verder geen referenties op. Rijtema (1968) rapporteert voor de Castricumse lysimeters met duindoorn een verdamping van 461 mm. Opnieuw uitgaande van een  $E_o$  van 750 mm, leidt dit tot een verhouding  $E_{akt}/E_o$  van circa 0.65. Ter Hoeve (1978) leidt verhouding van 0.6 tot 0.7 af. Meinardi (1994) schat met behulp van Tritium bepalingen de verdamping van een "natuurlijke duinvegetatie" op 500 mm per jaar ( $E_{akt}/E_o \approx 0.7$ ).

*Natte/vochtige duinvalleien*

Men spreekt pas van een vochtige duinvallei indien de grondwaterstand in de zomer niet dieper dan 1-1.5 m wegzakt. In natte duinvalleien zakt het grondwater niet dieper dan 75 cm (Bakker et al., 1979).

Alleen Bakker et al. (1979) vermeldt expliciet de verdamping van vochtige duinvalleien van 500-600 mm per jaar. Bij potentiële omstandigheden leidt dit tot een gewasfaktor van circa 0.75. In de zomer kan de verdamping van natte en vochtige duinvalleien oplopen door aanvoer van warme en droge lucht. Deze lucht die opgewarmd is boven het droge duinzand, kan in vochtige gebieden de verdamping opvoeren.

In duinvalleien waar zich een gesloten moerasvegetatie (biezen) heeft ontwikkeld kan de gewasfaktor van laagveenmoerassen worden aangehouden.

konklusie

Slechts weinig onderzoek naar de verdamping van duingebieden is voorhanden. Vanwege droge omstandigheden zal de verdamping meestal door vochttekorten gereduceerd worden. Wind en lokale advectie (bij natte duinvalleien) spelen wellicht een belangrijke rol.

Voor kaal duinzand wordt een verhouding  $E_{akt}/E_o$  van circa 0.3 gevonden. Onder potentiële verdampingsomstandigheden lijkt een gewasfaktor van circa 0.7 van toepassing (of eventueel formule (23)). De meest gevonden verhouding  $E_{akt}/E_o$  bij droge duinvegetaties is in de orde van 0.6-0.7. Bij natte/vochtige duinvalleien ligt dit getal iets hoger; 0.7-0.8.

Tabel 6: Literatuuroverzicht verdamping van kustduinen

auteur	verdamping		vegetatie	Meetmethode
Wind (1960)	$E_{akt} = 206 \text{ mm}$	$E_{akt}/E_o \approx 0.3$ (*)	kaal duinzand	lysimeter (Castricum)
Wind (1960)	$E_{akt} = 269 \text{ mm}$	$E_{akt}/E_o \approx 0.35$ (*)	duinzand met schraal gras	lysimeter (Leiduin)
Rijtema (1968)	$E_{akt} = 213 \text{ mm}$	$E_{akt}/E_o \approx 0.3$ (*)	kaal duinzand	lysimeter (Castricum)
	$E_{akt} = 481 \text{ mm}$	$E_{akt}/E_o \approx 0.65$ (*)	duindoorn	
Ter Hoeve (1978)		$f \approx 0.3$ (****)	kaal duinzand	lysimeter (Castricum)
		$f = 0.6-0.7$ (****)	duindoorn	
Bakker et al. (1979)	$E_{akt} = 150-200 \text{ mm}$	$E_{akt}/E_o \approx 0.25$ (*)	onbegroeide duinen	literatuur (***)
	$E_{akt} = 300-400 \text{ mm}$	$E_{akt}/E_o \approx 0.45$ (*)	droge duinvegetatie	
	$E_{akt} = 500-600 \text{ mm}$	$E_{akt}/E_o \approx 0.75$ (*)	natte duinvallei	
	$E_o = 750 \text{ mm}$			
Janssen (1986)		$f = 0.3$	kale grond	bewerking van literatuur
		$f = 0.75$	duinvegetatie	
Dolman & Moors (1994)	15-30% (**)		kaal duinzand	lysimeter (Castricum) 1942-1990
	40-75% (**)		duindoorn	
Meinardi (1994)	$E_{akt} = 500 \text{ mm}$	$E_{akt}/E_o \approx 0.65$ (*)	duinvegetatie	Tritium bepaling

(\*) uitgegaan is van een  $E_o$  van 750 mm (Bakker et al., 1979)

(\*\*) percentage van jaarlijkse neerslag

(\*\*\*) aangetroffen zonder verdere verwijzing.

(\*\*\*\*)  $f$  gedefinieerd als: (neerslag-neerslagoverschot) gedeeld door  $E_o$

### 3.3 Verdamping van (half-)natuurlijk grasland

Graslanden zijn vegetaties waarin meerjarige grassoorten domineren. Graslanden kunnen op zowel natte en droge als op voedselrijke en voedselarme gronden voorkomen. Afgezien van kwelders, zijn graslanden in Nederland altijd een gevolg van menselijk beheer. Daarbij kan onderscheid gemaakt worden tussen cultuurgrasland en half-natuurlijk grasland. Cultuurgrasland is een homogeen, bemest grasland met een agrarische functie waarin raaigras domineert. Bij half-natuurlijke graslanden is het beheer minder intensief. Verschillende typen kunnen onderscheiden worden: blauwgrasland (vochtig, voedselarm); glanshaverhooiland, zilverschoonverbond (vochtig, voedselrijk); zandblauwtjesorde, kalkgrasland (droog, voedselarm); glanshaverhooiland, kamgrasweide (droog voedselrijk); Kwelders (zout)

Slechts weinig onderzoek is gedaan naar de verdamping van natuurlijk grasland. De verdamping van cultuurgrasland is wel uitgebreid onderzocht. Stricker (1981) berekent voor een grasland in het stroomgebied van de Hupselse Beek een gewasfactor van 0.75. De Werkcommissie verdampingsonderzoek (1984) komt voor kort gras in het zomer halfjaar tot een gewasfactor van 0.65 - 0.76. De Project- en begeleidingsgroep verdampingsberekeningen (1988) houdt voor gras een gewasfactor van 0.8 aan. Men geeft ook een relatie tussen grashoogte, seizoen en gewasfactor.

**Tabel 7:** Gewasfactoren van gras bij verschillende gewashoogten

gewas- lengte:	5-15 cm	15-25 cm	> 25 cm
april	0.8 (1.0)	0.85 (1.1)	0.9 (1.2)
mei	0.8 (1.0)	0.85 (1.1)	0.9 (1.2)
juni	0.8 (1.0)	0.85 (1.1)	0.9 (1.2)
juli	0.8 (1.0)	0.85 (1.1)	0.9 (1.1)
aug	0.8 (1.0)	0.85 (1.0)	0.9 (1.1)
sept	0.8 (1.0)	0.85 (1.0)	0.95 (1.1)

(gewasfactoren t.o.v. Penman open water met tussen haakjes  
gewasfactoren t.o.v. Makkink.)

De gewasfactor neemt hierbij toe met de lengte van het gras (tabel 7). In het rapport van de Ad Hoc Groep Verdamping (1984) wordt voor gras een basisweerstand  $r_b$  van  $65 \text{ sm}^{-1}$  voorgesteld en een maximale weerstand  $r_m$  van  $500 \text{ sm}^{-1}$ . Deze getallen zijn slechts een indicatie voor de verdamping van een natuurlijke grasland-vegetatie. Immers, de structuur en samenstelling van een half-natuurlijk grasland en van cultuurgrasland verschilt aanzienlijk.

Janssen (1994) bepaalt, met behulp van lysimeters, gewasfactoren van schraalgrasland, pijpestrootje<sup>8</sup> en dopheide<sup>9</sup> op zandgrond gedurende twee groeiseizoenen. In het eerste groeiseizoen (1991) is de

<sup>8</sup> Een pijpestrootje vegetatie op zandgrond wordt ingedeeld bij de half-natuurlijke graslanden, terwijl pijpestrootje in hoogveengebieden bij hoogveen aan de orde komt.

<sup>9</sup> Komt aan de orde bij natte heide.

potentiële verdamping gemeten, waarbij de grondwaterstand 30 cm onder maaiveld werd gehouden terwijl in het tweede groeiseizoen (1992) de metingen erop gericht waren om de verdamping onder natte omstandigheden te bepalen (grondwaterstand aan maaiveld). De berekende gewasfactoren (zie tabel 8) waren in het begin van het eerste seizoen lager dan de waarden in tabel 7, maar vanaf juli voldoet het schema van tabel 7. In 1991 verdampte het schraalgrasland in het groeiseizoen 395 mm (pijpestrootje: 413 mm), het jaar erna verdampte hetzelfde gewas onder natte omstandigheden 581 mm (pijpestrootje: 678 mm). Volgens Janssen (1994) is dit alleen te verklaren uit een toename van de bodemevaporatie, aangezien de interceptie hetzelfde zal zijn gebleven en de transpiratie hooguit even groot kan zijn. Men kan deze toename echter ook verklaren uit de vitaliteit van de vegetatie of het neerslagpatroon. De in deze studie afgeleide gewasfactoren staan in tabel 8.

**Tabel 8:** Gewasfactoren van een schraalgrasland en van pijpestrootje (Janssen, 1994)

mnd	Schraalgrasland		Pijpestrootje	
	f 1991 pot	f 1992 nat	f 1991 pot	f 1992 nat
april	0.5 (0.7)	0.6 (0.8)	0.6 (0.8)	0.7 (0.9)
mei	0.6 (0.8)	0.7 (0.9)	0.6 (0.8)	0.7 (0.9)
juni	0.7 (0.9)	0.8 (1.0)	0.6 (0.8)	0.8 (1.0)
juli	0.8 (1.0)	0.9 (1.2)	0.9 (1.1)	1.0 (1.3)
aug	0.9 (1.1)	1.1 (1.3)	1.0 (1.2)	1.2 (1.4)
sep	0.8 (1.0)	1.0 (1.2)	1.0 (1.2)	1.2 (1.4)
totaal	0.7 (0.9)	0.9 (1.1)	0.8 (1.0)	1.0 (1.2)

(gewasfactoren t.o.v. Penman open water met tussen haakjes gewasfactoren t.o.v. Makkink.)

Volgens Janssen (1994) had het knippen van het schraalgrasland geen invloed op de verdamping, zodat het gebruik van graslengte voor de bepaling van een gewasfactor volgens tabel 7 hier niet op zou gaan.

De verdamping die door Pribáň en Ondok (1980, 1986) wordt gerapporteerd voor een nat grasland met zegges in Tjechië bedraagt ongeveer<sup>10</sup> 3 mmdag<sup>-1</sup>, een waarde die vergelijkbaar is met de door Janssen (1994) berekende verdamping van schraalgrasland onder natte omstandigheden (3.4 mmdag<sup>-1</sup>). Pribáň en Ondok (1986) meten in een nat grasland een aërodynamische weerstand  $r_a$  van 20 sm<sup>-1</sup>. Ripley en Redmann (1976) komen in prairie grasland in Canada tot een  $r_a$  van 40 tot 50 sm<sup>-1</sup>.

<sup>10</sup>

zie tabel 9

De VUA, vakgroepen hydrologie en meteorologie, is begin 1994 gestart met flux-metingen boven een egale pijpestrootje vegetatie op de Veluwe. Onder andere met behulp van Bowen ratio's zal getracht worden verdampingsparameters (gewasweerstand, gewasfaktor) vast te stellen.

### konklusie

Slechts weinig onderzoek naar de verdamping van half natuurlijke graslanden is verricht, zodat eigenlijk geen goede konklusies ten aanzien van verdampings-parameters gedaan kunnen worden.

Op grond van het onderzoek van Janssen (1994) zou men voorzichtig kunnen konkluderen dat de verdamping van half-natuurlijke graslanden in het begin van het groeiseizoen wellicht achter blijft bij de verdamping van cultuurgras. Of de faktor graslengte, zoals aangegeven in tabel 7, van betekenis is, is niet duidelijk.

**Tabel 9:** Literatuuroverzicht verdamping van (half) – natuurlijk grasland

auteurs	gewasfaktor, gewaswrsnd, verdamping	vegetatie	meetmethode	
Ripley en Redman (1976)	$r_s = 100-600 \text{ sm}^{-1}$ $r_a = 40-50 \text{ sm}^{-1}$	prairie grasland	Bowen-ratio	Saskatchewan, Canada
Plübbel en Ondok (1980)	gem. $2.6 \text{ mmdag}^{-1}$ gem. $3.6 \text{ mmdag}^{-1}$	nat grasland met zegge	Bowen-ratio lysimeter	Tjechië (april-nov)
Janssen en Kemmers (1985)	$r_{\text{blad}} = 700 \text{ sm}^{-1}$ $r_{\text{blad}} = 1200-1400 \text{ sm}^{-1}$  $r_{\text{blad}} = 450 \text{ sm}^{-1}$ $r_{\text{blad}} = 1050 \text{ sm}^{-1}$	moerasspirea (bij verwelking)  gewoon knoopruid (bij verwelking)	porometer en lysimeter	klimaatkas in Nederland
Janssen (1986)	$f = 0.5$ $f$ tot $0.75$  $f = 0.75$ $f = 0.65$  $f = 0.8$ $f = 0.7$	pijpestrootje idem, met opslag  schraalgrasland idem, kort  rijk grasland idem, kort	bewerking van literatuur	Nederland
Plübbel en Ondok (1986)	gem. $3.5 \text{ mmdag}^{-1}$ $r_a \approx 20 \text{ sm}^{-1}$  gem. $3.0 \text{ mmdag}^{-1}$ $r_a = 30-50 \text{ sm}^{-1}$	nat grasland met zegge  Wilgenmoerasstruweel	Bowen-ratio	Tjechië (juli-sep)
Janssen (1994)	$f = 0.5-0.9$ (gem $0.7$ )  $f = 0.6-1.0$ (gem $0.8$ )	Schraalgrasland  Pijpestrootje	lysimeter  lysimeter	Nederland (april-okt)

### 3.4 Verdamping van heide

Voor de bepaling van de verdamping van heide kan een onderscheid gemaakt worden tussen vochtige en droge heide. Het hydrologisch verschil tussen beide typen bestaat uit het gegeven dat een droge heide wat betreft de watervoorziening afhankelijk is van hangwater en bodemvocht. Vochtige typen daarentegen, onttrekken hun water aan het grondwater, eventueel gebruik makend van de kapillaire werking van de grond. Een begroeiingstype van droge heide wordt vaak gedomineerd door struikheide, met in de vergraste delen vooral bochtige smele. Vochtige heide daarentegen, bestaat uit dopheide, met plaatselijk struikheide, pijpestrootje, zegge, russen en biezen.

Te verwachten valt dat vochtige heide gedurende grote delen van het jaar potentieel verdampt, terwijl de verdamping van droge heide wellicht in de zomer als gevolg van een laag bodemvochtgehalte gereduceerd wordt.

#### droge heide

Wat betreft de verdamping van droge heide, zijn twee belangrijke experimenten uitgevoerd op heideterreinen in Yorkshire (Wallace et al., 1982) en in Schotland (Miranda et al., 1986). Op beide lokaties werd de vegetatie gedomineerd door struikheide.

Volgens Wallace (1982) is de potentiële verdamping van heide groter dan van gras. Dit is een gevolg van het feit dat de albedo van heide (0.13) kleiner is dan de albedo van gras (0.25), zodat bij heide meer energie beschikbaar is. Op droge dagen was de actuele verdamping altijd lager dan de potentiële, terwijl op dagen met regen de actuele verdamping de potentiële verdamping meestal overtrof, als gevolg van interceptie. Wallace (1982): "In these respects heather behaves more like forest than grasland". De transpiratie van gras is veelal hoger dan van heide, dit wordt echter gekompenseerd door de grotere interceptie in heideterrein. Volgens Wallace (1982) verschillen de waarden voor de totale verdamping van heide en grasland niet significant. Over de hele meetperiode was de verhouding  $E_{akt}/E_{pot}^{11}$  0.87. Miranda et al. (1986) komen tot vergelijkbare conclusies. Na bepaling van de relatieve contributie van de -evenwichtsverdamping ( $E_{equi}$ , formule (19)) en de -verdamping als gevolg van dampdeficieten ( $E_{imp}$ , tweede term Penman formule) aan de totale verdamping<sup>12</sup>, wordt gekonkludeerd dat de verdamping van de heide-lokatie goed gekoppeld was aan de tweede term van de Penman formule. Miranda et al. (1986) konkluderen tevens dat de bulk stomatale weerstand van bos en heide dezelfde orde van grootte hebben (grootte  $100 \text{ sm}^{-1}$ ).

<sup>11</sup> Volgens de auteurs is  $E_{pot}$  bepaald door een weerstation, maar het is niet geheel duidelijk wat de auteurs precies met  $E_{pot}$  bedoelen. Het vermoeden is dat men Penman's  $E_o$  bedoeld.

<sup>12</sup> McNaughton en Jarvis (1983) schreven de Penman-Monteith vergelijking als volgt:  $\lambda E = \Omega \lambda E_{eq} + (1 - \Omega) \lambda E_{imp}$ . Bij kleine  $\Omega$  wordt de verdamping voornamelijk bepaald door  $r_{as}$ , bij grote  $\Omega$  door de evenwichtsverdamping. Miranda et al (1984) komen voor heide tot een gemiddelde  $\Omega$  van 0.39. Ter vergelijking; voor bos geldt  $\Omega$  0.15 en voor gras  $\Omega$  0.8.

De verdamping van bossen is echter toch groter als gevolg van een hogere  $r_a$  van heide (12-32  $\text{sm}^{-1}$ ) dan van bos (3-10  $\text{sm}^{-1}$ ).

In Nederland is het onderzoek naar verdamping van droge heide terreinen nog niet goed op gang gekomen. Zowel Bakker (1984) als Janssen (1986) noemen in literatuur-overzichten een gewasfactor van 0.6. Volgens Janssen (1986) kan opslag op een heideterrein leiden tot verhoging van de gewasfactor tot 0.75. Hij licht dit echter niet toe. Duyzer en Bosveld (1988) doen meteorologische metingen aan een heideveld in Brabant (Leende). Zij berekenen relatief hoge oppervlakte-weerstanden. Hun verklaring hiervoor is dat de laag dood gras kennelijk effectief was in het tegengaan van de bodem-verdamping. Daarnaast schat Meinardi (1994) met behulp van indikkingsmethoden de verhouding  $E_{akt}/E_o$  van heidevelden op de Veluwe. De grote spreiding van zijn resultaten (zie tabel 12) wijt Meinardi (1994) aan het feit dat uiteenlopende terreinen onder de noemer heideveld zijn gebracht.

#### natte heide

In Nederland zijn twee experimentele lysimeter onderzoeken naar verdamping van natte heide verricht (Eggink en Vink, 1989; Janssen, 1994).

**Tabel 10:** Gewasfactoren van struikheide

maand	gewasfactor
mei	0.6-0.7 (0.8-0.9)
juni	0.7-0.8 (0.9-1.1)
juli	0.9 (1.1)
aug	0.9-0.8 (1.1-1.0)
sept	0.8-0.7 (1.0-0.8)

(gewasfactoren t.o.v. Penman open water met tussen haakjes gewasfactoren t.o.v. Makkink.)

Eggink en Vink (1989) doen met behulp van lysimeters een onderzoek naar de verdamping van struikheide in het hoogveenrestant Engbertdijksvennen. Gekoncludeerd wordt dat de verdamping van struikheide samenhangt met de LAI. Reduktie van de verdamping door bodemvocht-tekorten deed zich niet voor. Het verloop van de gewasfactor voor struikheide in de lysimeters gedurende het seizoen staat in tabel 10. Vertaling van deze gegevens naar veldsituatie was niet mogelijk, vanwege het ontbreken van LAI gegevens in het veld. Volgens Eggink en Vink (1989) was de LAI van de struikheide in veldsituatie lager dan van struikheide in de lysimeters, zodat aangenomen kan worden dat de werkelijke gewasfactoren van struikheide lager liggen dan de waarden in tabel 10.



**Tabel 11:** Gewasfactoren van dopheide (Janssen, 1994)

mnd	dopheide	
	f 1991 pot	f 1992 nat
april	0.5 (0.6)	0.6 (0.8)
mei	0.5 (0.7)	0.7 (0.9)
juni	0.6 (0.8)	0.7 (0.9)
juli	0.6 (0.8)	0.7 (0.9)
aug	0.6 (0.7)	0.75 (0.9)
sep	0.6 (0.7)	0.75 (0.9)
totaal	0.6 (0.7)	0.7 (0.9)

(gewasfactoren t.o.v. Penman open water met tussen haakjes  
gewasfactoren t.o.v. Makkink.)

In een reeds onder natuurlijke graslanden beschreven experiment, onderzoekt Janssen (1994) de verdamping van onder andere dopheide. Onder potentiële omstandigheden verdampte dopheide in het groeiseizoen 308 mm, onder zeer natte omstandigheden 345 mm. De resultaten, uitgedrukt in gewasfactoren, staan in tabel 11.

Verder rapporteert Bakker (1984) voor natte heide in het Dwingelerveld een verdamping van 500 mm (winter 175 mm, zomer 325 mm). Met een  $E_0$  van 670 mm kan een gewasfactor van 0.75 afgeleid worden. Janssen (1986) komt voor dopheide met opslag tot dezelfde waarde, maar houdt voor dopheide zelf 0.6 aan. Streefkerk en Casparie (1987) geven voor de verdamping van natte heide 520 mm (winter 125 mm, zomer 395 mm) op.

### konklusie

Ten aanzien van de heideterreinen is opnieuw slechts een beperkte hoeveelheid onderzoek verricht. Op grond van het Britse onderzoek lijkt het dat heide wat betreft verdampings-eigenschappen tussen bos en gras in ligt. Hierdoor lijkt gebruik van Penman-Monteith bij heide een goede optie. Bij een dergelijke benadering ligt het gebruik van een  $r_a$  van circa  $100 \text{ sm}^{-1}$  en een  $r_c$  van circa  $20 \text{ sm}^{-1}$  in de rede.

De kwaliteit van het Nederlandse onderzoek naar de verdamping van heide is twijfelachtig. Voor zowel droge heide als natte heide wordt vaak een gewasfactor in de orde van 0.6 tot 0.7 gevonden. De consequenties van verschijnselen als vergrassing, opslag, dichtheid van heide, ondergroei, bodemvochttekorten, enz. voor de verdamping zijn echter onzeker.

Tabel 12: Literatuuroverzicht verdamping van heide

auteurs	gewasfactor, gewas- wrstnd, verdamping	vegetatie	meetmethode	
Wallace et al. (1982)	$r_a = 10 - 25 \text{ sm}^{-1}$ $r_c = 65 - 125 \text{ sm}^{-1}$	struikheide	lysimeter, bodem- vocht, porometer	Engeland, Yorkshire
Bakker (1984)	$f \approx 0.6$ $E_{akt}/E_o \approx 0.75$	droge heide natte heide	(*) ?	(**) Dwingelerveld
Miranda et al. (1984)	$r_a = 12 - 32 \text{ sm}^{-1}$ (gem. $20 \text{ sm}^{-1}$ ) $r_c = 50 - 290 \text{ sm}^{-1}$ (gem. $110 \text{ sm}^{-1}$ )	struikheide	Bowen-ratio	Zuid Schotland
Janssen (1986)	$f = 0.6$ $f$ tot $0.75$  $f = 0.6$ $f$ tot $0.75$	struikheide idem, met opslag  dopheide idem, met opslag	bewerking van literatuur	Nederland
Streefkerk en Casparie (1987)	zomer: 395 mm winter: 125 mm jaar: 520 mm	heide (in hoogveen)	(***)	Duitsland
Duyzer en Bosveld (1988)	$r_s = 250-400 \text{ sm}^{-1}$ gem. $350 \text{ sm}^{-1}$  $r_s = 100-400 \text{ sm}^{-1}$ gem. $300 \text{ sm}^{-1}$	heide (in hoogveen restant)  heide (droog)	Bowen-ratio	Fochtelooverveen (mei - juni)  Leende (april)
Eggink en Vink (1989)	$f = 0.6 - 0.9$	struikheide (nat)	lysimeter	Engbertdijkvenen
Janssen (1994)	$f \approx 0.6$	dopheide	lysimeter	
Meinardi (1994)	$E_{akt}/E_o = 0.54 - 0.91$ gem. $0.76$	droge heide	indikkingsmethode	Veluwe

(\*) methode beschreven in par. 2.4.1.4.

(\*\*) op basis van literatuur van Friedrich (1950); Makkink (1962); Meinardi (1976).

(\*\*\*) op basis van literatuur van Eggelsmann (1981) en anderen.

### 3.5 Verdamping van hoogveen

In Nederland is het areaal met ongestoord hoogveen zeer beperkt. Vrijwel alle overgebleven hoogvenen zijn aangetast door afgraving en ontwatering. De begroeiing van intact hoogveen bestaat uit een vrijwel gesloten tapijt van veenmos, waarop dwergstruikjes als dopheide en struikheide kunnen groeien. In afgetakelde, verdroogde hoogvenen ontbreekt de veenmoslaag grotendeels; de vegetatie wordt dan gedomineerd door pijpestrootje, eenarig wollegras en heide.

#### reduktie van verdamping

In de literatuur over de verdamping van hoogveen wordt gediscussieerd over de vraag bij welke grondwaterstand de verdamping wordt gereduceerd. Met andere woorden; bij welke grondwaterstand is

de verdamping van hoogveen niet meer potentieel? Daarbij is van belang of de vegetatie vasculair<sup>13</sup> of niet-vasculair<sup>14</sup> is (Ingram 1983). Bij een niet-vasculaire vegetatie zoals veenmos moet het water door middel van kapillaire werking aangevoerd worden, terwijl vasculaire planten door middel van wortels en vaatbundels het water actief kunnen aanvoeren. Uiteraard spelen de bodemfysische eigenschappen van het veen een belangrijke rol bij de beschikbaarheid van water voor planten.

Uit studies blijkt dat vasculaire vegetaties in hoogveengebieden vrijwel konstant op potentieel nivo verdampen, terwijl de verdamping van de niet-vasculaire veenmossen sterk terugloopt bij dalende grondwaterstanden (Virta, 1966; Romanov, 1968; Schouwenaars, 1990, 1993; Price, 1991; Lafleur en Roulet, 1992).

Onder andere Schouwenaars (1990, 1993) merkte dit verschijnsel op in een lysimeter studie naar de verdamping van veenmos en pijpestrootje in een hoogveenrestant. De actuele verdamping van pijpestrootje bleef gelijk aan de potentiële verdamping, indien de droge periode niet langer dan een maand aanhield. Echter de actuele verdamping van veenmos bleef sterk achter bij de potentiële waarden zodra de grondwaterstand daalde. Kritisch nivo was daarbij 10-15 cm beneden maaiveld. De verdamping van pijpestrootje in hoogveengebieden is in droge perioden dus aanzienlijk groter dan die van veenmos. Dit leidt tot diepe grondwaterstanden. Bij een veenmosdek wordt de verdamping gereduceerd bij een dalende grondwaterstand.

Price (1991) meldt dat bij hoge grondwaterstand de gewasweerstand,  $r_s$ , nul nadert, terwijl  $r_s$  zeer snel toeneemt indien het veenmosoppervlak uitdroogt en de kapillaire nalevering stagneert.

Lafleur en Roulet (1992) rapporteren dat bij een veenmos-bedekking de kapillaire nalevering over een afstand van 3 cm al onvoldoende was "to satisfy the evaporative demand". Virta (1966) meldt een afname van de verdamping bij grondwaterstanden dieper dan 10 cm beneden maaiveld. Bij Romanov (1968) treedt dit pas op bij een grondwaterstand van 30 cm.

Daarentegen stelt Ingram (1983) dat de actuele en de potentiële verdamping van hoogveen ongeveer gelijk zijn, terwijl Ingram (1983) eerder het effect van het type plant, vasculair of niet vasculair, op de verdamping onderkende. Dit lijkt enigszins in tegenspraak met elkaar. Ook Nichols en Brown (1980) komen tot afwijkende resultaten. Zij meten in een labopstelling van lysimeters gevuld met veenmos, dat de verdamping bij een grondwaterstand aan maaiveld lager was dan wanneer de grondwaterstand werd verlaagd tot 5, 10 en 15 cm onder maaiveld.

### verdamping

Ingram (1983) komt na een uitgebreid overzicht van literatuur op het gebied van evapotranspiratie van hoogvenen en laagveenmoerassen onder andere tot de konklusie dat de gewasfaktor voor boomloze hoogveen tussen 1.0 en 1.1 ligt.

Ook Schouwenaars (1990, 1993) vindt voor veenmos een gewasfaktor van 1. Sijtsma en Veldhuizen (1992) vinden voor veenmos een waarde van 1.2. Daarentegen vinden Lafleur en Roulet (1992) een

---

<sup>13</sup> vasculaire plant = vaatplant

<sup>14</sup> niet vasculaire plant = plant zonder vaten (zoals mos)

lagere waarde, 0.73. Dit is wellicht een gevolg van het gebruik van de Penman-Monteith vergelijking, waarbij voor veenmos parameterisering van  $r_a$  en  $r_c$  lastig is. Van Wirdum (1991) berekende in een het laagveen gebied De Weerribben voor veenmos een gewasfaktor van 0.6, met een variatie van 30 %. Deze lage waarde wordt echter verklaard door verschillende factoren (zie par. 3.1).

**Tabel 13:** Gewasfactoren van pijpestrootje (Schouvenaars 1990, 1993)

mnd	pijpestrootje
mei	0.4-0.45 (0.5-0.6)
juni	0.45-0.7 (0.6-0.9)
juli	0.75 (1)
aug	0.8 (1)
sep	0.85 (1)
okt	0.7 (0.8)

(gewasfactoren t.o.v. Penman open water met tussen haakjes gewasfactoren t.o.v. Makkink.)

Gegevens over de verdamping van andere vegetaties op hoogvenen zijn spaarzaam. Schouvenaars (1990, 1993) en Moors et al. (1995) onderzoeken de verdamping van pijpestrootje in de Engbertdijksvenen. Schouvenaars (1990, 1993) rapporteert een sterke relatie tussen de LAI en de verdamping; bewerking van zijn gegevens leidt tot tabel 13. Het verschil met tabel 8 is opvallend. Twee factoren zouden hier aan ten grondslag kunnen liggen. In de eerste plaats rekende Schouvenaars (1990, 1993) zijn gegevens om van de lysimeter naar de veldsituatie met behulp van de pollendichtheid van pijpestrootje. Ten tweede zou in het begin van het groeiseizoen op een natte veengrond de groei van pijpestrootje trager kunnen zijn dan op een zandgrond. Moors et al. (1995) bepalen met behulp van mikro-meteorologische meetmethoden de aktuele verdamping gedurende twee groeiseizoenen. Zij leiden zowel gewasfactoren als gewas-weerstanden voor pijpestrootje af. Er wordt een relatief hoge seizoens-gemiddelde gewasweerstand ( $360 \text{ sm}^{-1}$ ) gerapporteerd. Desalniettemin worden ook vrij hoge gewasfactoren afgeleid (zie tabel 14). De hoge verdampingsfluxen gekombineerd met hoge weerstanden worden volgens Moors et al. (1995) verklaard door een lage bodemwarmte flux als gevolg van een strooisellaag (zie ook Duyzer en Bosveld, 1988) en de lage albedo van pijpestrootje (0.14). Hierdoor is relatief veel energie voor de verdamping beschikbaar. Sijsma en Veldhuizen (1992) rapporteren voor enkele typische hoogveen soorten gewasfactoren van rond de 1.

In de noord-Duitse hoogvenen is veel onderzoek verricht naar de verdamping van hoogvenen (Baden en Eggelsmann, 1964; Eggelsmann, 1964a, 1964b, 1981; Eggelsmann en Blankenburg, 1993). De daar gebruikte methode om de verdamping te berekenen, volgens Haude (1955), is gebaseerd op het dampdeficiet. Zoals later zal blijken is deze faktor in hoogvenen juist niet bepalend voor de verdamping. Uit deze onderzoeken komt met name naar voren dat de verdamping van ongestoord hoogveen in de zomer terugloopt, terwijl in de herfst en winter de verdamping relatief hoog is. Dit zou goed te maken kunnen hebben met vochtvoorziening (kapillaire nalevering). Interpretatie van het Duitse onderzoek is echter lastig, doordat de verdamping volgens Haude moeilijk te vergelijken is met meer gangbare rekenmethoden.

invloed van straling op de verdamping van hoogveen

Uit de literatuur blijkt dat de verdamping van een veenmos begroeiing vooral afhangt van de beschikbare hoeveelheid energie. Zo rapporteren Price (1991) en Lafleur en Roulet (1992) een sterk lineair verband tussen de beschikbare energie en de verdamping van veenmos<sup>15</sup>. Bij een zegge vegetatie vinden Lafleur en Roulet (1992) dat de verdamping juist meer afhangt van atmosferische condities (wind en dampdeficiet)<sup>16</sup>. Dit wordt volgens Lafleur en Roulet (1992) verklaard door het gladde oppervlak (hoge  $r_a$ ) van veenmos en een zichzelf instellend veenoppervlak (zwellen en krimpen) transport van water naar het veenoppervlak garandeert. Volgens Romanov (1968) is de invloed van de wind op de verdamping van veen onder normale weersomstandigheden gering. Slechts bij een hoog nivo van de beschikbare energie en lage luchttemperaturen speelt de wind een rol bij de verdamping. Ook het onderzoek van Moors et al. (1995) zou kunnen wijzen op een relatief geringe bijdrage aan de verdamping van de tweede term uit de Penman formule.

Lafleur en Roulet (1992) konkluderen derhalve dat voor het bepalen van de verdamping van veenmos, het gebruik van modellen gebaseerd op de (netto) straling het meest geschikt is. Price (1991) gaat dan ook uit van de evenwichtsverdamping,  $E_{\text{equi}}$  (formule(19)), om de verdamping te berekenen. Ook Romanov (1968) en Bavina (1967) gaan uit van de straling ( $R$ ) en konstanten  $a$  en  $b$  om de verdamping van hoogveen uit te rekenen, volgens:

$$E = a * R + b \quad (25)$$

Aangezien de Makkink formule een vergelijkbare vorm heeft, is deze goed bruikbaar voor veenmos.

In het kader van het SLIMM project voert de vakgroep meteorologie van de LUW een studie uit naar warmte fluxen boven het Fochteloërveen. De vegetatie ter plekke bestaat voornamelijk uit pijpestrootje, groeiend op nat veen.

---

<sup>15</sup> Relatiecoëfficiënt van het verband tussen beschikbare energie en verdamping van veenmos:  $r^2=0.97$  (Price 1991);  $r^2=0.96$  (Lafleur en Roulet, 1992)

<sup>16</sup> Relatiecoëfficiënt van het verband tussen beschikbare energie en verdamping van zegge:  $r^2=0.62$  (Lafleur en Roulet, 1992)

konklusie

De verdamping vanaf hoogveen met een veenmos bedekking wordt enigszins gereduceerd wanneer de grondwaterstand onder maaiveld daalt en wordt hevig gereduceerd wanneer de grondwaterstand daalt buiten het bereik van de kappilaire opstijging. Vasculaire planten op hoogvenen zullen wellicht niet leiden van bodemvochtttekorten.

Indien de verdamping niet beperkt wordt door kapillaire nalevering ligt voor veenmos een verhouding  $E/E_0$  van circa 1 voor de hand. Bij vasculaire vegetaties ligt minder voor de hand welke waarde gebruikt moet worden.

Tot slot blijkt dat de verdamping van veenmos sterk afhangt van de beschikbare energie. Hierdoor zijn rekenmethodes gebaseerd op de (netto) straling geschikt voor de berekening van de verdamping van veenmos.

auteurs	gewasfactor, gewaswrsnd, verdamping	vegetatie	meetmethode	lokatie
Eggelsmann (1964a)	b = 0.29-0.86 (*) gem  b = 0.26-0.44 gem	hoogveenrestant  grasland op hoogveenrestant	waterbalans, lysimeter	Noord Duitsland Königsmoor (jan-dec)
Eggelsmann (1964b)	2.08 mmdag <sup>-1</sup>	hoogveen	literatuur	(zomerhalfjaar)
Eggelsmann (1964b)	E = 259 mm (**)  E = 316 mm (jaarsom: 506 mm)  E = 341 mm (jaarsom: 491 mm)	hoogveen  hoogveen restant  grasland op hoogveenrestant	waterbalans  ?  ?	Esterweg Dose  Königsmoor  Königsmoor
Nichols en Brown (1980)	$E/E_{pan} \approx 2$ $E/E_{o} \approx 1.7$	veenmos	labopstelling van lysimeters en verd' pannen	USA
Ingram (1983)	f = 1.0-1.1	hoogveen	literatuur	
Janssen (1986)	f = 0.95  f = 0.65	veenmos  heide	bewerking van literatuur	Nederland
Streefkerk en Casparie (1987)	E = 550 mm (jaarsom)	hoogveen	literatuur	Nederland
Brandesten (1987), Halldin (1988)	E = 400 mm (voor apr - okt)	"mire catchment"	lysimeter	Zweden (apr-okt)
Schouwenaars (1990, 1993)	f ≈ 1.0  f = 0.4-0.85	veenmos  pijpestrootje	lysimeter	Engbertdijksveen (mei-okt)
Price (1991)	$\rho = 0.57-1.26$ (***) gem. = 0.87	spreihoogveen (blanket bog)	Bowen ratio	Canada, Newfoundland (mei-juli)
Sijtsma en Veldhuizen (1992)	f = 1.2    2.1 mmdag <sup>-1</sup>  f = 1.0    1.8 mmdag <sup>-1</sup>  f = 1.0    2.1 mmdag <sup>-1</sup>  f = 0.9    2.5 mmdag <sup>-1</sup> (***)	veenmos  eenarig wollegras  struikheide  beenbreek	lysimeter	Nederland (mei-sep)
Lafleur en Roulet (1992)	f = 0.73 (Zo = 0.015 m)  f = 0.77 (Zo = 0.03 m)	veenmos  zegge	Bowen ratio	Canada (juli-aug)
Eggelsmann en Blankenburg (1993)	E = 654 mm (jaarsom)	vernat hoogveenrest	literatuur, dampdeficiet	Noord Duitsland Leegmoor
Kim en Verma (1994)	0.3-6.0 mmdag <sup>-1</sup> gem. 3.6 mmdag <sup>-1</sup>	veenmos	Bowen ratio	USA (mei-okt)
Moors et al. (1995)	f = 1.1-1.2 (tov Makink !)  r <sub>c</sub> = 360 sm <sup>-1</sup>	pijpestrootje	mikro-meteo- rologische meet- methoden	Engbertdijksveen (mei-okt)

(\*) b faktor volgens Haude.

(\*\*) data betreft de periode juni-okt

(\*\*\*) Price (1991) gebruikt de evenwichtsverdamping:  $E = \rho E_{equi}$ (\*\*\*) voor oktober en november gold voor alle vier vegetaties:  $f > 1$





## 4 KONKLUSIE

Bij de samenstelling van dit overzicht naar de verdamping van natuurterreinen werden de volgende problemen gesignaleerd:

- 1 -het gebruik van de uiteenlopende meet- en rekenmethoden.
- 2 -er is een grote mate van variatie in de resultaten zowel binnen één studie met één benadering alsook tussen de verschillende studies met verschillende benaderingen.
- 3 -het heterogene karakter van de meeste vegetaties in natuurterreinen.
- 4 -het ontbreken van gegevens over verdamping in de winter.
- 5 -de overdraagbaarheid van buitenlandse studies naar de Nederlandse situatie is soms twijfelachtig.

Idealiter zou men willen beschikken over één verdampingsmodel dat op grond van routine weergegevens en met gemakkelijk te verzamelen gegevens over de vegetatie en de bodem, nauwkeurig de verdamping kan voorspellen. In de praktijk zijn er uiteenlopende meet- en rekenmethoden (zie hfst 2) die gebruikt worden bij de verschillende natuurterreinen. Dit maakt onderlinge vergelijking lastig.

Daarbij komt dat de geschiktheid van een methode afhangt van het type natuurterrein. Bij sommige vegetaties is de verdamping namelijk afhankelijk van het dampdeficiet, terwijl bij andere vegetaties vooral de hoeveelheid straling van belang is. Zo blijkt de verdamping van veenmos voornamelijk af te hangen van de straling, terwijl bekend is dat de verdamping van bossen veel meer afhangt van het dampdeficiet. Dit betekent dat methoden die slechts één van deze twee processen beschrijven niet geschikt zijn om te worden gebruikt voor algemene toepassingen. Een voorbeeld van een rekenmethode die beide processen beschrijft is de Penman-Monteith vergelijking (17).

Men zou dus moeten nagaan welke meetmethode geschikt is voor alle typen natuurterrein. Tevens zou men moeten komen tot één enkel verdampingsmodel, dat alle relevante fysische processen adequaat beschrijft en algemeen toepasbaar is.

De grote spreiding binnen een toegepaste benadering maakt interpretatie van de resultaten lastig. De genoemde spreiding geeft aan dat de gebruikte methoden wellicht de verdamping nog niet goed beschrijven en bepaalde belangrijke processen over het hoofd zien. Men kan daarbij bijvoorbeeld denken aan plantenfysiologische processen, de representativiteit van lokale metingen voor grotere gebieden, de energiebalans van open water binnen een nat gebied, de albedo, de invloed van een strooisellaag of advektieve invloeden.

Het probleem van de heterogeniteit van de natuurterreinen krijgt in de literatuur nauwelijks aandacht. Toch is dit een belangrijk probleem. Welke parameters moeten gebruikt worden indien een gebied bestaat uit een kleinschalig mozaïek van bijvoorbeeld 40 % laagveenmoeras, 40 % bos en 20 % open water (petgaten) ? En hoe gaat men bijvoorbeeld om met vergraste heide ? Verschillende plantensoorten kunnen immers verschillende verdampingseigenschappen bezitten, die zich bovendien niet altijd synchroon ontwikkelen gedurende het seizoen. Hoe met dergelijke problemen dient te worden omgegaan is nog onbekend.

Opvallend is dat bijna alle onderzoeken naar verdamping verricht zijn in het groeiseizoen. Hierdoor is de kennis over de verdamping in het winterseizoen gering. Gezien het feit dat ook voor de verdroging belangrijke processen als grondwater-aanvulling en uitspoeling voor een groot deel door de winterperiode bepaald worden, verdient het aanbeveling in de toekomst meer aandacht te besteden aan de verdamping gedurende de winter.

De overdraagbaarheid van een verdampingsstudie van het ene natuurterrein naar het andere is altijd lastig. Het is aannemelijk dat hetzelfde type natuurterrein bij een andere vegetatiestructuur, een enigszins afwijkend klimaat en bodem, enz. ook anders reageert. Het is dus zinvoller aandacht te besteden aan de processen die ten grondslag liggen aan de reactie van de verdamping op de structuur, klimaat, bodem, enz., aannemende dat deze processen overal hetzelfde zijn. Met andere woorden: het heeft meer zin te meten aan processen en variabelen die de verdamping bepalen dan simpelweg het vaststellen van de verdamping van een zeker natuurterrein.

Gezien deze problemen is het op dit moment niet goed mogelijk exakte waarden te geven voor de verdamping(parameters) van natuurterreinen. Het verdient aanbeveling om te werken aan de ontwikkeling van een op fysische grondslagen gebaseerd verdampingsmodel dat voor uiteenlopende natuurterreinen alle voor verdamping relevante fysische processen beschrijft. Individuele case studies, waarbij de verdamping van een bepaald natuurterrein wordt gemeten, zullen alleen zinvol zijn indien de relevante variabelen goed worden beschreven. Welke variabelen voor welk type natuurterrein het meest doorslaggevend zijn is nog niet duidelijk. Als voorbeeld van mogelijk relevante variabelen kunnen worden genoemd: albedo, aandeel open water, strooisellaag, LAI, hoogte en dichtheid van begroeiing, fetch en positie in het landschap.

Aanvullend modelonderzoek zal zich in dit kader moeten richten op:

- het nagaan of dergelijke variabelen een rol spelen bij de verdamping,
- het kwantificeren van de relevante fysische processen in natuurterreinen.

Lijst met gebruikte soortennamen:

beenbreek	Narthesicum ossifragum
bochtige smele	Deschampsia flexuosa
dopheide	Erica tetralix
duindoorn	Hippophae rhamnoides
eenarige wollegras	Eriophorum vaginatum
galigaan	Cladium mariscus
gewoon knoopkruid	Centaurea pratensis
grote lisdodde	Typha latifolia
kleine lisdodde	Typha angustifolia
klein kroos	Lemna minor
mattenbies	Schoenoplectus lacustris
moerashyacint	Pontedaria cordata
moerasspirea	Filipendula ulmaria
moeraszegge	Carex acutiformis
muizenootje	Hieracium pilosella
pijlkruid (arrow head)	Sagittaria lancifolia
pijpestrootje	Molinia caerulea
riet	Phragmites australis
ronde zegge	Carex diandra
struikheide	Calluna vulgaris
veenmos	Sphagnum
water hyacint (engels)	Eichhornia crassipes



---

**LITERATUUR**

- Ad Hoc Groep Verdamping, 1984. *Herziening van de berekening van de gewasverdamping in het hydrologisch model GELGAM*. Begeleidingsgroep GELGAM, Provincie Gelderland, Dienst Waterbeheer, Arnhem.
- Anderson, M.G. en Idso, S.B., 1987. *Surface geometry and stomatal conductance effects on evapotranspiration from aquatic macrophytes*. Water Resour. Res., 23:1037-1042.
- Baden, W. en Eggelsmann, R., 1964. *Der Wasserkreisverlauf eines nordwestdeutschen Hochmoores. Eine hydrologische Studie über den Einfluß von Entwässerung und Kultivierung auf den Wasserhaushalt des Königsmoores*. Verlag Wasser und Boden Hamburg.
- Bakker, T.W.M., Klijn, J.A. en Zadelhoff, F.J., 1979. *Duinen en duinvalleien: een landschapsecologische studie van het Nederlands duingebied*. Pudoc, Wageningen
- Bakker, T.W.M., 1984. *Het Dwingelerveld, deelrapport geohydrologie*. Staatsbosbeheer, SBB 1984-29.
- Barkman, J. J. en Stoutjesdijk, Ph., 1987. *Microklimaat, vegetatie en fauna*. Pudoc, Wageningen.
- Bavina, L.G., 1967. *Refinement of parameters for calculating evaporation from bogs on the basis of observations at bog stations*. Soviet Hydrology: selected papers, issue 4.
- Beltman, B. en Koerselman, W., 1988. *De verdamping van moerasvegetaties*. H2O, 21:200-205.
- Bernatowicz, S., Leszczynski, S. en Tycznska, S., 1976. *The influence of transpiration by emergent plants on the water balance in lakes*. Aquat. Bot., 2:275-288.
- Brandesten, C.O., 1987. *Runoff from mire catchments, a study on the mire complex Komosse southern central Sweden*. Roy. Inst. of Technology, Dept. of Land Improvement and Drainage, licentiate thesis, Stockholm.
- Brezny, O., Mehta, I., en Sharma, R.K., 1973. *Studies on evapotranspiration of some aquatic weeds*. Weed Sci., 21:197-204.
- Bruin, H.A.R., de, 1981. *The determination of (reference crop) evapotranspiration from routine weather data*. Comm. Hydrol. Research TNO, Den Haag, Proc. and Inform. 28:25-37.
- Bruin, H.A.R., de, 1987. *From Penman to Makkink*. Versl. en Meded. 39:5-31, CHO-TNO, 's-Gravenhage.
- Cultuurtechnisch Vademecum, 1988. *Cultuurtechnisch Vademecum*. Werkgroep herziening Cultuurtechnisch Vademecum, Utrecht.

- Debusk, T.A., Ryther, J.H. en Williams, L.D., 1983. *Evapotranspiration of Eichhornia crassipes (Mart.) Solms and Lemna minor L. in central Florida: relation to canopy structure and season.* Aquat. Bot., 16:31-39.
- Denmead, O.T., 1984. *Plant physiological methods for studying evapotranspiration: Problems of telling the forest from the trees.* Agric. Water Manag., 8:167-189.
- Dolan, T.J., Hermann, A.J., Bayleey, S.E. en Zoltek, Jr., J., 1984. *Evaporation of a Florida, U.S.A., freshwater wetland.* J. Hydrol., 74:355-371.
- Dolman, A.J. en Moors, E.J., 1994. *Hydrologie en waterhuishouding van bosgebieden in Nederland. Fase 1: Toetsing van het instrumentarium.* rap. 333, DLO-Staring Centrum, Wageningen.
- Dolman, A.J. en Oosterbaan, W.E., 1986. *Grondwatervoeding, interceptie en transpiratie van de Castricumse boslysimeters.* H2O, 19:174-175.
- Duyzer, J. en Bosveld, F., 1988. *Measurements of dry deposition fluxes of O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> and particles over grass/heathland vegetation and the influence of surface inhomogeneity.* TNO en KNMI, rapport R-88/11.
- Eggelsmann, R., 1964a. *Die potentielle und aktuelle evaporation eines seeklima-hochmoores.* I.A.S.H., Committee for Evaporation, publ., 62:88-97
- Eggelsmann, R., 1964b. *Die verdunstung der Hochmoore und deren hydrographischer Einfluss.* Deutschen Gewässerkundliche Mitteilungen, 8, heft 6:138-147.
- Eggelsmann, R., 1981. *Ökohydrologische Aspekte von anthropogen beeinflussten Mooren Norddeutschlands.* Diss. Universität Oldenburg.
- Eggelsmann, R. en Blankenburg, J., 1993. *Moor und Wasser - Leegmoorprojekt.* Naturschutz Landschaftspfl. Niedersachs., Heft 29:19-48, Hannover.
- Eggink, H. en Vink, J., 1989. *Een lysimeterstudie naar de verdamping van een hoogveenrestant; Deelverslag I van een verdampingsonderzoek in de Engbertsdijkvenen in de zomer van 1988.* Vakgroep Cultuurtechniek, LandbouwUniversiteit Wageningen.
- Eisenlohr, W.S., 1966. *Water loss from a natural pond through transpiration by hydrophytes.* Water Resour. Res., 2:443-453.
- Feddes, R.A., Kowalik, P.J. en Zaradny, P.J. 1978. *Simulation of field water use and crop yield.* Pudoc, Wageningen.
- Feddes, R. A., 1987. *Crop factors in relation to Makkink reference-crop evapotranspiration.* Versl. en Meded. 39:33-45, CHO-TNO, 's-Gravenhage.

- Friedrich, W., 1950. *Über die verdunstung vom erdboden*. GWF "Das Gas- und Wasserfach", 91. Jahrg. (1950) Heft 24 (Wasser), 8 pp., In: Bakker (1984).
- Halldin, S., 1988. *Swedish evaporation reserach: a review*. Nordic hydrol., 19(5):303-340.
- Haude, W., 1955. *Zur Bestimmung de Verdunstung auf möglichst einfache Weise?* Mitt. Dt. Wetterdienst 2, Nr. 11, Bad Kissingen.
- Hoeve, J. ter, 1978. *Nadere gegevens over de relatie tussen neerslag en neerslagoverschot in bosgebieden*. H2O, 11:364-368.
- Idso, S.B. en Anderson, M.G., 1988. *A comparison of two recent studies of transpirational water loss from emergent aquatic macrophytes*. Aquat. Bot. 31:191-195.
- Ingram, H.A.P., 1983. *Hydrology*. In: A.J.P. Gore (editor), *Mires: Swamp, Bog, Fen and Moor, Ecosystems of the World, vol 4A*. Els. Sci. Publ., Amsterdam, pp 67-158.
- Janssen, P.C. en Kemmers, R.H., 1985. *Experimenteel verdampingsonderzoek aan twee plantensoorten: moerasspirea en gewoon knoepkruid*. Cultuurtechnisch tijds. 25:403-411.
- Janssen, P.C., 1986. *De potentiële verdamping van (half-) natuurlijke vegetaties*. ICW nota 1703, Wageningen.
- Janssen, P.C., 1994. *De verdamping van een Erica- een Molinea en een schraal graslandvegetatie*. Int. med. 294, DLO-Staring Centrum, Wageningen.
- Jarvis, P.G., 1976. *The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field*. Phil. Trans. R. Soc. London, 273:593-610.
- Kelliher, F.M., Leuning, R., Raupach, M.R. en Schulze, E.-D., 1995. *Maximum conductances for evaporation from global vegetation types*. Agric. For. Meteorol., 73:1-16.
- Kim, J. en Verma, S.B., 1994. *Surface exchange of water vapor in a peatland in north central Minnesota*. Agric. and forest meteorol., 21:295.
- Koerselman, W. en Beltman, B., 1988. *Evapotranspiration from fens in relation to Penma's potential free water evapotranspiration and pan evapotranspiration*. Aquat. Bot., 31:307-320.
- Lafleur, P.M., 1990. *Evapotranspiration from sedge-dominated wetland surfaces*. Aquat. Bot., 37:341-353.
- Lafleur, P.M. en Roulet, N.T., 1992. *A comparison of evaporation rates from two fens of the Hudson Bay Lowland*. Aquat. Bot., 44:59-69.
- Linacre, E.T., Hicks, B.B., Sainty, G.R. en Grauze, G., 1970. *The evaporation from a swamp*. Agric. Meteorol., 7:375-386

- Linacre, E.T., 1976. *Swamps*. In: J.L. Monteith (editor), *Vegetation and Atmosphere*, 2. Academic Press, London, pp 329-347.
- Makkink, G.F., 1957. *Testing the Penman formula by means of lysimeters*. Journ. Int. of Water Eng., 11:277-288.
- Makkink, G.F., 1962. *Vijf jaar lysimeteronderzoek*. Verslag landbouwkundig onderzoek nr.68-1, 241 pp., In: Bakker (1984).
- McNaughton, K.G. en Jarvis, P.G., 1983. *Predicting effects of vegetation changes on transpiration and evaporation*, in: T.T. Kozlowski (editor), *Water deficits and plant growth*. Vol 7, Academic press, New York, pp. 1-47
- Meinardi, C.R., 1976. *Characteristic examples of the natural groundwater composition in The Netherlands*. RID mededeling, Voorburg.
- Meinardi, C.R., 1994. *Groundwater recharge and travel times in sandy regions of the Netherlands*. Proefschrift, VU Amsterdam.
- Miranda, A.C., Jarvis, P.G., Grace, J., 1984. *Transpiration and evaporation from heather moorland*. Boundary-Layer Meteorol., 28:227-243.
- Moors, E.J., Stricker, J.N.M. en Abee, van den, G.D., 1995. *Evapotranspiration of cutover bog covered by Molinia Caerulea*. Concept report.
- Nichols, D.S., en Brown, J.M., 1980. *Evaporation from a sphagnum moss surface*. J. Hydrol., 48:289-302.
- Ovaa, A.H., 1990. *Verdamping in natuurgebieden, een literatuurstudie naar de achtergronden van verdamping in (half)-natuurlijke vegetaties*. Vakgroep Hydrologie, Bodemnatuurkunde en Hydraulica, LandbouwUniversiteit Wageningen.
- Penman, H.L., 1948. *Natural evapotranspiration from the open water, bare soil and grass*. Proc. Roy. Soc. Exp. Biol., 19:205-234.
- Piibál, K. en Ondok, J.P., 1980. *The daily and seasonal course of evapotranspiration from a central European sedge-grass marsh*. J. Ecol., 68:547-559
- Piibál, K. en Ondok, J.P., 1986. *Evapotranspiration from a willow carr in summer*. Aquat. Bot., 25:203-216.
- Price, J.S., 1991. *Evaporation from a blanket bog in a foggy coastal environment*. Boundary-Layer Meteorol., 57:391-406
- Price, J.S., 1994. *Evapotranspiration from a lakeshore Typha marsh on Lake Ontario*. Aquat. Bot., 48:261-272.



- Priestley, C.H.B., en Taylor, R.J., 1972. *On the assessment of the surfaces heat flux and evaporation using large scale parameters*. Monthly Weather Rev., 100:81-92.
- Project- en begeleidingsgroep verdampingsberekeningen, 1988. *Van Penman naar Makkink, een nieuwe berekeningswijze voor de klimatologische verdampingsgetallen*. KNMI en CHO-TNO, rap. en nota's no.19, Den Haag
- Rijtema, P.E., 1968. *Lysimeteronderzoek in Nederland: resultaten van de bewerking van de gegevens*. Werkgroep Lysimeters TNO.
- Ripley, E.A. en Redmann, R.E., 1976. *Grassland*. In: J.L. Monteith (editor), *Vegetation and Atmosphere*, 2. Academic Press, London, pp 351-398.
- Ritchie, J.T., 1972. *Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover*. Water Resour. Res., 8:1204-1213.
- Romanov, V.V., 1968. *Hydrophysics of bogs*. Israel program for scientific translations, Jerusalem.
- Rijksinstituut voor Natuurbeheer, 1984. *Natuurbeheer in Nederland; Levensgemeenschappen*. PUDOC, Wageningen 392 pp.
- Schouwenaars, J.M., 1990. *Problem-orientated studies on plant-soil-water relations*. proefschrift, Landbouwwuniversiteit Wageningen.
- Schouwenaars, J.M., 1993. *De verdamping van pijpestrootje (Molinea caerulea) en veenmos (Sphagnum papillosum) in hoogveengebieden en haar betekenis voor het waterbeheer*. H20, 26:376-382.
- Šmid, P., 1975. *Evaporation from a reedswamp*. J. Ecol., 63:299-309
- Snyder, R.L. en Boyd, C.E., 1987. *Evaporation by Eichhornia crassipes (Mart.) Solms and Typha latifolia L.* Aquat. Bot., 27:217-227.
- Streefkerk, J.G. en Casparie, W.A., 1989. *The hydrology of bog ecosystems. Guidelines for management*. SBB, Utrecht.
- Stricker, J.N.M., 1981. *Methods of estimating evapotranspiration from meteorological data and their applicability in hydrology*. Versl. en med. CHO-TNO, 28:59-76.
- Sijtsma, B.R. en Veldhuizen, A.A., 1992. *Hydrology of Clara and Raheenmore bog*. Irish - Dutch raised bog study, Wageningen Agricultural University.
- Van der Weert, R. en Kamerling, G.E., 1971. *Evaporation of water hyacinth (Eichhornia crassipes)*. J. Hydrol., 22:201-212.
- Van Wirdum, G., 1991. *Vegetation and hydrology of floating rich-fens*. proefschrift, Universiteit van Amsterdam.
- NOV thema 4.2

Wallace, J.S., Roberts, J.M. en Roberts, A.M., 1982. *Evaporation from heather moorland in North Yorkshire, England*. Proc. Symp. Hydrol. Research Basins, Sonderb. Landeshydrologie, Bern.

Wind HZN, R., 1960. *De lysimeters in Nederland (II)*. Versl. en med. CHO-TNO, 4:207-263.

Virta, J. 1966. *Measurement of evapotranspiration and computation of water budget in treeless peatlands in the natural state*. Phys. Math. Soc. Sc. fenn., 32(11):1-70

Werkcommissie voor verdampingsonderzoek, 1984. *Verdampingsonderzoek in Nederland 1942-1967*. Eindverslag, 167 pp.

## **DEEL 2**

# **VOORBEELD STUDIE; TOEPASSING VAN VERDAMPINGSMODEL *SWAPS* OP ENGBERTSDIJKSVENEN**



**Lijst van variabelen:**

A	beschikbare energie ( $W.m^{-2}$ )
$C(h) = d\theta/dh$	differentiële vocht capaciteit ( $cm^{-1}$ )
$C_p$	specifieke warmte van lucht ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )
d	nulvlakverplaatsing (m)
E	verdamping (mm)
$E_{ref}$	referentie verdamping volgens Makkink (mm)
$E_{SWAPS}$	verdamping berekend door het model SWAPS (mm)
f	gewasfactor (-)
$g_a$	aerodynamische geleidbaarheid ( $m.s^{-1}$ )
$g_s$	oppervlakte geleidbaarheid ( $m.s^{-1}$ )
$g_{s,max}$	maximale oppervlakte geleidbaarheid ( $m.s^{-1}$ )
G	bodemwarmte ( $W.m^{-2}$ )
h	drukhoogte (cm)
H	voelbare warmte ( $W.m^{-2}$ )
I	interceptie (mm)
K	doorlatendheid ( $cm.dag^{-1}$ )
$K_r$	regressie parameter van het Jarvis Stewart model ( $W.m^{-2}$ )
$K_T$	regressie parameter van het Jarvis Stewart model ( $^{\circ}C$ )
$K_{shd}$	regressie parameter van het Jarvis Stewart model (-)
$K_{exp}$	regressie parameter van het Jarvis Stewart model ( $kg.g^{-1}$ )
LAI	leaf area index (-)
$LAI_{max}$	maximale leaf area index (-)
$r_a$	aerodynamische weerstand ( $s.m^{-1}$ )
$r_b$	grenslaag weerstand ( $s.m^{-1}$ )
$r_s$	oppervlakte weerstand ( $s.m^{-1}$ )
$R_n$	netto straling ( $W.m^{-2}$ )
$R_n - G = A$	beschikbare energie ( $W.m^{-2}$ )
$R_s$	globale straling ( $W.m^{-2}$ )
S	wateronttrekking door de wortels ( $dag^{-1}$ )
t	tijd (dag)
T	temperatuur (K) of ( $^{\circ}C$ )
$T_L$	lage temperatuur limiet ( $0^{\circ}C$ )
$T_H$	hoge temperatuur limiet ( $40^{\circ}C$ )
VPD	dampdrukdeficiet (mbar, $g.kg^{-1}$ of hPa) ( $1\text{ mbar} = 1\text{ hPa} = 0.622\text{ g.kg}^{-1}$ )
z	diepte beneden maaiveld (cm)
$z_0$	ruwheid(slengte) (m)
$\Delta E$	latente warmte ( $W.m^{-2}$ )
$\alpha$	bedekkingsfractie van de onderste laag in SWAPS (-)
$\beta$	bedekkingsfractie van de bovenste laag in SWAPS (-)
$\gamma$	psychrometer konstante ( $mbar.K^{-1}$ )
$\rho$	dichtheid van lucht ( $kg.m^{-3}$ )
$\rho$	helling van de verzadigingsdampdruk curve ( $mbar.K^{-1}$ )
$\theta$	bodemvocht gehalte (-)
$\theta(h)$	bodemvocht-karakteristiek (-)

### *Verdamping van natuurterreinen*

---

$\theta_{wp}$	bodemvochtgehalte bij het verwelkingspunt (wilting point) (-)
$\theta_{red}$	bodemvochtgehalte waarbij de verdamping wordt gereduceerd (-)

#### Statistische variabelen

SE	standard error of estimate ( $\sqrt{UV/n}$ )
$R^2$	relatie coefficient ( $1 - UV/TV * 100\%$ ) of de door het model verklaarde variantie
TV	totale variantie (som der kwadraten tussen metingen en gemiddelde)
UV	niet verklaarde variantie (som der kwadraten tussen metingen en modelberekeningen)

---

## 1 INLEIDING

De recente ontwikkeling van hydrologische modellen en de inzet hiervan bij studies naar de waterhuishouding van natuurterreinen hebben het gebrek aan kennis over de verdamping van deze gebieden duidelijk gemaakt. Het onderzoek naar verdamping in Nederland is dan ook voornamelijk gericht geweest op homogene landbouwgewassen en recentelijk ook op bossen. Als gevolg hiervan zijn de meest gebruikte verdampings- formules en verdampings-modellen afgeleid van de voor deze homogene vegetaties meest relevante processen. Tussen landbouwgewassen en bossen enerzijds en natuurlijke vegetaties<sup>17</sup> anderzijds bestaan echter belangrijke verschillen (zie deel 1; par 1.3). Hierdoor kunnen de voor de verdamping relevante processen bij natuurlijke vegetaties anders verlopen dan bij homogene landbouwgewassen of bossen. In deze studie wordt geprobeerd na te gaan welke fysische processen en parameters juist bij de verdamping van natuurterreinen een belangrijke rol spelen. Een gedetailleerd, op fysische processen gebaseerd verdampingsmodel voor heterogene vegetatie en onverzadigde zone ("SWAPS"), wordt hierbij gebruikt om inzicht te krijgen in deze processen en parameterisaties. Dit model, dat door SC-DLO is ontwikkeld, zal met behulp van meetgegevens worden gekalibreerd en gevalideerd. Door middel van enkele rekenvarianten worden de consequenties van de heterogeniteit van de vegetatie op de verdamping geëvalueerd. Tevens komt de bruikbaarheid van de Makkink vergelijking bij de verdamping van natuurterreinen aan de orde.

Voor het modelleren van de verdamping wordt bij voorkeur gewerkt met directe flux metingen van de verdamping. Dergelijke mikro-meteorologische metingen boven natuurterreinen zijn echter zeer schaars (Duyzer en Bosveld, 1988; Moors et al., 1995). In deze studie zijn de metingen van Moors et al. (1995) boven een pijpestroetje vegetatie in het hoogveen gebied Engbertsdijksvenen gebruikt.

---

17

In deze studie worden bossen niet tot natuurlijke vegetaties gerekend





## 2 LOKATIE EN METINGEN

Engbertsdijksvenen is een hoogveen gebied van ca. 850 ha in de provincie Overijssel. Veenafgraving in dit gebied is gestopt in 1983. Ten behoeve van deze veenafgraving is het gebied ontwaterd, waardoor pijpestrootje de dominante soort is geworden in grote delen van het gebied. Om veenmosgroei te stimuleren neemt Staatsbosbeheer maatregelen om het gebied weer te vernatten.

Om de effecten van vernattingsmaatregelen te onderzoeken, werd tussen 1987 en 1989 door de vakgroep Waterhuishouding van de Landbouwuniversiteit Wageningen een meet campagne in de Engbertsdijksvenen op touw gezet (Van Amerongen et al., 1990). Hierbij werden in het groeiseizoen (mei tot oktober) van 1988 en 1989 mikro-meteorologische metingen boven een vrij homogene pijpestrootje vegetatie uitgevoerd (Moors et al., 1995). Schouwenaars en Vink (1992) onderzochten bodemvocht-karakteristieken en onverzadigde doorlatendheden. De lokatie (52°28'N, 6°40'E) had een aanstrijk lengte (fetch) naar het zuiden en westen van 400 m, naar het noorden, 700 m. In het oosten bevond zich op 50 m een brede sloot, achter het kanaal bestond de vegetatie uit pijpestrootje en veenmos (Moors et al., 1995).

Met behulp van twee meetmasten van ca. 3 m hoogte werd ieder half uur gemeten: natte en droge bol temperatuur op verschillende hoogten, inkomende kortgolvlige straling, gereflekteerde kortgolvlige straling, netto straling, neerslag, bodemwarmte flux en windsnelheid op verschillende hoogten. Voor meer details over de metingen en de gebruikte meetinstrumenten, zie Moors et al. (1995). Moors et al. (1995) bepaalden met behulp van de "flux profile" methode en de energie balans, ieder half uur de latente en voelbare warmte fluxen.

De structuur van pijpestrootje verandert nogal gedurende het jaar. Aan einde van het groeiseizoen in september zijn de bladeren 40 tot 90 cm lang, zodat de LAI op dat moment ca. 3 bedraagt (Schouwenaars, 1990). Deze bladeren sterven daarna af en vormen een strooisellaag die de bodem bedekt. Pas in april begint pijpestrootje weer te groeien. De ontwikkeling van de LAI gedurende het groeiseizoen in het studiegebied is afgeleid van Moors et al. (1995) (zie Fig. 1).

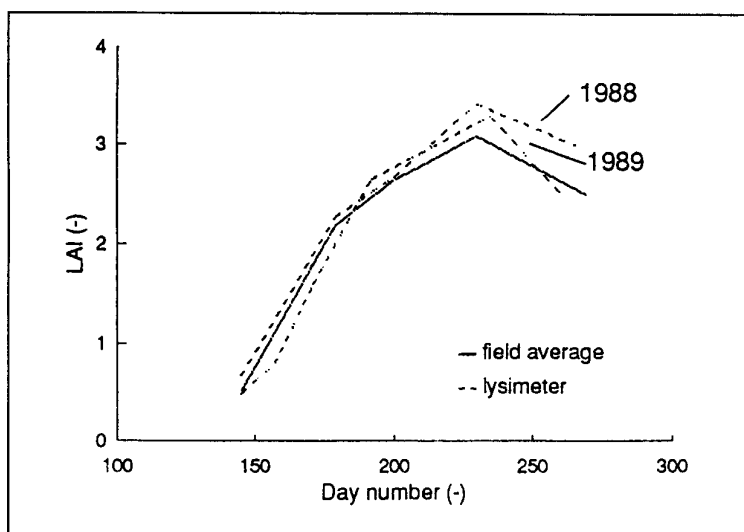


Fig. 1; De ontwikkeling van de LAI van pijpestrootje gedurende het groeiseizoen

De ruwheidslengte,  $z_0$ , en de nulvlakverplaatsing,  $d$ , van de pijpestrootje vegetatie in het groeiseizoen werd berekend met een logaritmisch windprofiel (zie tabel 1). Duyzer en Bosveld (1988) vonden vergelijkbare waarden voor een pijpestrootje vegetatie in juni. Het groeiseizoen van 1988 was nat en in het algemeen bewolkt, terwijl in 1989 warm en enkele droge perioden kende. Neerslag bedroeg in de periode 23 mei tot 30 september in 1988 en 1989 respectievelijk 394 mm en 235 mm. De grondwaterstand bevond zich in deze perioden tussen 10 en 70 cm beneden maaiveld.

**Tabel 1:** Gemiddelde nulvlakverplaatsing ( $d$ ) en ruwheidslengte ( $Z_0$ ) (Moors et al., 1995)

	$d$ (m)	$z_0$ (m)
1988	0.362	0.041
1989	0.335	0.048

### 3 HET VERDAMPINGSMODEL SWAPS

SWAPS is een twee-lagen verdampingsmodel met routines voor het onverzadigde grondwater (Ashby et al., 1996). Op basis van micro-meteorologische invoergegevens, berekent het model zowel een waterbalans als een energie balans, waarbij rekening wordt gehouden met terugkoppeling tussen processen in de bodem, vegetatie en atmosfeer. De totale verdamping wordt beschouwd als de gewogen som van de twee lagen (Dolman, 1993):

$$\lambda E_t = \alpha \lambda E_u + \beta \lambda E_c \quad (1)$$

hierbij is  $\lambda E$  latente warmte flux ( $W \cdot m^{-2}$ ). De subscripten t, u, c, slaan respectievelijk op totale vegetatie, onderlaag (understorey) en bovenlaag (canopy). De fraktie  $\alpha$  vertegenwoordigt de bedekking van de onderste laag,  $\beta$  de bedekking van de bovenste laag, waarbij  $\beta = 1 - \alpha$  (Dolman, 1993). Bij een gesloten vegetatie, zoals bos, geldt  $\alpha = 0$  ("single big leaf" model). Bij landbouwgewassen wordt gewerkt met een volledige bedekking van zowel de bovenlaag als de onderlaag. Hierbij geldt  $\alpha = \beta = 1$  en er moet een extinctie-coëfficiënt worden opgegeven (Shuttleworth en Wallace, 1985). De Penman-Monteith formule wordt gebruikt om de verdamping van beide lagen te berekenen (Dolman, 1993):

$$\lambda E_t = \alpha C_u PM_u + \beta C_c PM_c \quad (2)$$

waarbij:

$$PM_u = \frac{\Delta A_t + (\rho c_p VPD - \Delta r_a^u (A_t - A_u)) / (r_a^a + r_a^u)}{\Delta + \gamma (1 + (r_s^u + r_b^u) / (r_a^a + r_a^u))} \quad (3)$$

$$PM_c = \frac{\Delta A_t + (\rho c_p VPD - \Delta r_b^c (A_t - A_c)) / (r_a^a + r_b^c)}{\Delta + \gamma (1 + (r_s^c) / (r_a^a + r_b^c))} \quad (4)$$

hierbij is A de beschikbare energie ( $W \cdot m^{-2}$ ),  $\Delta$  de helling van de verzadigingsdampdruk curve ( $mbar \cdot K^{-1}$ ),  $\rho$  de psychrometer konstante ( $mbar \cdot K^{-1}$ ),  $\rho$  de dichtheid van lucht ( $kg \cdot m^{-3}$ ), VPD het dampdrukdeficiet (mbar) en  $c_p$  de specifieke warmte van lucht ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ). De weerstanden, r ( $s \cdot m^{-1}$ ), zijn gedefinieerd in Fig. 2. Voor de specificatie van de aerodynamische weerstanden en de grenslaag weerstanden wordt verwezen naar Dolman (1993). De oppervlakte weerstand wordt hieronder beschreven. De coëfficiënten  $C_u$  en  $C_c$  (-) zijn een functie van de weerstanden en de bedekkingsfrakties,  $\alpha$  en  $\beta$  (Dolman, 1993).

SWAPS vereist per tijdstap invoergegevens over windsnelheid, luchttemperatuur, luchtvochtigheid, globale straling, neerslag, luchtdruk en bodemwarmte flux. Voor de eerste drie parameters dient te worden aangegeven op welke hoogte ze gelden; de referentie hoogte. Daarnaast moeten de bodemvocht-karakteristieken  $\theta(h)$  en doorlatendheden  $K(h)$  van de bodem als functie van de drukhoogte h worden opgegeven. Bovendien zijn gegevens over de vegetatie nodig; hoogte, leaf area index, bladbreedte, ruwheidslengte, nulvlakverplaatsing, worteldiepte en -verdeling, doorval, stamafvoer en kruinberging. Deze parameters kunnen per dag gevarieerd worden.

Ten behoeve van de interceptie berekeningen wordt voor iedere laag de hoeveelheid water die er op ligt bijgehouden volgens Rutter et al. (1971). Indien er water op een laag ligt dan wordt de oppervlakteweerstand,  $r_s$ , van deze laag op nul gezet. Indien een laag slechts gedeeltelijk nat is, worden zowel de verdamping van de droge en de natte situatie berekend. Hiervan wordt het gewogen gemiddelde genomen.

#### Oppervlakte weerstand

In het model dienen twee oppervlakte weerstanden te worden opgegeven, één voor de onderlaag en één voor de bovenlaag. De oppervlakte weerstand is de totale weerstand voor watertransport door vegetatie en bodem naar de atmosfeer. In de bladeren wordt dit proces beheerst door de stomata. Volgens Jarvis (1976) is de stomatale geleidbaarheid  $g_s$  (het omgekeerde van de stomatale weerstand) een functie van een aantal omgevingsfactoren. Hij beschreef deze relatie in een model waarbij de maximale stomatale geleidbaarheid  $g_{s,max}$  wordt gereduceerd door een aantal onafhankelijke stress factoren. De parameters van dit model worden afgeleid uit velddata, met behulp van regressietechnieken. Stewart (1988) paste dit model aan om de oppervlakte geleidbaarheid van een naaldbos te beschrijven. Het Jarvis-Stewart model is als volgt geformuleerd:

$$\frac{1}{r_s} = g_s = g_{s,max} (LAI/LAI_{max}) f(R_s) f(VPD) f(T) f(\Theta) \quad (5)$$

LAI is hierbij de leaf area index,  $LAI_{max}$  de maximale leaf area index,  $f(R_s)$  de globale straling functie,  $f(T)$  de luchttemperatuur functie,  $f(VPD)$  de dampdrukdeficiet functie,  $f(\Theta)$  de bodemvocht functie. Alle functies hebben een waarde tussen 0 en 1. Deze functies zijn als volgt gedefinieerd (Jarvis, 1976; Stewart, 1988):

$$f(R_s) = \frac{R_s (1000 + K_r)}{1000 (R_s + K_r)} \quad (6)$$

$$f(T) = \frac{(T - T_L)(T_H - T)^a}{(K_T - T_L)(T_H - K_T)^a} \quad (7)$$

De vochtigheidsfunctie is geformuleerd volgens Ogink-Hendriks (1995):

$$f(VPD) = K_{shd} + (1 - K_{shd}) K_{exp}^{VPD} \quad (8)$$

met de VPD in  $\text{g.kg}^{-1}$ . Tenslotte heeft de bodemvocht functie de volgende vorm:

$$\begin{aligned}
 f(\Theta) &= 0 && \text{Voor } \Theta \leq \Theta_{wp} \\
 &= (\Theta - \Theta_{wp}) / (\Theta_{red} - \Theta_{wp}) && \text{voor } \Theta_{wp} < \Theta < \Theta_{red} \\
 &= 1 && \text{voor } \Theta \geq \Theta_{red}
 \end{aligned} \tag{9}$$

$K_r$ ,  $K_T$ ,  $K_{shd}$ ,  $K_{exp}$ , zijn parameters die samen met  $g_{s,max}$  door middel van niet lineaire regressie vastgesteld kunnen worden.  $T_L$  en  $T_H$  zijn temperatuur limieten van respectievelijk  $0^\circ\text{C}$  en  $40^\circ\text{C}$ ,  $a$  is gelijk aan  $(T_H - K_T) / (K_T - T_L)$ ,  $\Theta_{wp}$  is het bodemvochtgehalte bij het verwelkingspunt (wilting point) en  $\Theta_{red}$  is het bodemvochtgehalte waarbij de verdamping wordt gereduceerd.

Men dient zich te realiseren dat dit model empirisch is. Daarom dient men voorzichtigheid betrachten bij het gebruiken van het Jarvis-Stewart model voor een bepaalde lokatie of vegetatie, met behulp van een dataset die ergens anders verzameld is. Voor vergelijking van parameter waarden verkregen uit verschillende datasets moeten identieke algebraïsche formuleringen aangehouden worden (Ogink-Hendriks, 1995).

In het geval dat de onderste laag van het model kale bodem is, wordt gebruik gemaakt van een bodemweerstand,  $r_s^s$ . Deze is afhankelijk van de doorlatendheid en de differentiële vocht capaciteit van het bovenste bodemkompartiment. Het model houdt geen rekening met de aanwezigheid van een strooisellaag.

#### bodemvocht

SWAPS simuleert verticale water fluxen in de onverzadigde zone van een heterogeen bodemprofiel met wateronttrekking door wortels. Dit deel van het model is gebaseerd op het SWATRE model (Feddes et al., 1978; Belmans et al., 1983; Feddes et al., 1988). Richard's vergelijking wordt aldus opgelost:

$$\frac{\delta h}{\delta t} = \frac{1}{C(h)} \frac{\delta}{\delta z} \left( K(h) \left( \frac{\delta h}{\delta z} + 1 \right) \right) - \frac{S(h)}{C(h)} \tag{10}$$

hierbij is  $h$  de drukhoogte (cm),  $t$  is de tijd (d),  $C(h) = d\theta/dh$  is de differentiële vocht capaciteit ( $\text{cm}^{-1}$ ),  $z$  is de diepte beneden maaiveld (cm),  $K(h)$  is de doorlatendheid ( $\text{cm.d}^{-1}$ ) en  $S(h)$  is de water onttrekking door wortels ( $\text{d}^{-1}$ ). De aktuele verdamping wordt aan de hand van gewogen gemiddelden voor wortelintensiteit, beschikbare hoeveelheid bodemvocht en bedekkingsfrakties, onttrokken aan de verschillende bodemkompartimenten.

Het bodemprofiel is hiertoe opgedeeld in verschillende kompartimenten van gelijke hoogte. Deze kompartimenten kunnen verschillende bodemfysische eigenschappen ( $k$ - $h$ - $\theta$  relaties) hebben. Aan de onderkant van het bodemprofiel kunnen verschillende randvoorwaarden (drukhoogte of flux) worden gedefinieerd. Daarnaast kan het model de relatie beschrijven tussen het open water en het freatische grondwater met behulp van drainage weerstanden.

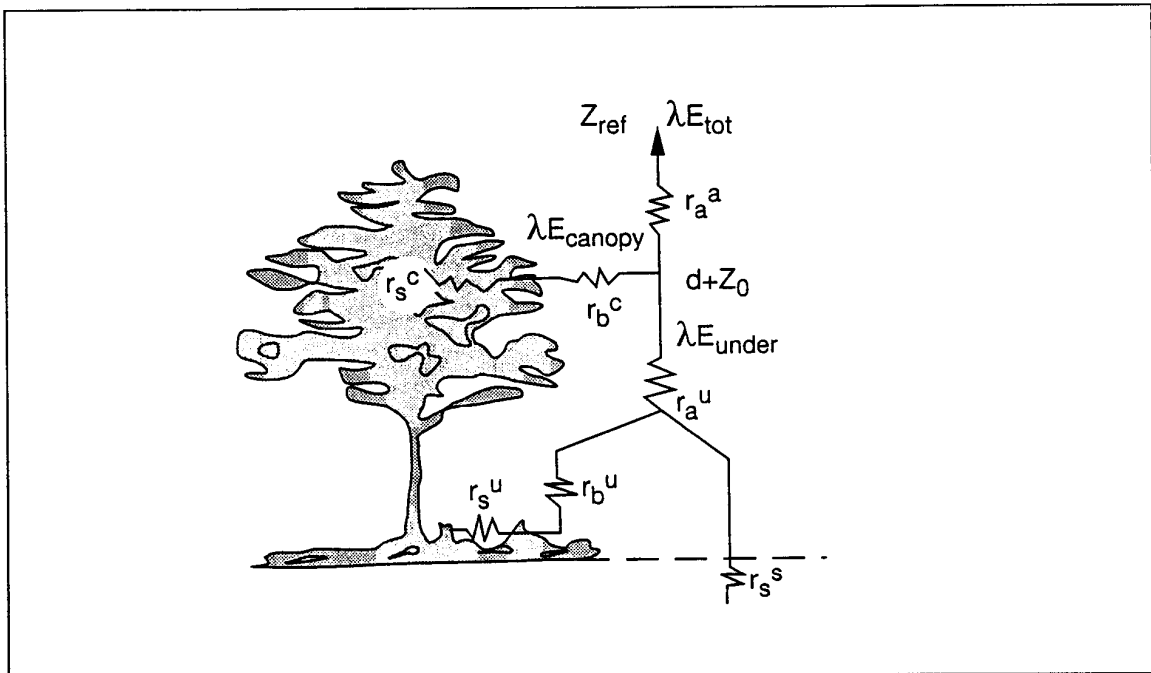
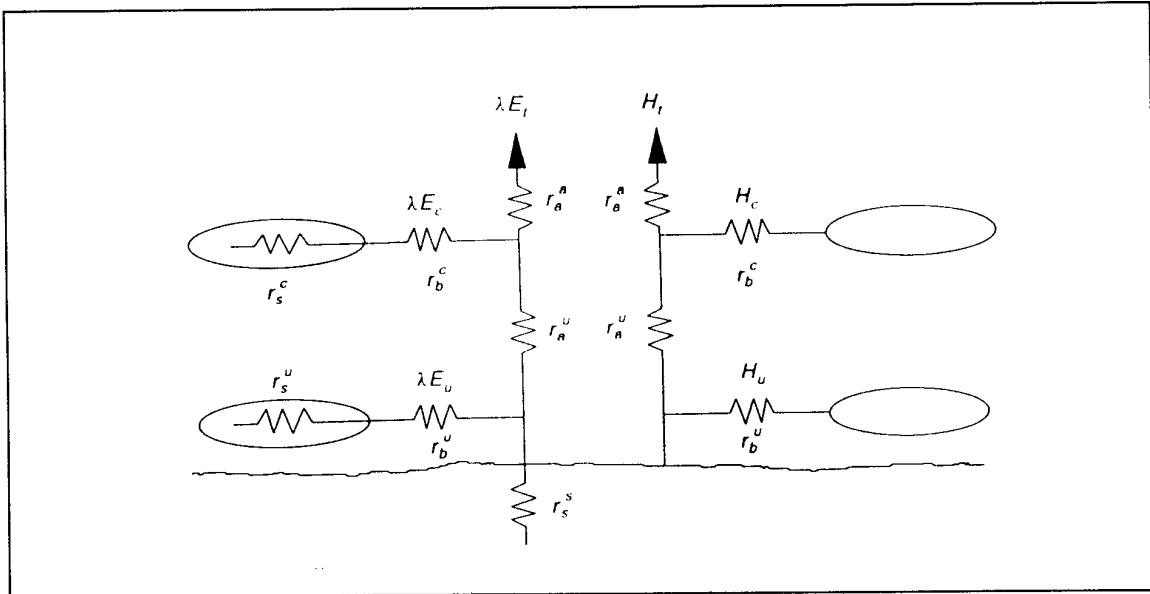


Fig. 2; Twee weerstandsdiagrammen van SWAPS. De subscripts a, b en s verwijzen naar aerodynamische, grenslaag en oppervlakte weerstand, de superscripts a, s, u, c naar totaal (all), bodem, onderlaag en bovenlaag. H en  $\lambda E$  zijn de voelbare en de latente warmte flux.

## 4 METHODE

### Kalibratie

Het verdampingsmodel SWAPS is gekalibreerd met meetgegevens uit de periode 1 tot 10 augustus 1988. De verdamping van de pijpestrootje vegetatie is gesimuleerd volgens het concept van twee lagen met volledige bedekking ( $\alpha = \beta = 1$ ). Pijpestrootje is de bovenlaag, terwijl de bodem als onderlaag wordt beschouwd. Dit betekent dat  $r_s^u$  en  $r_b^u$  (zie Fig. 2) niet worden gesimuleerd. De parameters van het Jarvis-Stewart model, zoals hierboven gedefinieerd, zijn vastgesteld door middel van "trial en error" optimalisatie. Andere vegetatie afhankelijke parameters staan in tabel 2. Voor de periode 1 tot 10 augustus 1988 worden de latente warmte flux, zoals werd bepaald met "flux profile" methode, en de latente warmte flux berekend door SWAPS, met elkaar vergeleken. Hierbij vormen de standaard afwijking tussen het model en de metingen ( $SE = \sigma(UV/n)$ ; *Standard Error of Estimate*) en de door het model verklaarde variantie ( $R^2 = 1 - UV/TV * 100\%$ <sup>18</sup>;) belangrijke toetsingsgrootheden. De tijdstap voor de mikrometeorologische berekeningen in het model is gelijk aan de tijdsduur tussen twee meetwaarden; een half uur. De tijdstap voor de onverzadigde zone is variabel, maar meestal kleiner dan een half uur.

### Verifikatie

Ter toetsing van het verdampingsmodel is een verifikatie uitgevoerd met meetgegevens over de periode 6 juni tot 19 september 1989<sup>19</sup>. Vanzelfsprekend is hetzelfde concept ( $\alpha = \beta = 1$ ) en zijn dezelfde Jarvis-Stewart en vegetatie afhankelijke parameters als bij de kalibratie aangehouden. De verifikatie is getoetst aan het verschil tussen gesimuleerde en gemeten verdampingsfluxen en grondwaterstanden. De opbouw van de vegetatie alsmede de opbouw van de vegetatie van de varianten staat schematisch weergegeven in Fig. 3. De referentie hoogte bedroeg 2 m.

### Varianten

<sup>18</sup> TV=totale variantie, UV=niet verklaarde variantie:

$$TV = \sum_{i=1}^n (\lambda E_i - \lambda \bar{E})^2$$

$$UV = \sum_{i=1}^n (\lambda E_i - \lambda \hat{E}_i)^2$$

met  $\lambda E_i$ , de verdamping op tijdstip  $i$ ,  $\lambda \hat{E}_i$  de door het model berekende verdamping en  $\bar{E}$  de gemiddelde gemeten verdamping over de gehele periode.

<sup>19</sup> met een onderbreking van 1 tot 6 augustus.

*Verdamping van natuurterreinen*

---

Met behulp van het model SWAPS zijn een tweetal varianten doorgerekend waarin heterogeniteit wordt gesimuleerd. Beide varianten zijn doorgerekend met dezelfde meetgegevens uit 1989 als bij de verifikatie, waarbij de vegetatie-gebonden parameters van het model zijn aangepast (tabel 2).

**Tabel 2:** Vegetatie-afhankelijke parameters



	hoogte (m)	LAI (-)	wortel diepte (cm)	blad breedte (cm)	direkte doorval (- )	stam- afvoer (- )	berging (mm)	z0 (m)	d (m)
pijpestrootje	0.40	Fig. 1	50	1	15 % (**)	15 % (**)	0.3	Tab. 1	Tab. 1
berken	2	3	75	6	-	4 % (**)	0.5	0.2 (*)	1.4 (*)
veenmos	-	-	-	-	-	-	-	0.01	0.05

(\*)  $z_0 = 0.1 * h$ ,  $d = 0.7 * h$

(\*\*) % van de neerslag (Van Elewijck, 1990)

In de eerste variant 1 wordt gesimuleerd dat de vegetatie voor de helft uit pijpestrootje en voor de helft uit berken bestaat. Hierbij is de verdamping gesimuleerd volgens het concept van twee lagen (bedekking:  $\alpha = \beta = 0.5$ ) met een bovenlaag van berken-opslag en een onderlaag van pijpestrootje. Om toch de bodemverdamping te kunnen simuleren zijn de weerstanden van de onderste laag ( $r_s^u$ ) en de bodem ( $r_s^s$ ) parallel geschakeld (zie Fig. 2). Om recht te doen aan een gewijzigd windprofiel boven een berken-pijpestrootje vegetatie is de referentie hoogte zodanig verhoogd, dat de afstand tussen de referentie hoogte enerzijds en de nulvlakverplaatsing plus ruwheid anderzijds, gelijk bleef. Dit resulteerde in een referentie hoogte van 3.2 m.

Voor pijpestrootje zijn dezelfde parameters gebruikt als bij de kalibratie en verificatie sessies. De parameters die voor de berken opslag zijn gebruikt staan in tabel 2. Tot nu toe is het Jarvis-Stewart model nog niet toegepast op een berkenbos. Noodgedwongen is gebruik gemaakt van de enige studie waarbij het Jarvis Stewart model wordt toegepast op een loofbos in de gematigde streken. Dit is gedaan door Ogink-Hendriks (1995) voor een eikenbos (92%) met enkele berken (7%) op een zandgrond bij Ede in Nederland. De door haar gevonden en in deze studie voor berken gebruikte parameters staan in tabel 3.

**Tabel 3:** Parameters van het Jarvis-Stewart model voor een loofbos bij Ede (Ogink-Hendriks, 1995)

$g_{s,max}$	51	$mm.s^{-1}$
$K_r$	254.1	$W.m^{-2}$
$K_s$	16.8	$\square C$
$K_{shd}$	0.23	
$K_{exp}$	0.71	$kg.g^{-1}$

Bij de tweede variant 2 bestaat de vegetatie uit pijpestrootje en veenmos (bedekking:  $\alpha = \beta = 0.5$ ). Voor pijpestrootje zijn opnieuw dezelfde parameters gebruikt als bij de kalibratie en verificatie sessies. De veenmos laag is gesimuleerd als een bodem. Veenmos heeft immers geen huidmondjes en geen wortels, zodat het Jarvis-Stewart model niet van toepassing is. De eigenschappen van veenmos worden beschreven in een k-h- $\square$  functie (Schouwenaars en Vink, 1992). Variant 2 is op twee manieren doorgerekend: (1) met grondwaterstanden die overeen komen met de gemeten waarden, (2) met hoge grondwaterstanden, door middel van infiltratie vanuit sloten. De referentie hoogte is niet gewijzigd.

Makkink

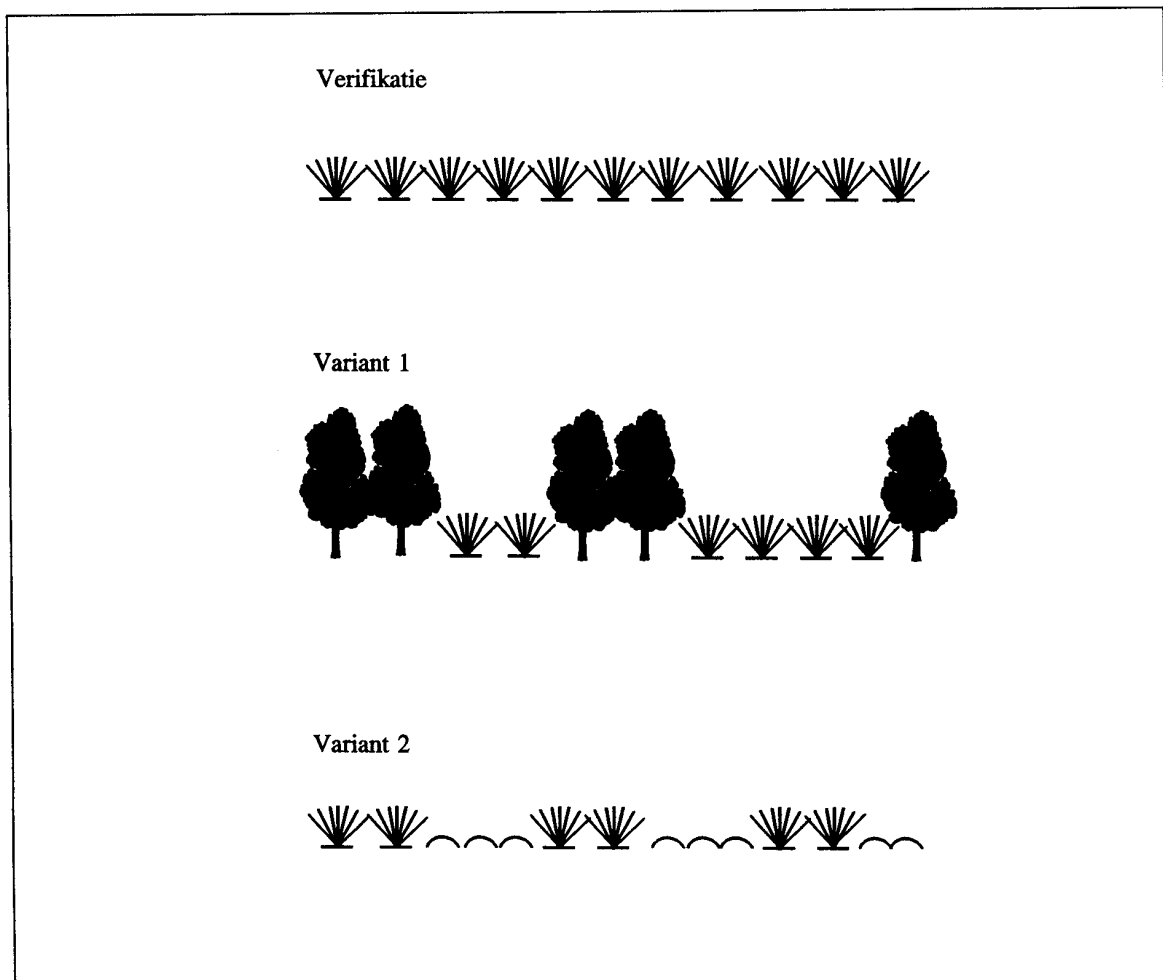
Met behulp van de meetgegevens is voor de verifikatie periode de Makkink verdamping uitgerekend:

$$\lambda E_{ref} = 0,65 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_s \quad (11)$$

hierbij is  $\lambda$  de specifieke verdampingswarmte van water ( $J.kg^{-1}$ ),  $E_{ref}$  de referentie verdamping ( $kg.m^{-2}.s^{-1}$ ) volgens Makkink en  $R_s$  de globale straling ( $W.m^{-2}$ ). Vervolgens is de ratio van de verdamping berekend met SWAPS en de verdamping volgens Makkink bepaald voor de pijpestrootje vegetatie, alsmede voor variant 1 en 2:

$$E_{SWAPS} = f * E_{ref} \quad (12)$$

Hierbij is  $E_{SWAPS}$  de verdamping uitgerekend met SWAPS ( $mm.d^{-1}$ ) en  $f$  is een gewasfactor. Strikt genomen is de ratio  $E_{SWAPS}/E_{ref}$  alleen gelijk aan de gewasfactor  $f$  indien de potentiële verdamping gelijk is aan de actuele verdamping.



**Figuur 3:** De opbouw van de vegetatie voor de verifikatie, variant 1 en variant 2.

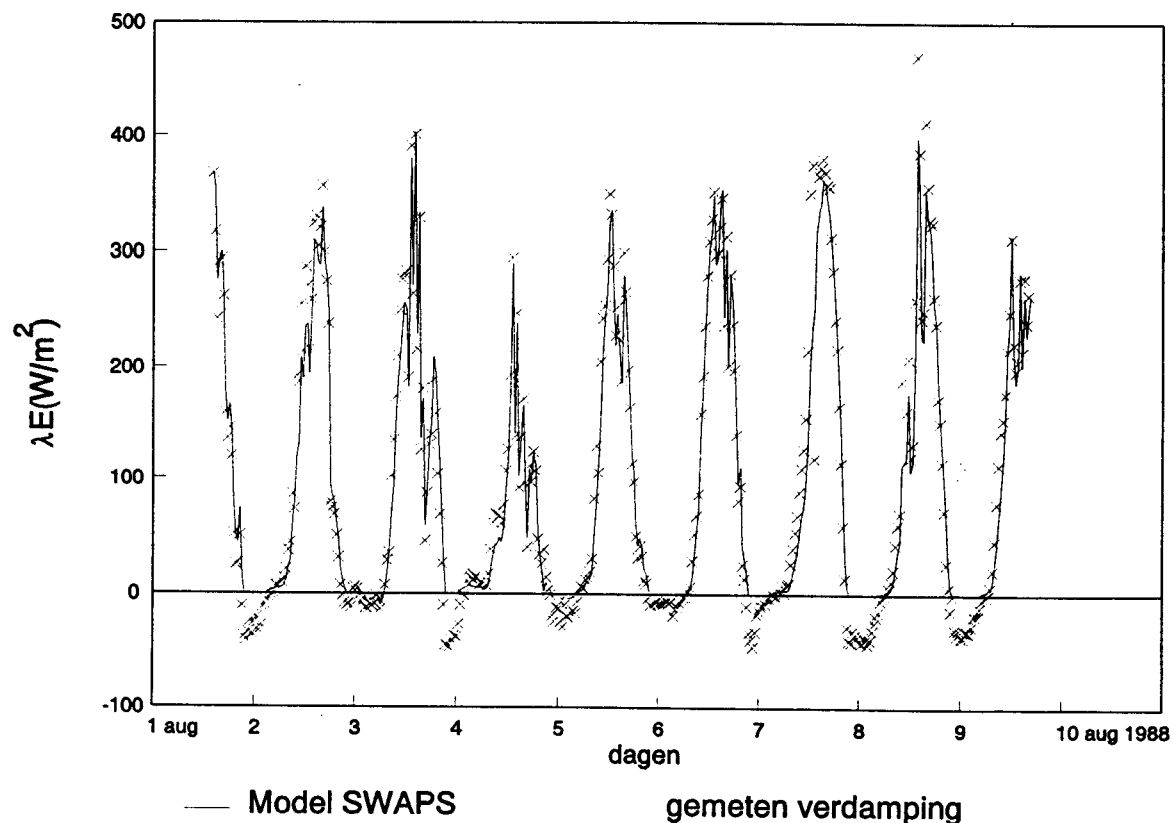
## 5 RESULTATEN

Kalibratie

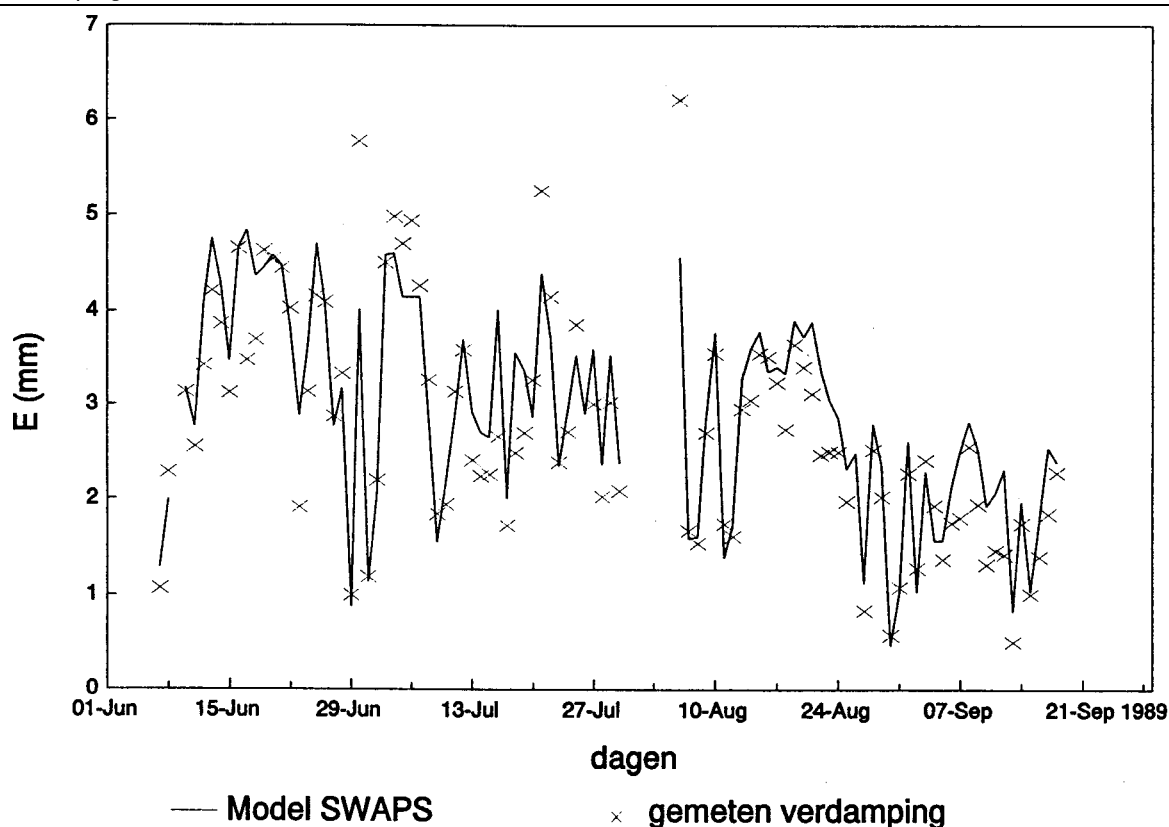
Optimalisatie van de Jarvis-Stewart parameters leidde tot een parameter set die in tabel 4 staat. De parameters  $\alpha_{wp}$  en  $\alpha_{red}$  van de bodemvochtfunctie  $f(\theta)$  zijn via omrekening met de  $k-h-\theta$  functie zijn op respectievelijk 0.30 ( $pF = 4.2$ ) en 0.60 ( $pF = 2$ ) bepaald (Schouvenaars en Vink, 1992). Gedurende de kalibratie werd de verdamping volgens het model nooit beperkt door bodemvochttkortten. In Fig. 4 zijn de gemeten en de berekende verdamping van pijpestrootje uitgezet over de periode 1 tot 10 augustus 1988. De standaard afwijking tussen het model en de metingen, bedraagt  $29.7 \text{ Wm}^{-2}$ . De door het model verklaarde variantie bedraagt 94.4 %.

**Tabel 4;** Geoptimaliseerde parameters van het Jarvis-Stewart model voor de Engbertsdijksvenen. ( $SE = 29.7 \text{ Wm}^{-2}$ ,  $R^2 = 94.4 \%$ )

parameter	optimum	unit
$g_{s,max}$	45	$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$
$K_r$	250	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
$K_s$	15	$^{\circ}\text{C}$
$K_{shd}$	0.10	-
$K_{exp}$	0.90	$\text{kg}\cdot\text{g}^{-1}$



**Figuur 4:** De gemeten en berekende latente warmte fluxen bij de kalibratie.

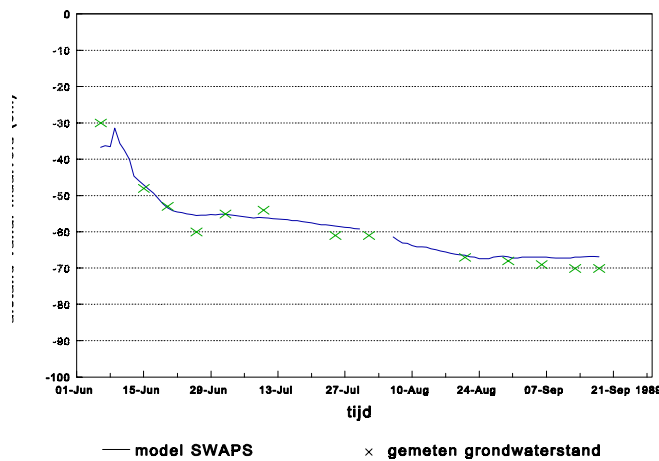


**Figuur 5:** De gemeten en berekende verdamping per dag bij de verifikatie.

#### Verifikatie

Met de parameters uit tabel 2 en 4 en met de meetgegevens uit de periode 6 juni tot 19 september 1989 is een verifikatie uitgevoerd. In Fig. 5 staan de door het model gesimuleerde en de uit de "flux profile" metingen berekende verdamping, per dag afgebeeld. Hiertoe zijn alle halfuur-waarden voor de genoemde periode opgeteld. De standaard afwijking tussen het model en de metingen, berekend over alle meetpunten ( $n=4746$ ) bedroeg  $34.1 \text{ Wm}^{-2}$ , terwijl 91.3% van de variantie door het model werd verklaard. In Fig. 5 is te zien is dat het model SWAPS de gemeten verdamping in lichte mate overschat. De totale verdamping van de "flux profile" metingen en het model bedragen resp. 263.1 mm en 278.8 mm, de gemiddelden bedragen resp. 2.77 mm per dag en 2.93 mm per dag.

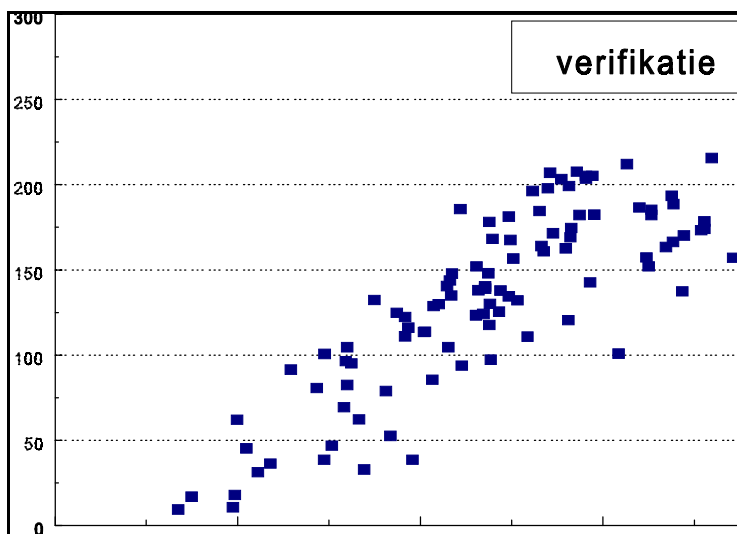
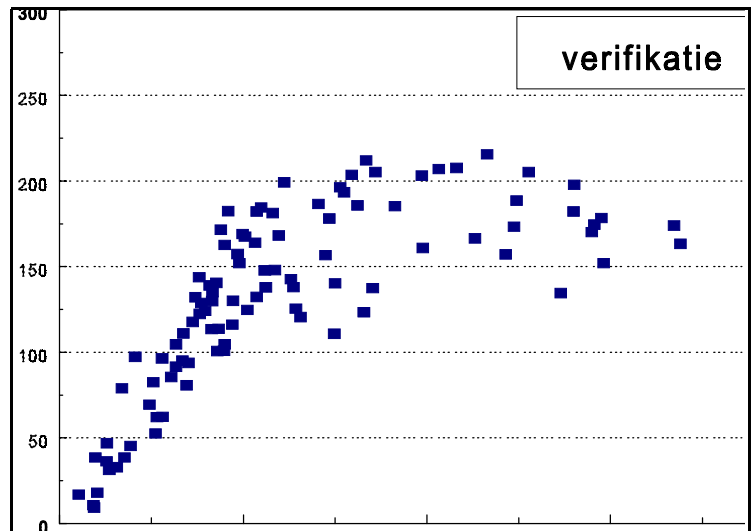
De gemeten en berekende grondwaterstanden zijn afgebeeld in Fig. 6. De waargenomen en berekende standen ontlopen elkaar weinig. De latente warmte flux  $\Delta E$  van de pijpestrootje (transpiratie) is uitgezet tegen de beschikbare energie ( $A = R_n - G$ ) en tegen het dampdrukdeficiet (VPD) in Fig. 7. De transpiratie van pijpestrootje is redelijk lineair gekoppeld aan  $A$  ( $r^2=0.70$ ). Deze relatie komt redelijk goed overeen met de relatie ( $r^2=0.62$ ) die Lafleur en Roulet (1992) vonden voor een zeggemoeras in Canada met vergelijkbare ruwheden. De transpiratie van pijpestrootje is echter slechts tot een dampdrukdeficiet van 5 hPa lineair gekoppeld aan het dampdrukdeficiet, daarna buigt de curve af. Bij een toename van het dampdrukdeficiet tot boven 10 hPa neemt transpiratie weer af. De verdeling van de verdamping over de verschillende termen zoals berekend door het model staat in tabel 5. Opvallend is het hoge aandeel van de bodemverdamping (17 %) bij de verifikatie. Gedurende de gehele verifikatie werd de verdamping niet beperkt door bodemvochttekorten.



**Figuur 6:** Gemeten en berekende grondwaterstanden

**Figuur 7;** Links: De relatie tussen de beschikbare energie ( $R_n - G$ ) en de latente warmte flux ( $\Delta E$ ) voor pijpestrootje (transpiratie) gemiddeld per dag bij de verifikatie. Ieder data punt stelt één dag voor, waarbij  $R_s > 0$ .

**Figuur 8 (onder):** idem voor de relatie tussen het dampdrukdeficiet (VPD) en de latente warmte flux ( $\Delta E$ ).



	verif.	var. 1	var. 2 (*)	var. 2 (**)
E <sub>boven</sub>	77.3 %	48.5 %	94.4 %	42.5 %
E <sub>onder</sub>	-	44.8 %	-	-
I <sub>boven</sub>	5.4 %	4.5 %	5.1 %	3.6 %
I <sub>onder</sub>	-	2.2 %	-	-
E <sub>bodem</sub>	17.3 %	-	0.5 %	53.9 %
E <sub>totaal</sub>	278.8 mm	268.1 mm	188.8 mm	257.9 mm

(\*) bij lage grondwaterstand

(\*\*) bij hoge grondwaterstand

#### Variant 1: 50% berken, 50% pijpestrootje

Volgens het model vermindert de verdamping van een berken-pijpestrootje vegetatie ten opzichte van de verdamping van een pijpestrootje vegetatie (resp. 268.1 mm en 278.8 mm). Het aandeel van de berken in de verdamping was iets groter dan het aandeel van pijpestrootje. De oorzaak hiervan ligt in het feit dat verschillende ruwheden en Jarvis-Stewart parameters sets zijn gebruikt voor pijpestrootje en berken.

De  $\Delta E$  (transpiratie) van zowel de berken als pijpestrootje is uitgezet tegen de beschikbare energie ( $A = R_n - G$ ) en het dampdrukdeficiet (VPD) in Fig. 9 en 10. De transpiratie van pijpestrootje vertoont een sterke relatie met de beschikbare energie ( $r^2 = 0.87$ ), terwijl deze relatie voor berken minder sterk is ( $r^2 = 0.79$ ). De koppeling van de transpiratie van pijpestrootje met het dampdrukdeficiet buigt opnieuw af bij circa 5 hPa. Bij berken blijft de transpiratie wel toenemen bij een oplopend dampdrukdeficiet.

#### Variant 2: 50% pijpestrootje, 50% veenmos

Toepassing van het model voor deze vegetatie opbouw leidde tot een enorme reductie van de verdamping. Deze reductie kwam bijna helemaal voor rekening van de veenmos (tabel 5). Vanwege de diepe grondwaterstanden was de kapillaire opstijging onvoldoende om het veenmos-oppervlak van water te voorzien, zodat de verdamping van veenmos tot vrijwel nul werd gereduceerd. De globale straling op het veenmos werd in het model hierdoor grotendeels omgezet in voelbare warmte. Dit leidde tot temperaturen van het veenmos oppervlak die overdag opliepen tot circa 80-90 °C. Dit is niet erg realistisch. Het voorkomen van veenmos bij dergelijke grondwaterstanden is dan ook niet waarschijnlijk. Deze toepassing van het model wordt verder dan ook niet bediscussieerd.

In een situatie waarbij, door middel van infiltratie, de grondwaterstand niet dieper dan 20 cm onder maaiveld zakt, bedraagt de verdamping over de gesimuleerde periode 257.9 mm. Het aandeel van de verdamping vanaf veenmos was nu groter dan het aandeel van pijpestrootje (tabel 5). Uit Fig. 9 en 10 is af te leiden dat de verdamping van veenmos zeer sterk is gekoppeld aan de beschikbare energie ( $r^2 = 0.96$ ). Deze relatie is vrijwel identiek aan de relatie die zowel Price (1991) als Lafleur en Roulet (1992) vonden. Daarnaast is te zien dat de verdamping van veenmos blijft toenemen bij een oplopend dampdrukdeficiet. De koppeling van pijpestrootje aan zowel de beschikbare energie ( $r^2 = 0.59$ ) als aan het dampdrukdeficiet is matig.

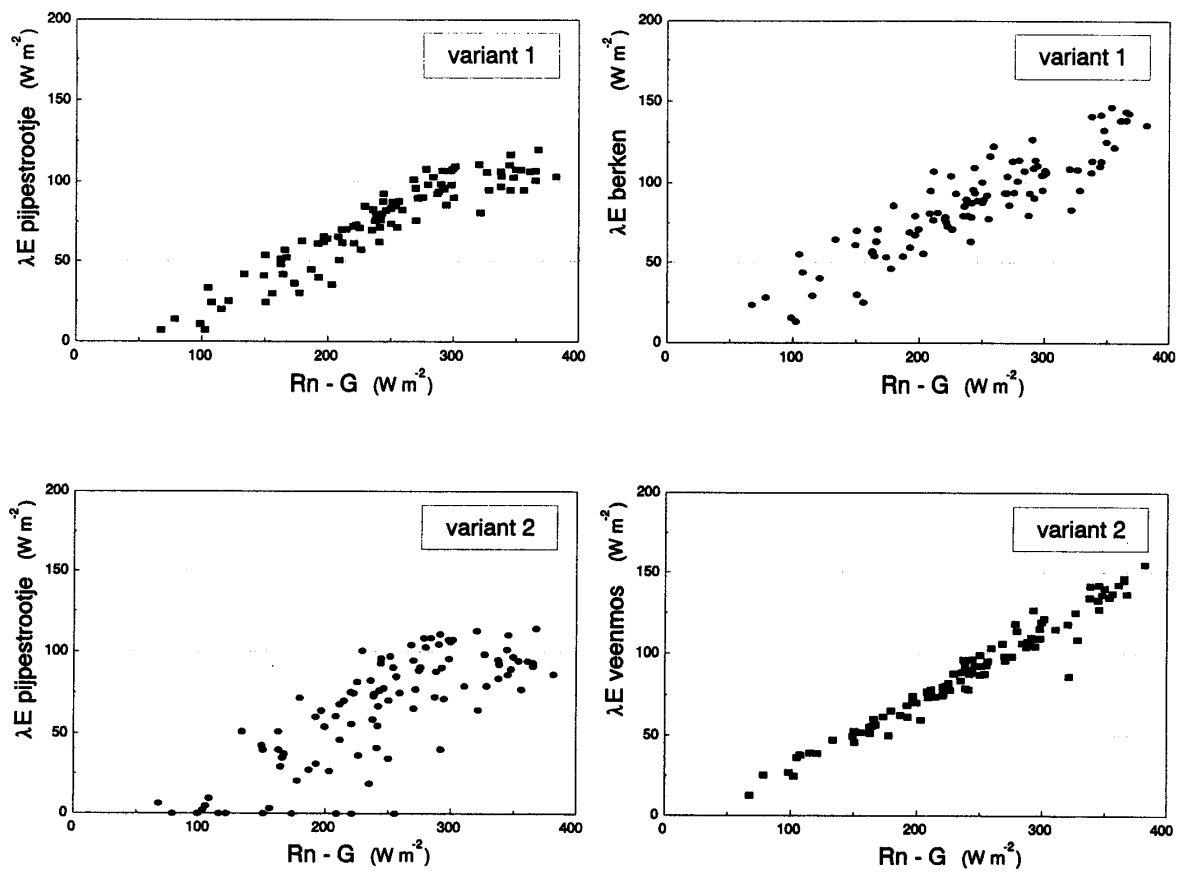


Fig. 9; De relatie tussen de beschikbare energie (Rn-G) en de latente warmte flux ( $\lambda E$ ), gemiddeld per dag, voor variant 1 en 2. Ieder data punt stelt één dag voor, waarbij  $R_s > 0$ .

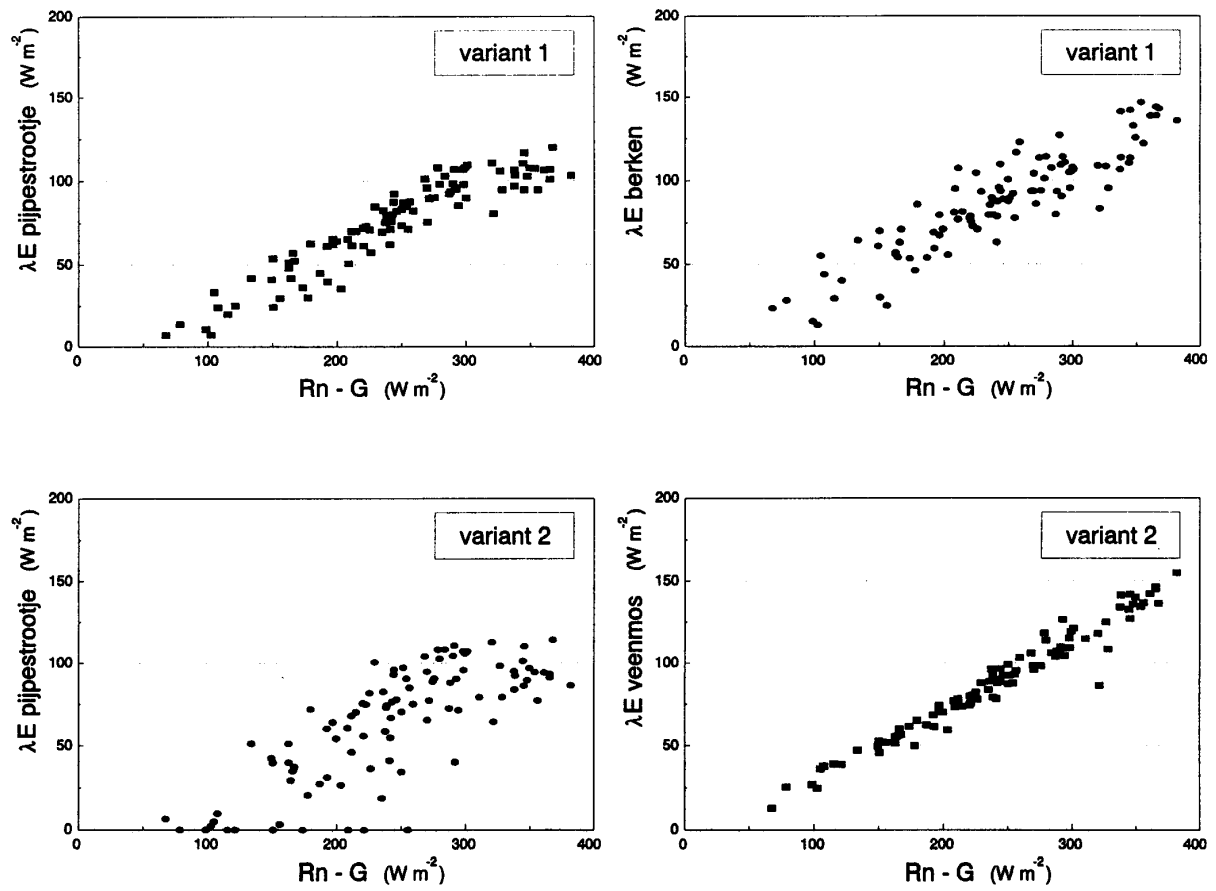


Fig. 10; De relatie tussen het dampdrukdeficiet (VPD) en de latente warmte flux ( $\lambda E$ ), gemiddeld per dag, voor variant 1 en 2. Ieder data punt stelt één dag voor, waarbij  $R_s > 0$ .



## Makkink

In Fig. 11 is de ratio  $E_{SWAPS}/E_{ref}$ , uitgezet tegen de tijd. Alleen dagen met neerslag van minder dan 0.4 mm zijn geselecteerd, om interceptie-verdamping uit te sluiten.

De genoemde ratio voor de verifikatie (bereik: 0.77-1.15) en voor variant 1 (bereik: 0.75-1.09) verloopt overeenkomstig. Kenmerkend is dat na neerslag de ratio hoog is en vervolgens in enkele dagen flink zakt. Dit verschijnsel doet zich niet bij variant 2 (bereik: 0.49-1.08) voor. Hierbij valt op dat de schommelingen in de ratio relatief gering zijn, met uitzondering van twee lage waarden op 29 en 30 augustus. Bij de decade cijfers verloopt de ratio  $E_{SWAPS}/E_{ref}$  van de verifikatie en variant 2 overeenkomstig en wijkt variant 1 af. Terwijl de decade cijfers van variant 1 steeds rond 0.9 schommelen, nemen ze bij de verifikatie en variant 2 van 0.8 toe tot circa 1.0 en nemen vervolgens weer af tot 0.8.

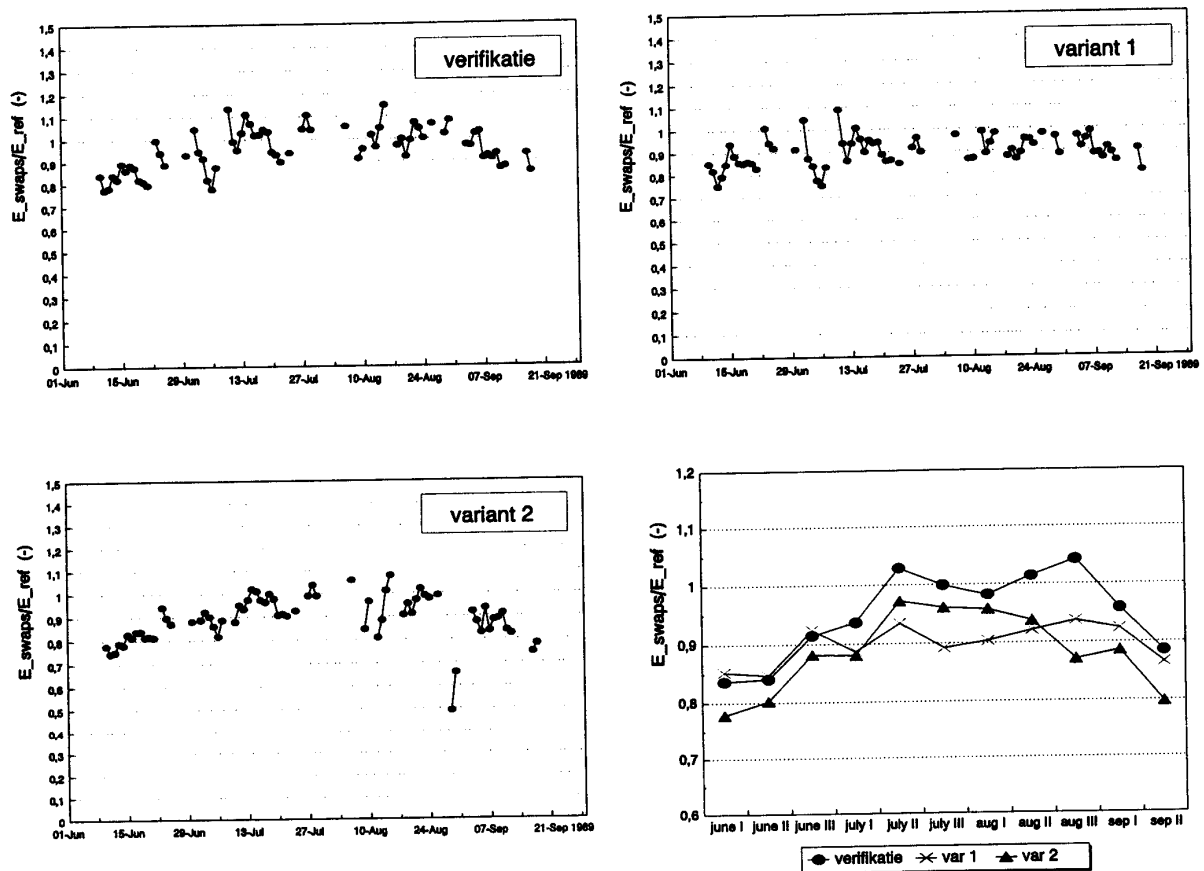


Fig. 11; De ratio  $E_{SWAPS}/E_{ref}$  uitgezet tegen de tijd, rechtsonder: ratio  $E_{SWAPS}/E_{ref}$  per decade.

Vervolgens is de fout uitgerekend die wordt gemaakt bij het gebruiken van Makkink gewasfactoren op decade basis, bij het inschatten van de dagelijkse verdamping. Hiertoe is met behulp van de decade-gewasfactoren uit Fig. 11 per dag de verdamping uitgerekend. Daarmee is de relatieve fout bepaald die wordt gemaakt ten opzichte van de modeluitkomsten, volgens:

$$\text{Relatieve fout} = \frac{E_{SWAPS} - f \cdot E_{ref}}{E_{SWAPS}} * 100\% \quad (13)$$

De resultaten staan in Fig. 12. Dagen met neerslag zijn in de berekeningen meegenomen. De relatieve fout bij variant 2 (pijpestrootje-veenmos) blijft in het algemeen beperkt tot minder dan 10 %, enkele uitschieters in augustus daargelaten. De relatieve fout van de verifikatie (pijpestrootje) en variant 1 (berken-pijpestrootje) loopt nu en dan op tot 20 % met uitschieters tot 40 %. Deze uitschieters lijken synchroon te lopen met de neerslag. Tevens is te zien dat de relatieve fout vaker positief dan negatief is.

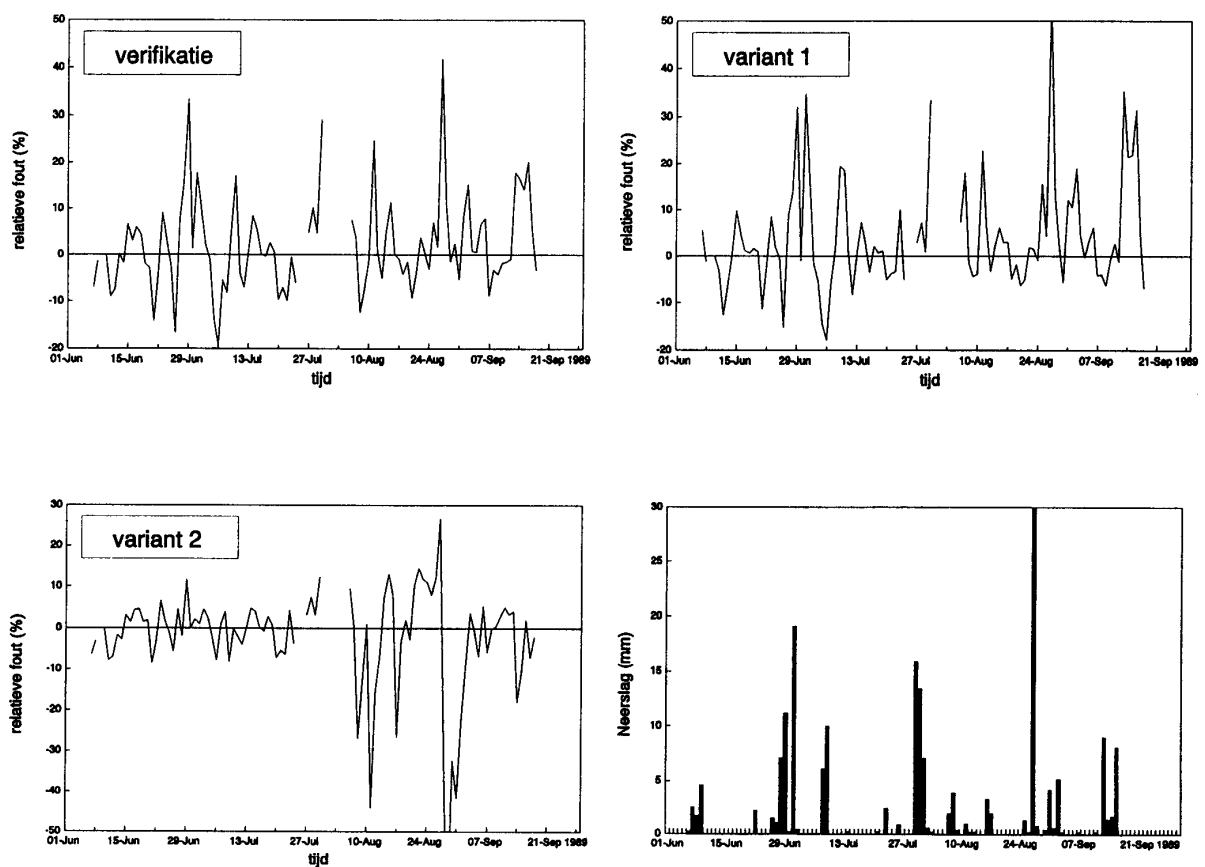


Fig. 12; De relatieve fout uitgezet tegen de tijd. Een positieve relatieve fout betekent een onderschatting van de verdamping door Makkink. Rechtsonder: de neerslag gedurende de simulaties van 1989.

## 6 DISKUSSIE

Het model SWAPS is in deze studie gebruikt omdat het een nauwkeurige beschrijving van water transport door vegetatie en onverzadigde zone heeft. Het nadeel hiervan is dat veel parameters nodig zijn om de relevante processen te beschrijven. Dit geldt vooral de beschrijving van de weerstanden/geleidbaarheden. Door "trial and error" optimalisatie is er een parameterset gevonden die zowel op de kalibratie als verifikatie runs tot goede resultaten leidde. De gekozen parameterset is plausibel te maken als ze vergeleken wordt met waarden uit de literatuur. Kelliher et al. (1995) komen tot een maximale geleidbaarheid voor natuurlijk grasland van circa  $20 \text{ mm.s}^{-1}$ . In acht nemend dat een gemodelleerde oppervlakte geleidbaarheid meestal hoger uitkomt dan een gemeten, vanwege het groot aantal reductie-factoren in vergelijking 5, lijkt de hier gevonden waarde van  $45 \text{ mm.s}^{-1}$  redelijk. Het is echter niet uit te sluiten dat andere combinaties van parameters ook op het oog goede resultaten zouden kunnen genereren.

Met de gebruikte parameterset was bij de verifikatie sprake van een kleine overschatting (6%) van de verdamping door het model. Deze overschatting heeft wellicht te maken met het feit dat 1988 natter en bewolkter was dan 1989. De uit de kalibratie (1988) verkregen parameters zijn afgeleid onder relatief iets nattere omstandigheden. Dit leidt in het drogere jaar 1989 tot een lichte overschatting van de verdamping.

**Tabel 6:** Weerstanden berekend door SWAPS (overdag;  $R_s > 0$ ) in  $\text{s.m}^{-1}$  bij verifikatie, variant 1 en 2.

	verif.	var. 1	var. 2 (*)
$r_a^a$	40	10	40
$r_a^u$	450	60	310
$r_s^c$	95	85	90
$r_s^u$	-	140	-
$r_b^c$	2	5	3
$r_b^u$	-	12	-
$r_s^s$	10	10	1

(\*) bij hoge grondwaterstand.

Uit Fig. 7,9 en 10 valt op dat de pijpestrootje in de verschillende opstanden verschillend reageert op de beschikbare energie ( $A = R_n - G$ ) maar niet op het dampdrukdeficiet (VPD). De uiteenlopende reactie van de transpiratie ( $\Delta E$ ) van pijpestrootje op de beschikbare energie kan worden verklaard aan de hand van oppervlakte-atmosfeer koppeling (McNaughton en Jarvis, 1983). In het geval dat pijpestrootje in combinatie met berken groeit, moet de verdampingsflux van pijpestrootje relatief een hoge aerodynamische weerstand ( $r_a^u + r_a^a = 70 \text{ s.m}^{-1}$ ; tabel 6) overwinnen (zie Fig. 2). De pijpestrootje staat als het ware beschut door de berken. In zo'n geval wordt de verdamping van pijpestrootje met name bepaald door de energie-term uit de Penman-Monteith vergelijking en minder door de windterm (turbulentie). Dit verklaart de hoge relatiecoëfficiënt tussen de beschikbare energie en de transpiratie van pijpestrootje in variant 1. Dit heeft belangrijke gevolgen voor het gebruik van de Makkink vergelijking (12). Deze vergelijking is immers gebaseerd op aanname van een lineair verband tussen verdamping en beschikbare energie. Naarmate de relatie tussen transpiratie en beschikbare energie beter is, is het

gebruik van een op de energieterm gebaseerde verdampings-formule, zoals Makkink, beter te verdedigen. In het geval van variant 1 is het gebruik van Makkink voor de beschutte pijpestrootje dus goed mogelijk, echter voor de hoger opgaande berken is dit moeilijker te rechtvaardigen.

Bij variant 2, waarbij de vegetatie uit veenmos en pijpestrootje bestaat, geldt dezelfde redenering. De verdamping van aerodynamisch gladde oppervlakten, zoals veenmos ( $r_a^u + r_a^a = 350 \text{ sm}^{-1}$ ), wordt slechts in geringe mate door atmosferische condities bepaald en is daardoor gevoelig voor schommelingen in de energie term. Dit leidt tot de sterke relatie tussen de beschikbare energie en de verdamping ( $r^2 = 0.96$ ) van veenmos, zodat de Makkink vergelijking hier goed te gebruiken is. De aerodynamische weerstand van pijpestrootje bij variant 2 is relatief laag ( $r_a^a = 40 \text{ sm}^{-1}$ ), zodat de verdamping mede afhangt van de aërodynamische term in de Penman-Monteith vergelijking. Dit heeft een matige relatie ( $r^2 = 0.59$ ) tussen energie en verdamping tot gevolg. Net als bij variant 1 betekent dit dat voor de beschutte vegetatie (veenmos) het gebruik van Makkink goed mogelijk is. Voor de aerodynamisch ruwere pijpestrootje van variant 2 is dit, net als bij de berken uit variant 1, minder goed mogelijk.

De vorm VPD grafieken (Fig. 10) kan worden geïnterpreteerd als een kwadratische curve. Het dampdrukdeficiet (VPD) zit immers twee maal in de tweede term van de Penman-Monteith vergelijking verwerkt. Eénmaal in de tweede term zelf en éénmaal via het Jarvis-Stewart model in de  $r_s$ . Bij een toename van de VPD bereikt de verdamping eerst een optimum en neemt daarna weer af, als gevolg van het sluiten van de huidmondjes. Dolman et al. (1988) vonden bij de toepassing van het Jarvis-Stewart model op een naaldbos een dergelijk optimum bij circa  $6 \text{ g.kg}^{-1}$  ( $0.6 \text{ hPa}$ ). Met name de kurven van pijpestrootje kunnen zo geïnterpreteerd worden, waarbij het optimum telkens op circa  $10 \text{ hPa}$  ligt (zie Fig. 7 en 10). De opbouw van de vegetatie lijkt hier dus geen invloed te hebben op de reactie van de verdamping van pijpestrootje-planten op de luchtvochtigheid. Bij de curve van berken lijkt het optimum nog niet bereikt bij  $15 \text{ hPa}$ . De curve van veenmos kan niet volgens bovenstaande theorie verklaard worden, want veenmos heeft geen huidmondjes. Bij veenmos wordt de verdamping dus niet afgeremd door middel van het sluiten van de huidmondjes. Naarmate het luchtvochtigheidsdeficiet toeneemt (Fig. 10) droogt het oppervlak van het veenmos uit, zodat de onverzadigde doorlatendheid van de bodem afneemt en daarmee de kapillaire opstijging. Dit leidt tot een reductie van de verdamping.

Het verloop van de ratio  $E_{\text{SWAPS}}/E_{\text{ref}}$  in de grafieken van Fig. 11 geeft aan dat het gebruik van de Makkink vergelijking voor het inschatten van de verdamping over langere perioden (decaden of langer) in het groeiseizoen mogelijk is. Dit impliceert dat Makkink bij waterbalans-studies of bij hydrologische effect studies met een grote tijdstap goed toepasbaar is. Het inschatten van de verdamping op dagbasis is echter niet mogelijk, omdat de ratio binnen enkele dagen 30 % kan variëren. In Fig. 12 wordt geïllustreerd dat bij een dergelijk gebruik van Makkink de fout in sommige gevallen tot 40 % kan oplopen. Bij studies waarbij gerekend wordt aan processen met een korte tijdschaal, waarbij dagwaarden juist belangrijk zijn, lijkt Makkink dus tekort schieten. Hierbij kan in het kader van verdrogingsstudies gedacht worden aan het verkrijgen van een gedetailleerd beeld van de voorjaarsgrondwaterstand of het bepalen van de dagelijkse inlaatbehoefte van een natuurgebied.

De relatief geringe schommelingen van de ratio  $E_{\text{SWAPS}}/E_{\text{ref}}$  en de geringe relatieve fout bij variant 2 zijn een gevolg van de sterke relatie tussen de verdamping en de beschikbare energie van met name veenmos (zie Fig. 9). Zoals hierboven reeds is uitgelegd, is dit een gevolg van de grote aerodynamische weerstand van veenmos. Bij variant 2 kan de Makkink vergelijking (met gewasfactoren) de dagelijkse verdamping dus redelijk benaderen. Bij de verifikatie en variant 1 is dit niet het geval. De vegetatie (pijpestrootje en berken-pijpestrootje) is aerodynamisch ruwer, waardoor de verdamping minder sterk gekoppeld is aan de beschikbare energie. Dit leidt tot fluktuaties in de ratio  $E_{\text{SWAPS}}/E_{\text{ref}}$  en een relatieve fout van 20% tot 40 %.

De schommelingen in de ratio  $E_{SWAPS}/E_{ref}$  van de verifikatie en variant 1 lijken gerelateerd te zijn aan het voorkomen van neerslag. Vlak na neerslag neemt de verdamping toe, zodat de ratio  $E_{SWAPS}/E_{ref}$  ook toeneemt. Hierna is een dalende trend in de ratio te onderscheiden. Dit verschijnsel doet zich het duidelijkst voor na 22 juni, na 1 juli en na 9 juli. Wellicht heeft dit te maken met een toename van de bodemverdamping na neerslag. Bij variant 2 blijft de grondwaterstand steeds nabij maaiveld waardoor de bodemverdamping hoog blijft. Hier is een toename van bodemverdamping na neerslag dus niet aan de orde. Dit zou een verklaring kunnen zijn voor het feit dat het genoemde verschijnsel niet optreedt bij variant 2. Het al dan niet aanwezig zijn van een strooisellaag zal bij het optreden van bodemverdamping een belangrijke rol spelen.

Net als in vele andere natuurgebieden wordt de bodem van de Engbertsdijksvenen bedekt door een dergelijke strooisellaag. Deze laag kan bodemverdamping doen verminderen, anderzijds kan de interceptie in deze laag relatief groot zijn. In een studie naar de verdamping van een zegge vegetatie in Canada rapporteert Lafleur (1990), dat de strooisellaag (10-15 cm) een effectieve barriere voor bodemverdamping bleek. Lafleur (1990) meldt bovendien dat de strooisellaag steeds droog was, behalve tijdens neerslag. Enkele uren na neerslag was de strooisellaag al weer uitgedroogd en begon de bodemverdamping af te nemen. Alhoewel de bodem steeds vochtig was, bleef de strooisellaag relatief droog. De effecten van de strooisellaag op bodemverdamping en bodeminterceptie worden echter niet gekwantificeerd in het genoemde onderzoek. Men kan echter aannemen dat in de zomer de afname van de bodemverdamping als gevolg van een strooisellaag groter is dan de toename van de strooiselinterceptie. Ook in de Engbertsdijksvenen bleef de bodem steeds vochtig terwijl de strooisellaag sterk kon uitdrogen. Bovenstaand mechanisme is waarschijnlijk ook van toepassing op de Engbertsdijksvenen, zodat het aandeel bodemverdamping (17%) bij de verifikatie wellicht te hoog is. Het verdampingsmodel SWAPS gaat immers uit van een kale bodem. Hoe hoog dit percentage dan wèl zou moeten zijn is niet duidelijk.



---

## 7 KONKLUSIES

Aan de hand van deze studie kunnen de volgende belangrijke slotsommen genoteerd worden:

- 1-De structuur van de vegetatie beïnvloedt de processen die de verdamping bepalen. De verdamping van beschutte of lage delen van de vegetatie wordt goed voorspeld met behulp van op straling gebaseerde verdampingsformules, zoals Makkink. Voor onbeschutte of hoge vegetaties zullen dergelijke benaderingen te kort schieten, omdat in zo'n geval de turbulentie een rol gaat spelen bij de verdamping. Dit betekent dat voor heterogene vegetaties het gebruik van verdampingsformules die alleen rekening houden met de energieterm of alleen met de windterm, niet tot een goede inschatting van de verdamping leiden (zie ook Lafleur en Roulet, 1992). Een goede verdampingsformule die beide termen beschrijft is de Penman-Monteith vergelijking.
- 2-Makkink is niet toepasbaar voor het inschatten van de verdamping op dagbasis, wel voor het inschatten van de verdamping voor langere perioden. De fout in de verdamping uitgerekend met Makkink kan op dagbasis soms wel 20 % tot 40 % bedragen. Dus voor berekeningen aan processen met een korte tijdschaal is Makkink niet geschikt. Voor langdurige effectstudies of waterbalans studies is het gebruik van Makkink wel verdedigbaar.
- 3-Indien aanwezig, kan de strooisellaag een rol spelen in het verdampingsgedrag van een natuurterrein. De mate waarin een strooisellaag invloed heeft op de bodemverdamping en bodeminterceptie is niet helemaal duidelijk.
- 4-Het ontbreken van wortels en huidmondjes bij veenmos betekent dat bij een dergelijke vegetatie met name de fysische eigenschappen van het veenmos de verdamping bepalen. Het verschil tussen vaatplanten en niet-vaatplanten is dus relevant voor de verdamping.





---

**LITERATUUR**

- Ashby, M., Moors, E.J., Ogink-Hendriks, M., Kabat, P. en Dolman, A.J., 1996. Technical description of the soil vegetation atmosphere model SWAPS. Technical document, Winand Staring Centre, Wageningen.
- Belmans, C., Wesseling, J.G. en Feddes, R.A. 1983. Simulation model of the water balance of a cropped soil: Swatre. *J. of Hydrology*, 63:271-286.
- Dolman, A.J., Stewart, J.B. en Cooper, J.D., 1988. Predicting forest transpiration from climatological data. *Agric. For. Meteorol.*, 42:339-353.
- Dolman, A.J., 1993. A multiple-source land surface energy balance model for use in general circulation models. *Agric. For. Meteorol.*, 65:21-45.
- Duyzer, J. en Bosveld, F., 1988. Measurements of dry deposition fluxes of O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub> SO<sub>2</sub> and particles over grass/heathland vegetation and the influence of surface inhomogeneity. TNO en KNMI, rapport R-88/11.
- Feddes, R.A., Kowalik, P.J. en Zaradny, P.J. 1978. Simulation of field water use and crop yield. Pudoc, Wageningen.
- Feddes, R.A., Kabat, P., Van Bakel, P.J.T., Bronswijk, J.J.B. en Halbertsma, J. 1988. Modelling soil water dynamics in the unsaturated zone - state of the art. *J. of Hydrology*, 100:69-111.
- Jarvis, P.G., 1976. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philos. Trans. R. Soc. Ser. B*, 273:593-610.
- Kelliher, F.M., Leuning, R., Raupach, M.R. en Schulze, E.-D., 1995. Maximum conductances for evaporation from global vegetation types. *Agric. For. Meteorol.*, 73:1-16.
- Lafleur, P.M., 1990. Evapotranspiration from sedge-dominated wetland surfaces. *Aquat. Bot.*, 37:341-353.
- Lafleur, P.M. en Roulet, N.T., 1992. A comparison of evaporation rates from two fens of the Hudson Bay Lowland. *Aquat. Bot.*, 44:59-69.
- McNaughton, K.G. en Jarvis, P.G., 1983. Predicting effects of vegetation changes on transpiration and evaporation, in: T.T. Kozlowski (editor), *Water deficits and plant growth*. Vol 7, Academic press, New York, pp. 1-47.
- Moors, E.J., Stricker, J.N.M. en Van den Abeele, G.B., 1995. Evapotranspiration of cutover bog covered by *Molinia Caerulea*. Concept report.
- Ogink-Hendriks, M.J. 1995. Modelling surface conductance and transpiration of an oak forest in The Netherlands. *Agric. For. Meteorol.*, 74:99-118.

Price, J.S., 1991. Evaporation from a blanket bog in a foggy coastal environment. *Boundary-Layer Meteorol.*, 57:391-406.

Rutter, A.J., Kershaw, K.A., Robins, P.C. en Morton, A.J., 1971. A predictive model of rainfall interception in forests. I. Derivation of the model from observation in a plantation of Corsican pine. *Agric. Meteorol.*, 9:367-384.

Schouwenaars, J.M., 1990. Problem-orientated studies on plant-soil-water relations. proefschrift, Landbouwniversiteit Wageningen.

Schouwenaars, J.M. en Vink, J.P.M. 1992. Hydrophysical properties of peat relicts in a former bog and perspectives for *Sphagnum* regrowth. *International Peat Journal*, 4:15-28.

Shuttleworth, W.J. en Wallace, J.S., 1985. Evaporation from sparse crops - an energy combination theory. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 111:839-855.

Stewart, J.B., 1988. Modelling surface conductance of pine forest. *Agric. For. Meteorol.*, 43:19-35.

Van Amerongen, F., Dijkma, R. en Schouwenaars, J.M., 1990. Hydrologisch onderzoek in het hoogveengebied De Engbertsdijkvenen. Dept. Water Resources., Wageningen Agricultural University, report 10.

Van Elewijck, L., 1990. Stamafvloeï op landbouwgewassen en bomen. Proefschrift, Katholieke Universiteit Leuven.

**DEEL 3**

**ADVIES**



---

## **1 INLEIDING**

Het doel van dit deel van het onderzoek naar de verdamping van natuurterreinen is:

- a) het ontwikkelen van richtlijnen voor de toepassing van de beschikbare kennis over de verdamping van natuurterreinen bij de voorbereiding van verdrogingsprojecten.
- b) het doen van suggesties voor op korte termijn aan te brengen verbeteringen in de model beschrijvingen.
- c) het, indien noodzakelijk, adviseren over vervolgonderzoek.

In deze rapportage worden deze drie aandachtspunten besproken. Allereerst wordt de literatuurverkenning (deel 1) nog eens tegen het licht gehouden met de opgedane kennis uit de modelverkenning.



## **2 DE BETEKENIS VAN DE STRUKTUUR VAN DE VEGETATIE VOOR DE VERDAMPING**

De in de literatuurverkenning (deel 1) gebruikte indeling van natuurgebieden is gebaseerd op een landschappelijke typering (graslanden, duinen, heide, laagvenen, hoogvenen). Deze landschappelijke indeling laat echter niet altijd de verschillen in verdampingskenmerken voldoende tot zijn recht komen. Zo kunnen bijvoorbeeld binnen een laagveengebied qua structuur zeer verschillende vegetaties of begroeiingstypen voorkomen. Vanuit open water ontwikkelt zich op lange termijn door verlanding bos. Wordt hier 's zomers gemaaid dan ontstaan trilvenen, terwijl bij wintermaaien rietlanden ontstaan. Zowel trilvenen als rietlanden kunnen zich onder een maai-beheer na enkele tientallen jaren ontwikkelen tot veenheide, waarin veel veenmossen voorkomen (hoogveentjes). Bij zomermaaien ontwikkelt zich vaak een schraalgrasland. Wordt er gestopt met maaien dan zal zich via struweelvorming na verloop van tijd een bos ontwikkelen.

In een heideterrein kan een oude heide ontstaan, met een dikke strooisellaag en met veel oude plantenresten. Een vergraste heide vertoont een mozaïek van grassen en heideplanten. Na afplaggen ontstaat een korte heide met veel jonge planten. Ook in duingebieden leidt uitgraven en/of afplaggen van valleien tot een hernieuwde successie vanuit open water of natte plaatsen. Hier vormt zich eerst een korte open begroeiing die zich vervolgens via ophoping van organisch materiaal ontwikkelt tot een struweel.

Het is duidelijk dat het successiestadium waarin een terrein zich bevindt sterk bepalend is voor de verdamping. Daarom zijn de in deel 1 gevonden literatuur waarden voor gewasfactoren zelfs voor één terreintype (b.v. laagveen) zo verschillend. Het is beter een nieuwe indeling te ontwikkelen die meer recht doet aan de kenmerken van de terreinen en begroeiingstypen die van belang zijn voor de verdamping. Het gaat daarbij om de volgende criteria:

### Aerodynamische eigenschappen

In een open landschap met een korte vegetatie (heide, hoogveen) blijkt vooral de beschikbare energie (straling) de dominerende faktor voor de verdamping. In heterogene gebieden met een afwisseling van open terrein en struweel of bos wordt de verdamping ook in hoge mate door de aërodynamische ruwheid (windwerking) beïnvloed. Ook de hoogte van de vegetatie heeft invloed op de verdamping. Wanneer een maai-beheer wordt gevoerd (trilveen, schraalgrasland, rietland) of er beweid wordt (grasland, heide) is er sprake van een korte vegetatie. Daarbij kan onderscheid gemaakt worden tussen de lage vegetaties, meestal in voedselarm terrein (korte zegge, heide) en middelhoge vegetaties, meestal in wat voedselrijker terrein (grote zegge, riet, lisdodde).

In de modelanalyse van deel 2 van dit onderzoek werd bovenstaande aangetoond. Gekonstateerd werd dat er een sterk lineair verband bestaat tussen verdamping van aerodynamisch "gladde" gewassen en beschikbare energie (straling). De verdamping van pijpestrootje liet een ander verband zien indien pijpestrootje gekombineerd voorkwam met veenmos of met berken. Het gebruik van Makkink en gewasfactoren is dus niet zonder meer mogelijk. Het welslagen van de Makkink vergelijking hangt af van het voorkomen van andere begroeiingen en hun bijdrage aan de totale aërodynamische weerstand.

### Grondwaterstand

In de literatuur wordt de hoogte van de grondwater vaak genoemd als een faktor van invloed op de verdamping. Hierbij kunnen we onderscheiden de rol die water op of nabij het maaiveld speelt in de evaporatie en de invloed op de transpiratie via wateropname door de plant. In het natte traject (grondwaterstanden ondieper dan 50 cm) zal vooral de evaporatie vanuit open water of vanuit de bovenste bodemlagen in de tijd sterk kunnen variëren. De wateropname door wortels is er nooit beperkend.

### Strooisel

Het model SWAPS, dat in deel 2 van dit onderzoek wordt gebruikt, modelleert geen strooisel interceptie. In werkelijkheid ligt op de gemodelleerde lokatie in de Engbertsdijkswenen een dichte afsluitende strooisellaag die zowel water onderschept, het vasthoudt en het weer laat verdampen. Bovendien heeft een strooisellaag grote invloed op de bodemwarmte balans en de vochthuishouding van de bodem. Deze processen zijn echter niet gemodelleerd. Er is dan ook erg weinig bekend over het gedrag van een strooisellaag in natuurterreinen met betrekking tot water en energiebalans. Meer experimenteel onderzoek, gekoppeld aan modellenwerk is hier nadrukkelijk gewenst.



### **3 DE PARAMETERISATIE VAN VERDAMPING VAN NATUURTERREINEN IN REGIONAAL HYDROLOGISCHE MODELLEN**

#### *3.1 Typen modellen*

Voor wat betreft de beschrijving van de verdamping kunnen twee soorten hydrologische modellen onderscheiden worden. In de eerste groep wordt de netto grondwateraanvoer, en daarmee de verdamping als een gegeven ingevoerd, terwijl in de andere groep de verdamping een variabele is die mede bepaald wordt door waterbeweging in de onverzadigde zone. Bij de tweede groep wordt de verdamping veelal berekend met een Makkink referentie verdamping, gewasfactoren en eventueel met een bodemvochtredukatie-functie.

Adekwat modelleren van grondwatertoevoer is in de eerste soort modellen problematisch omdat verdampingswater niet aan de verzadigde maar uit de onverzadigde zone wordt onttrokken. Omgekeerd geldt hetzelfde: een bui plonst, ook na verrekening van de verdamping, niet ineens in de verzadigde zone. Met name in situaties met lage grondwaterstanden en zogenaamde hangwaterprofielen kunnen hierdoor problemen ontstaan. In modellen als MODFLOW en MICROFEM is sprake van een dergelijke benadering (zie bijlage). Bij hoge grondwaterstanden is de methode om verdamping gelijk te stellen aan kapillaire nalevering ook uiterst discutabel. Verbetering van de parameterisatie van verdamping in natuurterreinen kan dan ook alleen plaatsvinden als koppelingen worden geïntroduceerd in de modellen tussen enerzijds verzadigde en onverzadigde zone en anderzijds onverzadigde zone en verdamping.

Van de onderzochte regionale modellen heeft SIMGRO de meest geavanceerde parameterisatie van verdamping. In SIMGRO is sprake van referentieverdamping, gewasfactoren en een reductie in verdamping als de hoeveelheid bodemvocht te beperkt wordt. Ook aan deze benadering, hoewel te prefereren boven de bovengenoemde, kleven een aantal bezwaren. Uit deel 2 is gebleken dat het gebruik van Makkink en gewasfactoren als een gemiddelde inschatting voor de verdamping over een langere periode redelijk werkt.

Voor de inschatting van de verdamping op dagbasis blijkt de Makkink vergelijking echter niet geschikt. Uit deel 2 werd duidelijk dat hierbij fouten in de orde van 20 tot 40% kunnen optreden. Een dergelijk kleine tijdschaal kan relevant zijn voor verdrogingsprojecten, bijvoorbeeld voor het verkrijgen van een gedetailleerd beeld van de voorjaarsgrondwaterstand of voor het simuleren van de dagelijkse wateraanvoer in een gebied.

In zulke gevallen is het noodzakelijk om op die tijdstapbasis balans berekeningen uit te voeren en is een korrekte inschatting van de verdamping op dagbasis noodzakelijk. Zoals eerder is opgemerkt, is hierbij vooral de structuur van de vegetatie alsmede het optreden van kale grondverdamping en interceptie verlies door strooisel belangrijk. Het berekenen van de verdamping van kale grond met Makkink is niet erg logisch als de kale grond verdamping juist afhangt van neerslag en vochtgehalte in de toplaag. In de toekomst zal dan ook overwogen moeten worden om ook in regionale modellen transpiratie en kale grond verdamping apart te modelleren. Verdere verfijning in de parameterisaties kan dan worden aangebracht als nieuwe resultaten en inzichten uit experimenteel onderzoek beschikbaar komen.

Wanneer we, op grond van de in 2. genoemde structuurkenmerken, de verdampingsgegevens, verkregen uit de literatuur, opnieuw interpreteren, kunnen voor een gering aantal begroeiingstypen gewasfactoren afgeleid worden. Deze kunnen in combinatie met Makkink verdampingswaarden gebruikt worden in hydrologische studies. Dit betreft vooral open en korte begroeiingen waarbij strooisel, kale bodem of mossen geen rol van betekenis spelen. Voor deze terreinen wordt een Makkink-gewasfaktor van 1.0 tot 1.1 geadviseerd.

Voor de grootste groep van vegetaties/terreintypen blijkt het niet goed mogelijk richtlijnen voor gewasfactoren te formuleren. De resultaten van de diverse studies vertonen hierbij grote verschillen. Bij nadere analyse blijkt het hierbij vooral te gaan om gebieden waar:

- 1) de accumulatie van organisch materiaal aan de oppervlakte een grote rol speelt. Daarbij kan een relatief grote oppervlakte worden ingenomen door organisch materiaal. De kapillaire nalevering van het bodemwater is er beperkt en daarmee wordt de verdamping erg afhankelijk van neerslagpatroon in de tijd. Dit geldt ook voor mosbegroeiingen waarbij accumulatie van organisch materiaal plaatsvindt direct onder de levende top laag. Ook hier zijn geen wortels en is de beschrijving van de waterbeweging in de bovenste bodemlagen onontbeerlijk voor de beschrijving van de verdamping.
- 2) Wanneer er sprake is van een heterogene structuur met afwisselend struweel, open vegetaties en open water of een gevarieerde hoogteligging is ook een grote spreiding zichtbaar. In dit soort gebieden (m.n. moeraskomplexen, duinen) blijkt een grote variatie in verdamping op te treden, wat wellicht een oorzaak heeft in de sterke variatie in aerodynamische weerstanden over korte afstanden en warmteuitwisseling (waterpartijen, advektie).

Op deze beide factoren (invloed strooisel en heterogeniteit) is uitgebreider ingegaan bij de bespreking van de resultaten van de modelverkenning.

De grote schommelingen in de Makkink gewasfactoren (deel 2) tonen aan dat problemen optreden bij het gebruik van Makkink. Deze afwijken schijnen gerelateerd te zijn aan het voorkomen van neerslag. In deel 2 werd een dalende trend van de gewasfaktor zichtbaar op *dagen na neerslag*. Daarnaast speelt het probleem van het gebruik van Makkink op *dagen met neerslag*. Het begrip potentiële verdamping is immers gedefinieerd als de verdamping vanaf een *droog*, goed van vocht voorzien gewas, terwijl Makkink pretendeert de potentiële verdamping te berekenen. Dit betekent dat, strikt genomen, de Makkink vergelijking niet gebruikt mag worden indien het gewas nat is (interceptie). Het is echter duidelijk dat dit in de praktijk wel gebeurt. In feite is dit een vergelijkbaar probleem dat optreedt bij het gebruik van Makkink voor bossen. Wellicht kan in de toekomst Makkink worden aangepast en bodemverdamping en interceptie simpel als aanvulling daarop gemodelleerd worden (zie par. 3.3).

Het gebruik van Makkink en gewasfactoren in het groeiseizoen zal misschien een redelijke schatting van de totale verdamping geven. In ecohydrologische voorspellingsmodellen is echter niet alleen het gemiddelde belangrijk maar ook de voorjaarsgrondwaterstand, of de laagste of hoogste grondwaterstand. Hierbij kan het dus belangrijk zijn het hele jaar (inklusief de winter) door met een grote mate van nauwkeurigheid de verdamping te modelleren.

*3.3 Aanbevelingen voor regionale modellen.*

Uit deel 2 is gebleken dat de structuur van een vegetatie vaak bepalend is voor de mate waarin de verdamping aan de straling gerelateerd is. In principe is dit verwerkt in de Penman-Monteith vergelijking (deel 1). Het gebruik van deze vergelijking verdient dan ook de voorkeur boven Makkink. Echter, in de Penman-Monteith vergelijking spelen de aerodynamische en oppervlakte weerstand een grote rol. De verhouding tussen deze weerstanden bepaalt in hoeverre de verdamping afhangt van de beschikbare energie en bepaalt dus ook *in welke mate* de verdamping goed voorspeld kan worden met Makkink. Bij gras ligt deze verhouding rond een waarde van 1, bij ruwere vegetaties is deze vaak een orde van grootte lager (0.1). Goed gebruik van de Penman-Monteith vergelijking vereist dus dat de weerstanden goed bekend zijn. Op dit moment ontbreken hiervoor echter de juiste gegevens. In paragraaf 4 van dit deel wordt hier verder op in gegaan.

Een direct toepasbare mogelijkheid om in regionale modellen de verdamping van natuurterreinen goed in te schatten is, wel Makkink gebruiken, maar deze als volgt te corrigeren voor bodem en interceptieverdamping:

$$E = \beta * f E_{ref} + (1 - \beta) * E_s + E_i \quad (1)$$

hierbij is E de totale verdamping van een natuurgebied,  $\beta$  de bedekkingsgraad van de vegetatie, f de gewasfactor van het natuurgebied,  $E_{ref}$  de Makkink verdamping,  $E_s$  de bodemverdamping en  $E_i$  de interceptie. Deze formulering is afgeleid van vergelijking (1) uit par. 2.2 van deel 1. De bodemverdamping  $E_s$  wordt uitgerekend op de eerste dag na neerslag als potentieel (Makkink verdamping) en daarop volgend verlopend met een functie afhankelijk van de tijd (zie deel 1; Ritchie, 1972):

$$E_s = \delta \sqrt{t+1} - \delta \sqrt{t} \quad (2)$$

waarin  $\delta$  een parameter waarde rond de 1, afhankelijk van bodemtype en t het aantal dagen na neerslag. Interceptie  $E_i$  zou gemodelld kunnen worden als fractie van de neerslag (10 a 15 %):

$$E_i = \alpha P \quad (3)$$

waarin  $\alpha$  een interceptie fractie voor het natuurterrein is.



---

#### 4 AANBEVELINGEN VOOR VELDEXPERIMENTEN TEN BEHOEVE VAN MODELONTWIKKELING

In de literatuurverkenning van deel 1 is sprake van een grote spreiding in de resultaten van het verzamelde verdampingsonderzoek. Gekonkludeerd werd dat dit aangeeft dat de gebruikte methoden de verdamping wellicht nog niet goed beschrijven en dat bepaalde processen over het hoofd worden gezien. Door systematisch, met dezelfde methoden, te meten én te modelleren kan de genoemde spreiding verklaard worden. Dit zou bovendien leiden tot een beter inzicht in de processen die ten grondslag liggen aan de uiteenlopende resultaten van de literatuurverkenning.

Metingen aan de verschillende componenten van de verdamping zijn een eerste vereiste om nauwkeurige verdampingsmodellen toe te passen op heterogene vegetaties. In dit onderzoek was het echter niet mogelijk om de totale verdamping op te delen in die van pijpestrootje en bodem/strooisel. Bijgevolg is het adequaat kalibreren en modelleren met SWAPS problematisch. Gezien de voorspelde verschillen in het verdampingsgedrag bij "verruwing" of "vergladding" is het echter van het grootste belang inzicht te krijgen in het relatieve belang van de verschillende componenten in de energie en waterbalans. Dit vereist een zorgvuldig, goed geplande meetopzet.

In de modelstudie van deel 2 is geen onderzoek verricht naar de verdamping van open wateroppervlakte in natuurterreinen. Het valt te verwachten dat de niet met water bedekte plekken als warmte eilanden kunnen gaan fungeren en dus de totale gebiedsverdamping omhoog kunnen schroeven. In principe valt dit met SWAPS te modelleren, al zijn er wel aanpassingen nodig.

Onbekendheid met de grootte van de winterverdamping blijft een bottleneck in het goed voorspellen van totale waterbalansen en voorjaarsgrondwaterstanden. Het verdient dan ook sterke aanbeveling een meetprogramma door de winter heen te laten uit voeren. Daarnaast is er behoefte aan kennis ten aanzien van de grootte en de spreiding van de aerodynamische en oppervlakte weerstanden van natuurterreinen. Deze zijn nodig bij het gebruik van de Penman-Monteith formule.

Het is dus dringend nodig dat er een breed gedragen onderzoek wordt opgestart naar verdamping van natuurterreinen dat poogt een systematisch beeld te geven van de belangrijke processen bij verdamping van natuurterreinen. Dit onderzoek zou als hoofddoel moeten hebben de in deze NOV studie geconstateerde leemtes in de kennis op te vullen. Het onderzoek moet gericht zijn op het vaststellen van de omvang van de verdampingsterm in de waterbalans van natuurgebieden met methodes, die een modelmatige interpretatie mogelijk maken. Hierdoor wordt extrapolatie naar andere gebieden mogelijk. Dit onderzoek zal in hoofdzaak experimenteel van aard zijn. De rol van een aantal belangrijke processen moet hierbij duidelijk worden, terwijl tegelijkertijd voldoende "vegetatie"dekkend gemeten wordt.

- de rol van open water verdamping in natuurterreinen
- het effect van het verhogen van de aërodynamische ruwheid op de verdamping van natuurterreinen
- de betekenis van bodem/strooiselverdamping in natuurterreinen
- de rol van interceptie verdamping in natuurterreinen
- het bepalen van de (mogelijke) spreiding in oppervlakte -en aerodynamische weerstanden en andere relevante verdampingsparameters van natuurterreinen.

daarnaast verdient aandacht:

- de rol van winterverdamping in de waterbalans van natuurterreinen.

Door het kiezen van goede lokaties, in lijn met de in deel 1 van de studie geconstateerde leemtes, moet dit programma in staat zijn binnen 5 jaar resultaten op te leveren. Mogelijke vegetatietypen waar de genoemde procesmatige kanten goed naar voren komen zijn:

<b>natte duinen</b>	-aerodynamische ruwheid dmv. mikrotopografie -rol open water -interceptie
<b>laagvenen</b>	-aerodynamische ruwheid dmv. verspreide boomopslag -open water -strooisellaag -interceptie
<b>heidevelden</b>	-strooisellaag -interceptie
<b>hoogvenen</b>	-open water -strooisellaag -interceptie

Een dergelijk onderzoek is te groot om door één onderzoeksgroep uitgevoerd te kunnen worden. Vanwege de grootte zal dit onderzoek breed gedragen moeten worden. Voorgesteld wordt dan ook te zoeken naar meerdere financieringsbronnen. Hierbij kan gedacht worden aan Waterwinbedrijven, Ministeries met directe belangen (LNV, VROM) en onderzoek organisaties (NWO). Partners in een dergelijk onderzoek kunnen zijn SC-DLO, RUG, LUW en VU.

## BIJLAGE

### VERDAMPINGSMODULEN IN REGIONALE HYDROLOGISCHE MODELLEN

#### SIMGRO

Simgro (SIMulation of GROundwater flow and surface water levels) is een regionaal hydrologisch rekenmodel voor stroming in de verzadigde zone, de onverzadigde zone en het oppervlakte water. Het model simuleert grondwaterstroming, verdamping, beregening, irrigatie, oppervlakte water, etc. Het te modelleren gebied wordt ingedeeld in verschillende landgebruikstypen. Simgro is ontwikkeld door het Staring Centrum (SC-DLO) ten behoeve van onderzoekstoepassingen.

#### **Bepaling potentiële verdamping**

Ten aanzien van de verdamping vereist Simgro als invoer: de (referentie) verdamping van gras, de verdamping van naaldbos en de verdamping van loofbos (per dag).

In het zomerhalfjaar moet bovendien voor landgebruikstypen anders dan bos, (landbouw, urbaan, natuur) per dag een gewasfactor worden opgegeven. Ter bepaling van de potentiële verdamping wordt deze gewasfactor vermenigvuldigd met de opgegeven referentie verdamping van gras. Daarnaast kan de verdamping van kale grond bepaald worden door een op te geven "fallow soil factor" te vermenigvuldigen met de referentie verdamping van gras.

In het winterhalfjaar wordt voor de landgebruikstypen grasland, urbaan en natuur, de referentie verdamping van gras aangehouden. Voor de landgebruikstypen akkerbouw wordt in de winter de verdamping van kale grond aangehouden.

#### **Bepaling actuele verdamping**

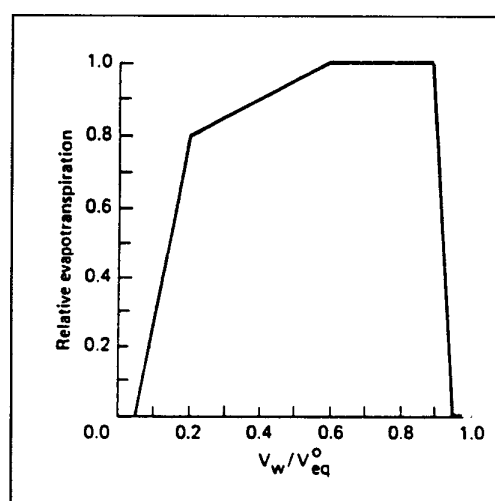
De actuele verdamping per landgebruikstype wordt als volgt berekend:

$$E_{akt} = \alpha E_{pot} \quad (1)$$

De "relatieve verdamping"  $\alpha$  is als volgt gedefinieerd:

$$\alpha = f(V_w/V_{eq}^o) \quad (2)$$

Het actuele vochtgehalte van de wortelzone,  $V_w$ , gedeeld door het evenwichts- vochtgehalte van de wortelzone bij een grondwaterstand vlak onder de wortelzone  $V_{eq}^o$ , wordt de uitdrogingsfactor genoemd. Het verband tussen de "relatieve verdamping" en de "uitdrogingsfactor" wordt geïllustreerd in figuur 1. Volgens dit figuur wordt de verdamping pas beperkt indien de verhouding  $V_w/V_{eq}^o$  daalt onder de 0.6. Indien deze verhouding daalt tot onder 0.2 neemt de verdamping zeer sterk af tot 0 bij een  $V_w/V_{eq}^o$  van 0.05. Voor verschillende landgebruikstypen (vegetaties) kunnen deze verhoudingen worden aangepast.



### NAGROM

Nagrom (NAtionaal GRONDwater Model) beschrijft de stroming van het diepe grondwater in de verzadigde zone. Het model is bedoeld als landsdekkend instrumentarium voor grondwaterbeheer en -beleid. Het model is ontwikkeld door het RIZA.

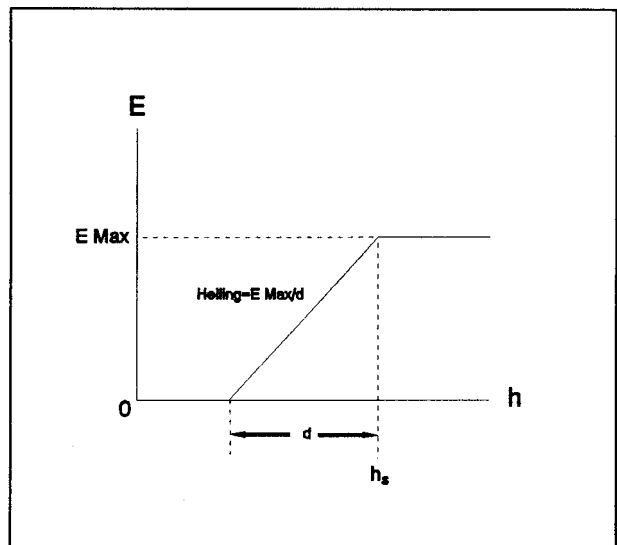
Nagrom is een stationair model, waarbij de verdamping in de recharge (grondwateraanvulling) is verwerkt. De recharge wordt vastgesteld met behulp van het neerslagoverschot. Voor de bepaling van het neerslagoverschot wordt veelal een koppeling gemaakt met een model voor de onverzadigde zone. Hiertoe beschikt het RIZA over het model MOZART. Met behulp van een dergelijk model wordt een zo goed mogelijke inschatting gemaakt van het neerslagoverschot voor een bepaalde situatie (zie beschrijving MOZART).

### MODFLOW

Modflow is een drie dimensionaal model voor grondwaterstroming in de verzadigde zone. Met behulp van zogenaamde "packages" kunnen invloeden van buiten worden gesimuleerd. Deze "packages" kunnen worden geactiveerd, al naar gelang de wens van de gebruiker. Zo kunnen rivieren, grondwateraanvulling, ontrekkingen/infiltratie via putten, drainage en verdamping worden nagebootst. Het model is ontwikkeld in de Verenigde Staten door de Geological Survey.

Modflow bezit een zogenaamde "evapotranspiration package". Hierbij wordt de verdamping gesimuleerd door het verdampingswater direkt aan de verzadigde zone te onttrekken. Bij deze aanpak is de verdamping een functie van de grondwaterstand. Het verband tussen de verdamping en de stijghoogte staat afgebeeld in figuur 2. In dit figuur zijn de volgende relaties van toepassing:

$$\begin{array}{ll}
 E = E_{\max} & h > h_s \\
 E = 0 & h < h_s - d \\
 E = \frac{(h - (h_s - d))}{d} * E_{\max} & h_s - d < h < h_s
 \end{array}$$



**Afbeelding 2:** Relatie tussen verdamping (E) en stijghoogte (h) in Modflow.

Hierbij is E de verdamping, h de grondwaterstand,  $h_s$  de grondwaterstand waarbij de verdamping gereduceerd wordt en d is het traject van de grondwaterstand waarin de verdamping van maximaal (E max) tot 0 wordt gereduceerd. Modflow adviseert dat  $h_s$  normaal-gesproken gelijk moet zijn aan de maaiveldshoogte, terwijl de d de orde van grootte van 2 - 2.5 m heeft.

Aan deze aanpak kleven een aantal bezwaren, omdat het concept onjuist is. Verdampingswater wordt immers niet aan de verzadigde zone onttrokken, maar aan de onverzadigde zone. Bovendien, indien de



---

grondwaterstand diep is, zoals bijvoorbeeld op de Veluwe, zou de verdamping volgens figuur 1 altijd nul zijn.

De aanpak zoals hier beschreven heeft alleen zin indien hij gebruikt wordt om de kapillaire nalevering van het grondwater in droge perioden te beschrijven. In dat geval geeft de y-as van figuur 1 niet de verdamping aan, maar de kapillaire nalevering uit het grondwater naar de wortelzone. De verdamping zal dan op een andere manier beschreven dienen te worden.

Veel gebruikers van Modflow maken geen gebruik van de "evapotranspiration package", maar voeren met behulp van de "recharge package" een recharge term in. Deze recharge term kan worden bepaald door de onverzadigde zone als een reservoir te beschouwen. Dit reservoir wordt gevuld met neerslag, terwijl de verdamping de inhoud van het reservoir doet verminderen. De verdamping wordt meestal bepaald met behulp van de Makkink verdamping (KNMI weergegevens) en gewasfactoren. Indien het reservoir vol is loopt het overtollige water over naar de verzadigde zone. Andersom, indien het reservoir bijna leeg is kan men het aanvullen met water uit de verzadigde zone.

### **MICROFEM**

Microfem is een model voor grondwaterstroming in de verzadigde zone. Het model is ontwikkeld aan de Vrije Universiteit Amsterdam. Aanvankelijk rekende Microfem alleen stationair, onlangs is echter een versie uitgebracht met mogelijkheden tot niet stationaire rekensessies.

Microfem bezit geen aparte verdampingsmodule (en rekt uitsluitend in de verzadigde zone.) Per knooppunt bestaat de mogelijkheid om een recharge (of discharge) aan te geven. Wanneer dit aan de bovenrand van het model gebeurt, wordt deze recharge beschouwd als dat gedeelte van de neerslag dat uiteindelijk toekomt aan het de grondwater (verzadigde zone). In dat geval werkt men dus met een neerslagoverschot ( $P - E$ ). Het neerslagoverschot kan worden geschat met behulp van KNMI weergegevens en gewasfactoren. Bij een stationaire rekensessie voor een winter of voorjaarsituatie kan op deze wijze bijvoorbeeld een recharge van 1 mm/dag worden toegevoegd aan de bovenrand van het model. Voor een zomersituatie is een stationaire rekensessie minder op zijn plaats. In een dergelijk geval kan men bij niet stationaire berekeningen gebruik maken van de techniek (onverzadigde zone als reservoir) zoals beschreven bij Modflow.