

37 / 6000 (333.2) 1996

**Hydrologie en waterhuishouding
van bosgebieden in Nederland**

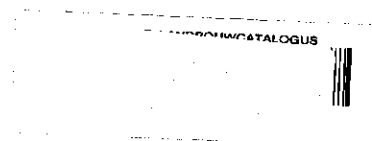
Fase 2: Meetopzet en eerste resultaten

**J.A. Elbers
A.J. Dolman
E.J. Moors
W. Snijders**

**BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW**

Rapport 333.2

DLO-Staring Centrum, Wageningen, 1996



14 NOV. 1996

1996-11-14 deel 2

REFERAAT

J.A. Elbers, A.J. Dolman, E.J. Moors en W. Snijders, 1996. *Hydrologie en waterhuishouding van bosgebieden in Nederland; Fase 2: Meetopzet en eerste resultaten*. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Rapport 333.2; 66 blz.; 19 fig.; 12 tab.; 34 ref.

Op vier boslocaties (populier, lariks, grove den, gemengd naald- en loofbos) is gedurende 1995 nagenoeg continu gemeten. Gemeten zijn: verdampings-, voelbare warmte- en impulsflux, bodemvochtgehalte, weersvariabelen en doorval. De eerste conclusies zijn als volgt. In de zomer neemt het interceptieverlies als percentage van de bruto-neerslag af in de volgorde lariks (32,2%), populier (26,7%) en grove den (21,5%). De transpiratie neemt af in de volgorde populier (422 mm), lariks (375 mm) en grove den (283 mm). Dit is een eerste schatting verkregen uit de metingen van de totale verdamping en interceptie. Het betreft het groeiseizoen van dag 120 tot en met dag 275. Het totale waterverbruik van populier (655 mm) en lariks (651 mm) is vrijwel gelijk. Het is hoger dan dat van grove den (539 mm).

Trefwoorden: bos, waterhuishouding, interceptie, transpiratie, instrumentatie

ISSN 0927-4499

©1996 DLO-Staring Centrum, Instituut voor Onderzoek van het Landelijk Gebied (SC-DLO)
Postbus 125, 6700 AC Wageningen.
Tel.: (0317) 474200; fax: (0317) 424812; e-mail: postkamer@sc.dlo.nl

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

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

Project 7344

[Rap333-2.HM/08.96]

Inhoud

	blz.
Woord vooraf	9
Samenvatting	11
1 Inleiding	13
2 Meetlocaties	17
2.1 Beschrijving van de meetlocaties	17
2.2 Fluxbrongebieden	22
3 Beschrijving van de meetopstellingen	25
3.1 De automatische meetsystemen	25
3.1.1 Het eddycorrelatiesysteem	25
3.1.2 Het dataloggersysteem	26
3.1.3 Het bodemvochtsysteem	27
3.1.4 De regenmeter	28
3.1.5 Tensiometers	28
3.1.6 Grondwaterstandslogger	29
3.1.7 De energievoorziening	29
3.1.8 De locatiegebonden systemen	29
3.2 De niet-automatische metingen	30
3.2.1 Doorvalbakjes	30
3.2.2 Bladvalbakken	30
3.2.3 Stamafvoermeters	30
4 Dataverwerking	31
4.1 Berekening van de eddycorrelatiefluxen met EDDYCALC	32
4.2 Berekening van de voelbare warmtestroom (H) met de temperatuurvariantiemethode	32
4.3 Berekening van de langgolvlige straling	32
4.4 Controle van de gegevens	33
4.5 De database	35
5 Eerste resultaten	37
5.1 Algemene beschrijving van meetjaar 1995	37
5.2 Aërodynamische ruwheid	42
5.3 Interceptie	44
5.3.1 Foutenbepaling	46
5.3.2 Bepaling verzadigingsconstante	49
5.4 Termen in de waterbalans	52
5.4.1 Verdamping	52
5.4.2 Bodemvocht	56
5.4.3 Grondwaterstand	58
6 Conclusies	59
6.1 Analyse meetresultaten 1995	59
6.2 Perspectief en verder onderzoek	60

Tabellen

1	Beschrijving van de locaties	13
2	De afstand tot de plaats waar de maximale fluxbijdrage vandaan komt x_{\max} , voor drie locaties, bij een neutrale atmosfeer	24
3	Beschrijving instrumentarium eddycorrelatiesysteem	26
4	Beschrijving instrumentarium dataloggersysteem	27
5	Gehanteerde limieten bij de eerste fase van de controle van de gegevens	33
6	Codering van de meetwaarden	34
7	Toegepaste controles in de tweede fase	35
8	Overzicht bestanden database	36
9	Neerslag (mm) voor de meetperiode in 1995 van de boslocaties. Voor de nabij gelegen KNMI-stations zijn ook de jaartotalen en de normalen (1961-1990) gegeven (KNMI, 1995)	37
10	Ruwheidslengte en nulvlaksverplaatsing voor de drie locaties	43
11	Doorval en interceptieverlies voor de drie in 1995 bemeten opstanden als percentage van de neerslag (mm)	45
12	Bepaling verzadigingsconstante volgens twee methoden	52

Figuren

1	Geografische positie van de locaties	14
2a	Omgevingskaartje locatie Fleditebos	17
2b	Omgevingskaartje locatie Bankenbos	19
2c	Omgevingskaartje locatie Kampina	20
2d	Omgevingskaartje locatie Loobos	21
3	Maaiveldshoogte transect Loobos	22
4	De bronsterkte van de flux als functie van de afstand tot de sensor	24
5	Schematische weergave van de dataverwerking	31
6a	Decadegegevens KNMI station de Bilt	38
6b	Decadegegevens Fleditebos	39
6c	Decadegegevens Loobos	40
6d	Decadegegevens Bankenbos	41
7	Waarschijnlijkheidsverdeling van nulvlaksverplaatsing (a) en ruwheidslengte (b) voor het Bankenbos	43
8	Doorval en bruto-neerslag voor het Fleditebos, Loobos en Bankenbos	45
9	Cumulatief verloop doorval en bruto-neerslag voor het Fleditebos, Loobos en bankenbos	46
10	Ratio neerslag gemeten op het open veld en op de mast voor het Fleditebos, Loobos en Bankenbos	47
11	Ratio doorval gemeten met bakjes en met de doorvalgoot voor het Fleditebos, Loobos en Bankenbos	48
12a	Waarschijnlijkheidsverdeling van de doorval als percentage van de bruto-neerslag voor het Fleditebos en Bankenbos in de zomer en voor het Loobos voor het gehele jaar	49
12b	Waarschijnlijkheidsverdeling van de doorval als percentage van de bruto-neerslag voor het Fleditebos en Bankenbos in de winter	49

13	Bepaling verzadigingsconstante m.b.v. de regressielijn van alle buien in 1995 in het Loobos	50
14	Bepaling verzadigingsconstante voor één bui in het Loobos	51
15	Dagelijkse gesommeerde energiebalanssluiting uitgedrukt als fractionele fout ten opzichte van de netto-straling in het Fleditebos, het Loobos en het Bankenbos	53
16	Dagelijkse verdamping voor het Fleditebos, Loobos en het Bankenbos direct gemeten (LE) en bepaald als restterm van de energiebalans ($R_n - H$)	53
17	Dagelijkse verdamping voor het Fleditebos, Loobos en Bankenbos uitgerekend met een 5-daags voortschrijdend gemiddelde en de bruto-neerslag voor de drie locaties	55
18a	Verloop in diëlektrische constante voor vijf sensoren in twee profielen voor het Fleditebos	56
18b	Verloop in volumetrisch vochtgehalte voor vijf sensoren in twee profielen voor het Loobos	57
18c	Verloop in volumetrisch vochtgehalte voor vijf sensoren in twee profielen voor het Bankenbos	57
19	Verloop in grondwaterstandsdiepte voor het Fleditebos, Loobos en Bankenbos	58

Woord vooraf

Voor u ligt het tweede rapport van het project 'Waterhuishouding en Hydrologie van bosgebieden in Nederland'. Werden in het eerste rapport de resultaten van een gevoeligheidsanalyse van het bestaande modelinstrumentarium beschreven, in dit tweede rapport worden de eerste experimentele resultaten van het onderzoek beschreven. Het ligt in de bedoeling dat in 1996/1997 nog een rapport verschijnt dat gedetailleerd op de dataverwerking ingaat. Later te verschijnen rapporten zullen een meer analyserend karakter dragen.

In 1995 en in 1996 werden vier locaties in Nederland geselecteerd op basis van representativiteit en geschiktheid voor hydrologische en (micro)meteorologische waarnemingen. De eerste resultaten van deze metingen worden in dit rapport beschreven. Dat in 1996 ook de laatste locatie geïnstrumenteerd kon worden was het gevolg van het feit dat in 1996 ook de drie grote beheersinstanties Staatsbosbeheer, Unie van Landschappen en de Vereniging tot behoud van Natuurmonumenten een financiële bijdrage konden toezeggen. Het project wordt nu ondersteund door deze drie instanties, het Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij en de Vereniging van Exploitanten van Waterleidingbedrijven in Nederland. Van de Europese Unie werden additionele middelen verkregen om de locatie Kootwijk op te nemen in een netwerk van lange-termijn-meetlocaties waar de CO₂-balans van bossen kan worden vastgesteld. Ook in 1996 werd de begeleidingsgroep uitgebreid met een vertegenwoordiger van de waterschappen, zodat nu een breed scala van maatschappelijke groeperingen in de begeleiding van het project betrokken is.

In 1995 en 1996 werd het project begeleid door ir G. van Tol (Informatie- en KennisCentrum Natuur, Bos, Landschap en Fauna), dr ir W. Bouten (Universiteit van Amsterdam), prof. A.W.L. Veen (Rijksuniversiteit Groningen), ir H.K.A. Rotermundt (Nuon-water, Vereniging van Exploitanten van Waterleidingbedrijven in Nederland, Vewin), ir W.P.C. Zeeman (Staatsbosbeheer), ir H. Massop (Unie van Landschappen) en dr P. Kabat (DLO-Staring Centrum). Na het overlijden van prof. A.W.L. Veen is diens rol in de begeleidingscommissie overgenomen door dr W. Klaassen (Rijksuniversiteit Groningen).

De locatie in Veenhuizen werd onderhouden door de Vakgroep Fysische Geografie van de Rijksuniversiteit Groningen, waarvoor speciale dank uitgaat naar Maarten van der Meulen en de andere leden van die groep.

Samenvatting

Dit rapport beschrijft de meetlocaties, de meetopstellingen en de dataverwerking, en presenteert de eerste resultaten.

Binnen het project wordt gebruik gemaakt van meetresultaten van vijf locaties. Vier van deze locaties zijn nagenoeg uniform beïnstreemd. Deze locaties zijn: het Fleditebos (nabij Zeewolde, opstand: populier), het Loobos (nabij Kootwijk, opstand: grove den), het Bankbos (nabij Veenhuizen, opstand: lariks) en de Kampina (nabij Boxtel, opstand: gemengde naald- en loofbomen). Het meetinstrumentarium dat gebruikt wordt, bestaat uit vier systemen: een fluxsysteem dat continu de verdampings-, de voelbare warmte- en de impulsflux meet door middel van de eddycorrelatietechniek, een systeem dat continu de veranderingen in de hoeveelheid bodemvocht registreert, een systeem dat continu weersvariabelen registreert en een systeem voor de bepaling van doorval, dat deels continu en deels op weekbasis registreert. Voor de locaties Fleditebos en Kampina worden tevens afvoermetingen geregistreerd. De vijfde locatie is het Purmerbos (nabij Purmerend, opstand: loofbomen gemengd). Op deze locatie worden afvoer, neerslag en grondwaterstanden geregistreerd.

Het meetsysteem is gericht op langdurige metingen en heeft in het eerste jaar van dit project bewezen robuust te zijn. De gebruikte procedures zijn betrouwbaar en in de praktijk goed toepasbaar.

Het jaar 1995 was een relatief droog en warm jaar. Vooral de tweede helft van het jaar was droog. Het gevolg hiervan was dat er sinds het installeren van de meetstaven in het Fleditebos en bij de Kampina nog geen afvoeren zijn geregistreerd.

De eerste voorlopige conclusies van het onderzoek zijn als volgt. In de zomer neemt het interceptieverlies als percentage van de bruto-neerslag af in de volgorde Bankbos (32,2% in de zomer en 23,7% in de winter), Fleditebos (26,7% in de zomer en 16,7% in de winter) en Loobos (21,5% in de zomer en winter). De transpiratie neemt af in de volgorde Fleditebos (422 mm), Bankbos (375 mm) en Loobos (283 mm). Dit is een eerste schatting verkregen uit metingen van de totale verdamping en de interceptie. Het betreft het groeiseizoen van dag 120 tot en met dag 275. Het totale waterverbruik van populier (655 mm) en lariks (651 mm) is vrijwel gelijk. Het is hoger dan dat van grove den (539 mm). Grove den heeft zowel het laagste transpiratie- als interceptieverlies. Tijdens de winter treedt op alle locaties een substantiële verdamping op. In de eerste drie maanden van 1995 liep dit op tot ongeveer 100 mm.

1 Inleiding

Het project 'Hydrologie en waterhuishouding van bosgebieden in Nederland' heeft als doel een betrouwbare schattingsmethode te ontwikkelen voor het waterverbruik van bossen in Nederland (Dolman en Moors, 1994). In het afsluitende rapport van fase I van deze studie 'Toetsing instrumentarium' is geconstateerd dat aan de huidige schattingsmethoden nogal wat bezwaren kleefden. Bovendien werd geconstateerd dat er op empirische basis geen eenduidige regels te formuleren waren die het waterverbruik van bosgebieden binnen aanvaardbare normen zouden kunnen schatten.

Bovengenoemde redenen hebben geleid tot het opstellen van een meet- en modelplan dat als doel had zowel meetgegevens als een modelinstrumentarium te genereren. Dit rapport beschrijft vooral de meetopstellingen die in dit kader zijn opgezet en geeft de eerste meetresultaten. In een ander rapport zijn de modelontwikkelingen beschreven (Ashby et al., 1996).

Het uiteindelijke doel van het bosproject is te komen tot uitspraken op gebiedsniveau op landelijke schaal. In het voorafgaande rapport (Dolman en Moors, 1994) worden een aantal criteria gegeven waaraan de meetlocaties zouden moeten voldoen. Deze hebben betrekking op de mogelijkheid de resultaten van de locaties te extrapoleren naar locaties waar niet gemeten is of kan worden. Eveneens is geconstateerd dat van bossen met douglas en die met Amerikaanse eik voldoende gegevens beschikbaar zijn (Hendriks et al., 1990, Bouten, 1992).

Om logistieke redenen is gekozen voor vier identieke meetlocaties en één satellietlocatie. Van deze locaties onderhoudt SC-DLO er drie en de Vakgroep Fysische Geografie in Groningen één. De locaties zijn weergegeven in tabel 1 en in figuur 1.

Tabel 1 Beschrijving van de locaties

<i>Locatie</i>	<i>Bostypologie</i>	<i>Grondwater</i>	<i>Commentaar</i>
Zeewolde Fleditebos	Populier	1-2 m	Afvoermetingen
Kootwijk Loobos	Grove den	2-10 m	Uitbreiding met CO ₂ -metingen
Veenhuizen Bankenbos	Lariks	1-2 m	Onderdeel SLIMM-project RUG
Boxtel Kampina	Gemengd loof / naald	0-2 m	Afvoermetingen
Purmerend Purmerbos	Gemengd: populier, eik, beuk, es	1-2 m	Satellietlocatie gericht op afvoeranlyses



Fig. 1 Geografische positie van de locaties

De locaties, behalve de satellietlocatie Purmerbos, zijn alle volgens hetzelfde schema van instrumenten voorzien. Op ieder van de locaties worden echter een aantal extra metingen uitgevoerd die beter inzicht in locatie-specifieke processen moeten geven. Zo worden bijvoorbeeld op de locaties in het Fleditebos en de Kampina afvoermetingen verricht die inzicht moeten verschaffen in het afvoergedrag van bossen. Dit is vooral belangrijk bij de berekeningen van waterbezwaren door waterschappen.

Dit rapport beschrijft de meetlocaties, de meetopstellingen, de dataverwerking, en presenteert de eerste resultaten. De meetopstelling bestaat uit vier systemen: een fluxsysteem dat continu de verdampings- (latente warmte), de voelbare warmte- en de impulsflux meet door middel van de eddycorrelatietechniek, een systeem dat continu de veranderingen in de hoeveelheid bodemvocht registreert, een systeem dat continu weersvariabelen registreert en een systeem voor de bepaling van doorval, dat deels continu en deels op weekbasis registreert. Deze systemen worden in dit rapport beschreven (hoofdstuk 3).

In hoofdstuk 2 worden de meetlocaties beschreven en wordt de representativiteit van de micrometeorologische waarnemingen onderzocht. Hiervoor wordt een zogenaamde 'footprint' analyse uitgevoerd, die aan de hand van opstandskenmerken laat zien hoe groot de aanstrijk lengte van de locatie is. De aanstrijk lengte geeft een indicatie welk

deel van het oppervlak door de metingen wordt gezien. Anders gezegd: de aanstrijk lengte geeft aan welk deel van een gemeten flux van welk deel van de opstand afkomstig is. Deze analyse is belangrijk omdat verontreinigen in de flux van andere vegetatietypen in de onmiddellijke nabijheid van de locatie het moeilijk maken de flux te interpreteren in karakteristieken van het bos.

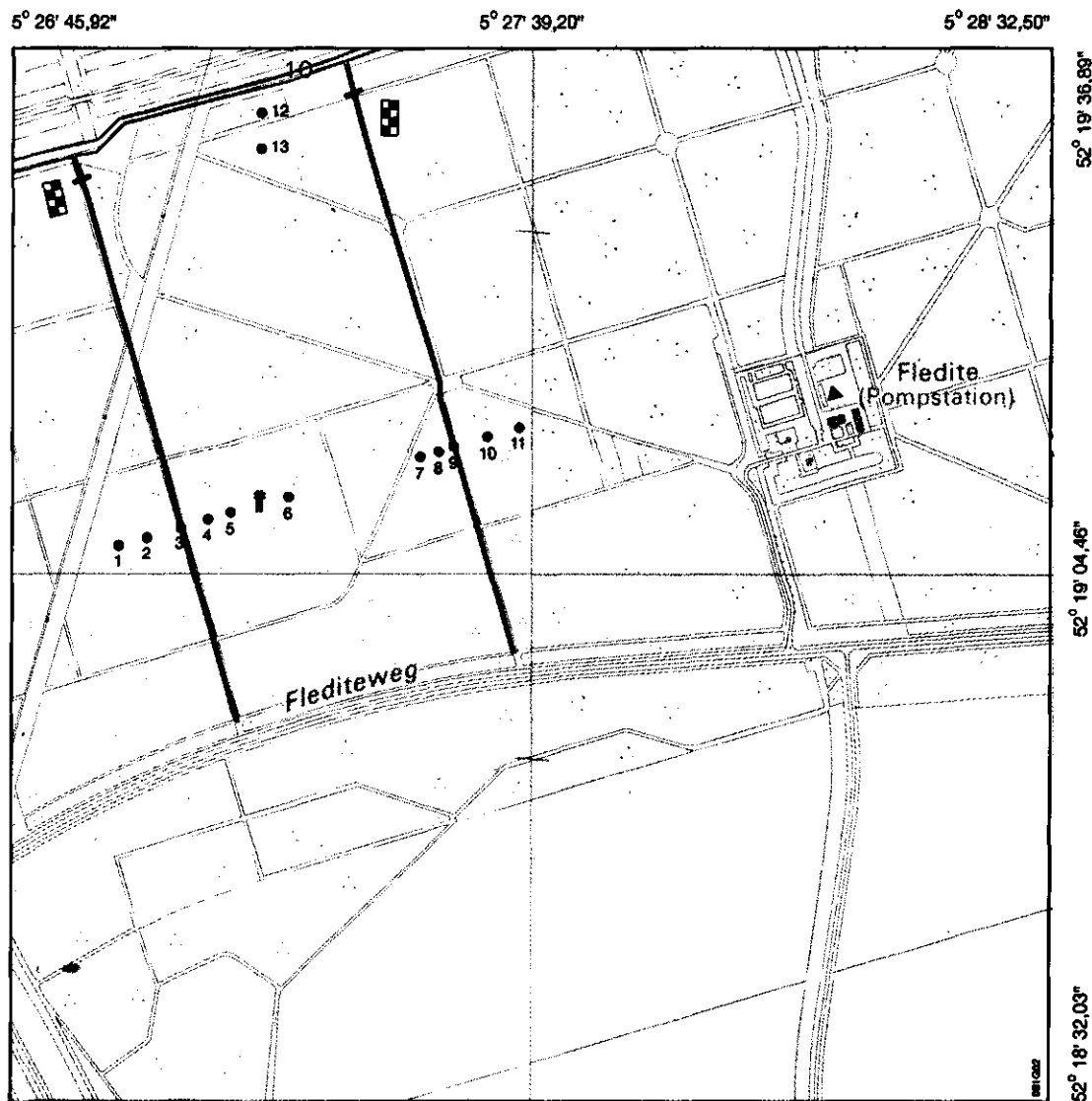
In het huidige project wordt op vier locaties gemeten. Hoewel bij het ontwerp er voor is gekozen beperkingen te stellen aan de hoeveelheid gegevens, is het adequaat opslaan en reguleren van de datastroom van groot belang. In hoofdstuk 4 wordt besproken hoe de dataverwerking op dit moment plaatsvindt en wat voor soort gegevens er worden opgeslagen.

In hoofdstuk 5 worden de eerste resultaten van het onderzoek besproken. Eind 1994 is gestart met de eerste meetlocaties in het Fleditebos en het Loobos. In januari 1995 is met de locatie Bankenbos begonnen, in januari 1996 is de locatie Kampina beinstrumenteerd. De gebruikte meetmethoden hebben als doel zo veel mogelijk continu door te meten. Dit is echter niet altijd mogelijk: de gebruikte apparatuur voor het meten van fluxen werkt slecht onder natte omstandigheden (regen, mist). In dit rapport wordt geprobeerd op basis van de beschikbare metingen vast te stellen, of de metingen betrouwbaar zijn, en of er verschillen bestaan in verdamping, bodemvocht (diëlektrische constante) en microklimaat tussen de verschillende locaties. De interceptiemetingen worden geanalyseerd om allereerst een indicatie van de interceptieverliezen te kunnen geven, en daarnaast om op basis van deze seizoensmetingen een eerste schatting te geven van de grootte van het interceptiereservoir. Verder worden ruwheidslengte en nulvlakverplaatsing berekend en wordt een eerste schatting van de verschillen in transpiratie tussen de opstanden bepaald. Een kwalitatieve analyse van de grootte van de termen van de waterbalans wordt gegeven, ook al is deze gebaseerd op nog niet geheel volledige datareeksen.

2 Meetlocaties

2.1 Beschrijving van de meetlocaties

In de figuren 2a-d is de ligging van de verschillende locaties te zien. De gedetailleerdheid van de beschrijving verschilt per locatie. In 1996 zal voor alle locaties een gedetailleerde locatie- en opstandsbeschrijving worden uitgevoerd.



Legenda Fleditebos:

- ↑ mast
- ▲ regenmeter
- ⋯ loofbos
- - - weg
- ▣ stuw
- peilbuis
- sloot

0 100 200 300 400 500 m

Fig. 2a Omgevingskaartje locatie Fleditebos

Fleditebos

Het Fleditebos is onderdeel van de boswachterij Horsterwold en ligt in de zuidoosthoek van Flevoland. De coördinaten van de meetmast zijn 52°19'06''N 5°27'12''O. Een eerste beschrijving van de meetlocatie is gebaseerd op het rapport van Slager (1991). Het onderzoeksgebied beslaat de kavel Oz67. Deze is omgeven door twee kavelsloten die uitmonden op een tocht. Die staat weer in directe verbinding met de Hoge Vaart. Het peil van de Hoge Vaart wordt gehandhaafd op NAP -5,20 m. De maaiveldshoogte van de kavel is ongeveer NAP - 3,5 m. De hele kavel is in eerste instantie ontwaterd door middel van buisdrainage met een onderlinge afstand van 48 m. Verwacht mag worden dat deze zijn functie als ontwateringsmiddel echter grotendeels verloren heeft. De ontwateringsfunctie van de drains zal in grote mate zijn overgenomen door permanente scheuren (tot 10 cm breed) die bij het rijpen van de klei zijn ontstaan. De kwel in het onderzoeksgebied varieert van weinig (0,1-0,5 mm.d⁻¹) tot geen in het uiterste zuidoosten van deze kavel. De bodem is uniform van opbouw met een kleipakket van 2-3 m op een zandondergrond. Het kleipakket is kalkrijk, met gehalten van 8 tot 10%. De eerste 80 cm van de bodem is als volgt opgebouwd: 0-22 cm humushoudende zware zavel (lutumgehalte 12-17 g per 100 g droge grond) en 22-80 cm klei A (lutumgehalte 25-35 g per 100 g droge grond). De vegetatie in een straal van ongeveer 500 m rond de meetmast bestaat voor 93,5% uit bos. Van de resterende 6,5% is 5,0% gras en de rest verhard oppervlak. De hoofdboomsoort is populier (76%) met als meest voorkomende variëteit Zeeland. Andere boomsoorten die voorkomen zijn es (9,4%), eik (3,8%), esdoorn (3,0%) en beuk (1,5%). De ondergroei die vooral veel voorkomt onder de populierenopstanden bestaat uit brandnetels, kleefkruid en gras. Ze kan een hoogte bereiken van 1,5 m.

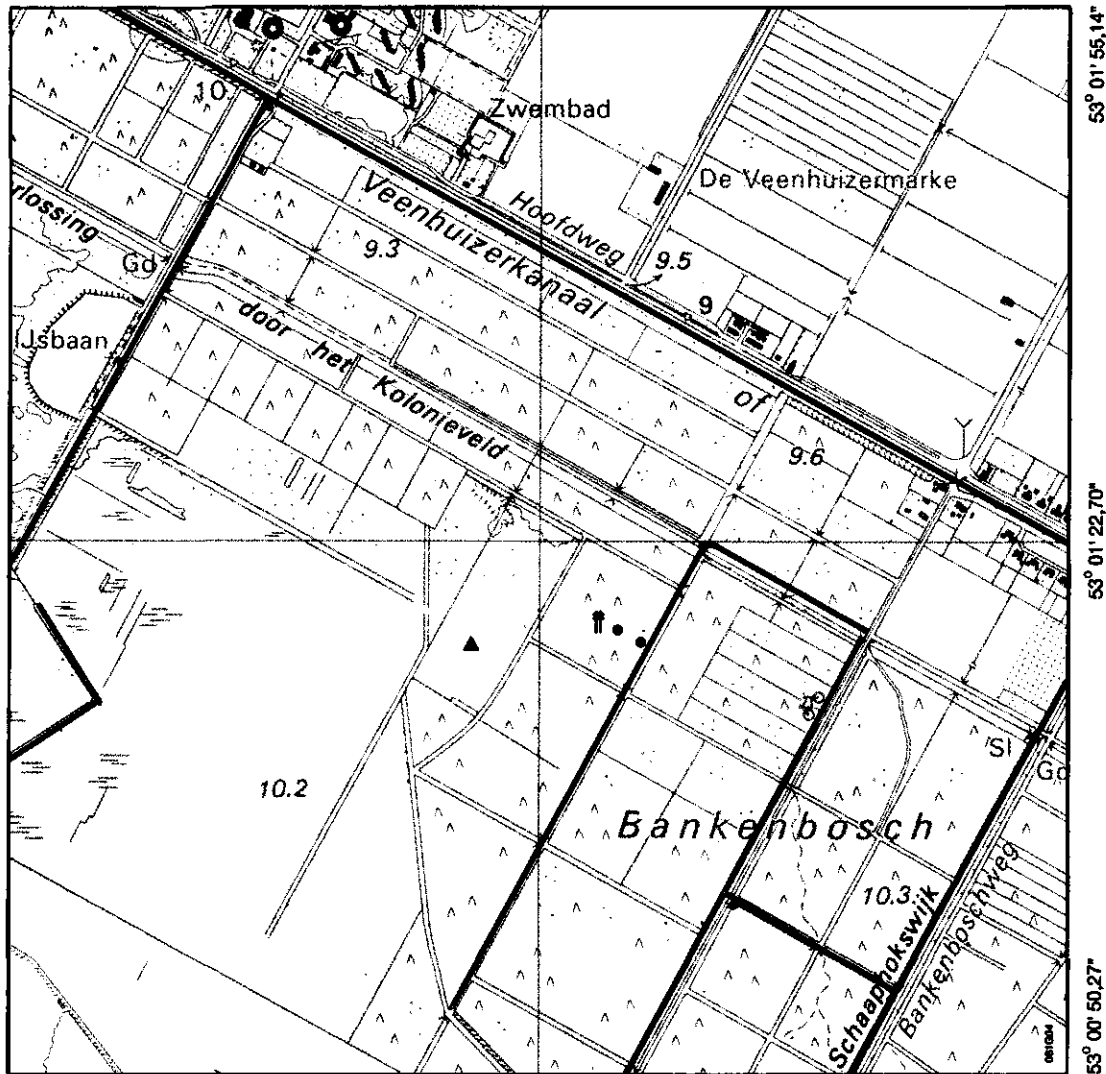
Bankenbos

Het Bankenbos ligt nabij Veenhuizen en grenst aan het Fochteloërveen. De coördinaten van de meetmast zijn 53°1'21''N 6°24'32''O. De bodem is opgebouwd uit een dunne laag veen (20 cm) op een laag zand van ongeveer 1 m bovenop een keileemlaag. Het perceel van de meetmast is langgerekt met een breedte van ongeveer 100 m en een lengte van ongeveer 900 m. De mast is in het NO van het perceel geplaatst. Het perceel strekt zich uit van noord naar zuid. Het perceel wordt in het noorden begrenst door een eikenopstand, in het oosten door een douglasopstand en aan de andere zijden wordt het perceel begrenst door het veen dat nagenoeg volledig wordt bedekt met pijpestrootje. Het perceel zelf is een opstand van lariksen. Ondergroei is er nauwelijks.

6° 23' 14,74"

6° 24' 07,37"

6° 25'



Legenda Bankenbos:

- | | |
|--------------|-----------------|
| † mast | — kanaal, sloot |
| ▲ regenmeter | weg |
| ∴ loofbos | ● peilbuis |
| △ naaldbos | |

0 100 200 300 400 500 m

Fig. 2b Omgevingskaartje locatie Bankenbos

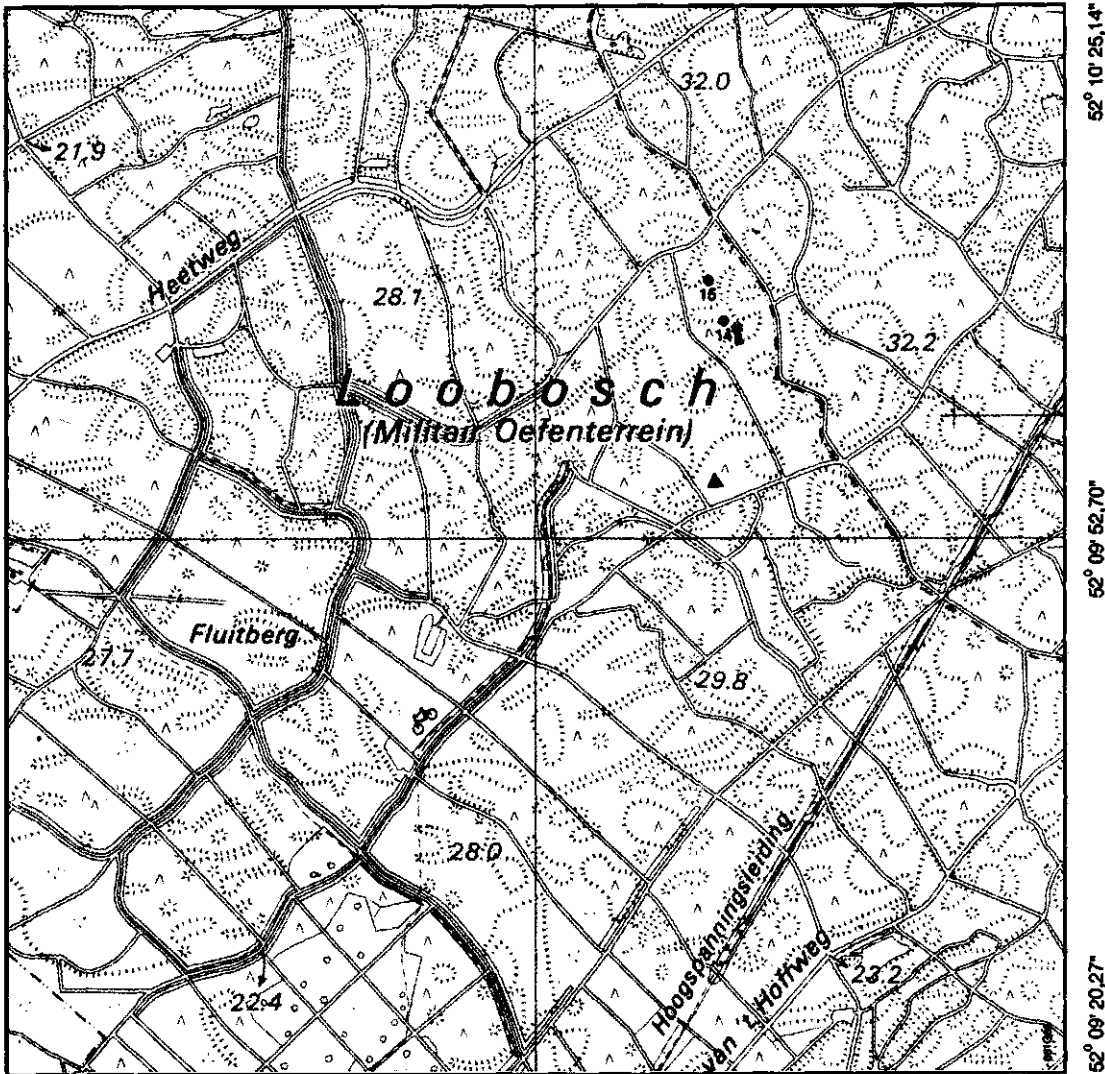
Kampina

De meetlocatie in het bos van de Kampina ligt in de nabijheid van Boxtel. De coördinaten van de meetmast zijn 51°34'01''N 5°17'27''O. De bodem bestaat uit: een strooisellaag van 10 cm, een humushoudende laag van 15 cm, een grijze laag zand van 25 cm en een laag geel/wit zand van 80 cm. Het bos van de Kampina is een gemengd bos. Niet alleen komt er loof- en naaldbos voor, maar ook de leeftijd van de bomen is verschillend. Het bos rond de meetmast kan globaal in twee typen worden verdeeld. Aan de oostkant is het bos vrij open en bestaat het uit vliegden met als ondergroei pijpestrootje. Aan de westkant is het bos dichter en bestaat het

5° 43' 25,26"

5° 44' 17,89"

5° 45' 10,88"



Legenda Loobos:

- f mast
- ▲ regenmeter
- ∴ loofbos
- ▲ naaldbos
- duin
- weg
- peilbuis

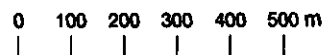


Fig. 2d Omgevingskaartje locatie Loobos

Loobos

Het Loobos is een deel van de boswachterij Kootwijk. De coördinaten van de meetmast zijn 52°10'00"N 5°44'38"O. Het grootste deel van de bossen is aangeplant op stuifduinen. Dit heeft tot gevolg dat er nogal wat hoogteverschil in het maaiveld zit. In figuur 3 is een voorbeeld gegeven van het verloop van de hoogte over een transect van oost naar west nabij de meetmast. De meetmast zelf staat op ongeveer NAP + 30 m. Het hoogteverschil dat aan het maaiveld optreedt, wordt overigens goeddeels genivelleerd door het bos, zodat het kruinoppervlak veel minder geaccidenteerd is. De bodem is een humuspodzol bedekt met een strooisellaag van

ongeveer 10 cm. Het bodemprofiel is als volgt opgebouwd: 0-10 cm een zwarte humushoudende uitspoelingslaag, 10-50 cm grijze inspoelingslaag, 50-250 cm grijs/wit zand en vanaf 250 cm geel zand. Het bos in een straal van ongeveer 500 m rond de meetmast bestaat hoofdzakelijk uit grove den (89 %) waarvan het grootste deel rond 1900 is aangeplant. Andere boomsoorten die voorkomen zijn Corsicaanse den (3,3%), berk (2,3%), douglas (1,3%) en eik (0,6%). Ook zijn er enkele open stukken (3,5%) die begroeid zijn met heide en bochtige smele. De ondergroei van het bos bestaat ook voornamelijk uit bochtige smele. Deze gegevens zijn afkomstig van de luchtfotokaart Boswachterij Kootwijk van Staatsbosbeheer uit 1987.

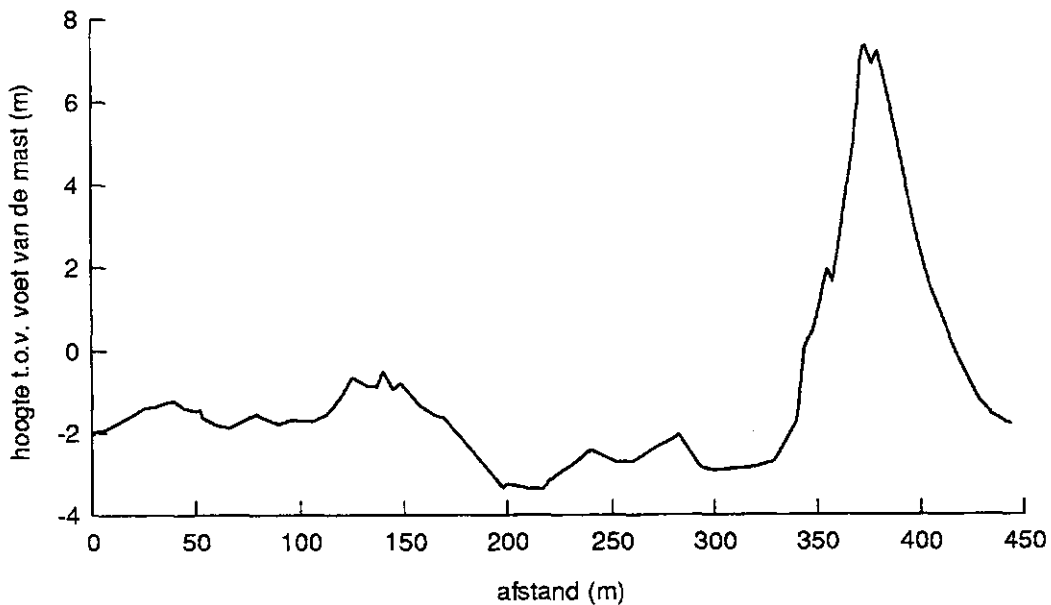


Fig. 3 Maaiveldshoogte transect Loobos

2.2 Fluxbrongebieden

Een van de problemen bij het bepalen van de verdamping met behulp van eddy correlatiemetingen boven bossen in Nederland is de vaak kleinschalige structuur van deze bossen. Meestal zijn de bospercelen met dezelfde boomsoort niet veel breder dan 50-100 m, terwijl het 'gezichtsveld' van de sensoren die gebruikt werden bij de eddy correlatiemetingen tot enkele honderden meters reikt. Het 'gezichtsveld' van een sensor die grootheden meet die afhankelijk zijn van turbulente diffusie wordt bepaald door die turbulentie zelf en verandert steeds van grootte en richting, en is een functie van windrichting en windsnelheid en andere karakteristieken van de luchtstroom. Om toch iets te kunnen zeggen over de relatie tussen de ruimtelijke variatie van de brongebieden van de fluxen en het gemeten signaal op een bepaalde hoogte boven het oppervlak, wordt gebruik gemaakt van zogenaamde 'footprint'-functies of gewogen bronfuncties zoals o.a. Schuepp et al. (1990), Gash (1986) en Schmid (1994) hebben beschreven.

Het hier gebruikte model is gebaseerd op het model van Schuepp et al. (1990) met de aanpassingen, zoals Lloyd (1995) heeft gedaan, waarmee het effect van de stabiliteit in het model is ingebouwd. De relatieve bijdrage van een puntbron ten opzichte van de totale verticale flux wordt gegeven door:

$$\frac{1}{Q_0} \frac{dQ}{dx} = \frac{-2x_{\max}}{x^2} \phi_M \exp \left[\frac{-2x_{\max}}{x} \phi_M \right] \quad (1)$$

waarbij Q_0 de fluxdichtheid per oppervlakte eenheid (Wm^{-2}), x de bovenwindse afstand vanaf de sensor tot waar de flux vandaan komt (m), x_{\max} is de bovenwindse afstand vanaf de sensor naar de plaats waar de fluxbijdrage maximaal (m) en ϕ_M de functie voor de stabiliteitscorrectie van momentum. Voor deze correctiefunctie wordt de algemeen aanvaarde functie van Dyer (1974) gebruikt:

$$\phi_M = \left[1 - 16 \frac{(z_{\text{ref}} - d)}{L} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

waarbij L de Monin-Obukhov stabiliteitslengte (m) is, z_{ref} de hoogte van het meetinstrument (m) en d de verplaatsingshoogte van het nulvlak (m). De bovenwindse afstand vanaf de sensor naar de plaats waar de fluxbijdrage maximaal is, wordt benaderd door:

$$x_{\max} \approx \frac{1.7z_{\text{ref}}^{1.03} \left[\ln \left(\frac{z_{\text{ref}} - d}{z_0} \right) - \psi \left(\frac{z_{\text{ref}} - d}{L} \right) \right]}{\left(1 - \frac{z_{\text{ref}} - d}{L} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

waarbij z_0 de ruwheidslengte (m) is en ψ wordt berekend volgens:

$$\psi \left(\frac{z_{\text{ref}} - d}{L} \right) = \left(1 - 76 \frac{z_{\text{ref}} - d}{L} \right)^{-1/4} - 1 \quad (4)$$

Het hier beschreven tweedimensionale model kan voor elke afstand bovenwinds van de sensor aangeven wat de relatieve bijdrage in de totale fluxdichtheid van de puntbron is. Het model is alleen afhankelijk van de meethoogte, ruwheidslengte, nulvlakverplaatsingshoogte en de stabiliteit. Opgemerkt moet worden dat om modelmatige complicaties te voorkomen, wordt aangenomen dat alle fluxen op dezelfde hoogte t.o.v. het aardoppervlak ontstaan.

In figuur 4 is de bronsterkte of de relatieve fluxbijdrage van elk punt bovenwinds van de sensor weergegeven. Voor de blad-/naaldverliezende opstanden zijn de ruwheden genomen zoals die gevonden zijn voor de blad-/naaldhoudende periode. Om de afhankelijkheid van het zichtveld van een sensor die een turbulente flux meet,

aan te geven, is voor elke locatie de relatieve fluxbijdrage berekend voor een onstabiele en een neutrale atmosfeer. Bij bossen zullen de atmosferische condities vaker richting neutraal dan onstabil zijn. Dit houdt in dat de fluxsensor boven bossen een relatief groot oppervlak ziet. Een voordeel hiervan is dat de gemeten flux representatief is voor een groter oppervlakte en minder onderhevig is aan lokale variaties. Een nadeel is echter dat de gemeten flux ook vervuild kan zijn met flux afkomstig van een ander oppervlak dan dat van het beoogde bos. Vergelijkt men figuur 2 met figuur 4 dan ziet men dat dit vooral op kan treden bij de locatie Bankenbos.

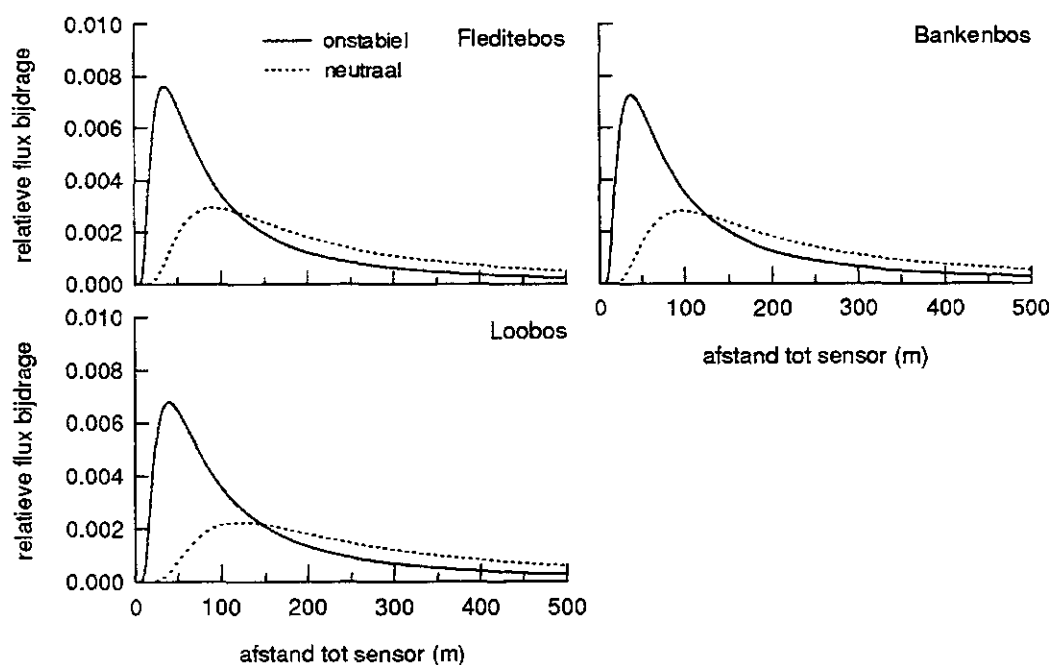


Fig. 4 De bronsterkte van de flux als functie van de afstand tot de sensor

Hier is de afstand van de sensor tot de bosrand in het meest ongunstige geval (richting NW) slechts 100 m, in het meest gunstige geval (richting ZZW) is dit ongeveer 1 km. Het is voor deze locatie van groot belang om bij de verdere analyse van de fluxmetingen rekening te houden met de windrichting en de atmosferische condities. Voor de andere locaties geldt dit in veel mindere mate. In tabel 2 is voor drie locaties de afstand tot de plaats waar de maximale fluxbijdrage vandaan komt gegeven. Voor de berekening van z_0 en d wordt verwezen naar § 5.2.

Tabel 2 De afstand tot de plaats waar de maximale fluxbijdrage vandaan komt x_{max} , voor drie locaties, bij een neutrale atmosfeer

Locatie	$z_{ref} \cdot d$	z_0	x_{max}
Fleditebos	14,1	1,7	92
Loobos	17,9	1,5	121
Bankenbos	15,3	2,4	97

3 Beschrijving van de meetopstellingen

De standaardmetingen op iedere locatie zijn op te delen in automatische en niet-automatische (hand) metingen. De automatische metingen worden uitgevoerd met een eddycorrelatiesysteem, een dataloggersysteem en een FD-systeem. De handmetingen worden uitgevoerd met doorvalbakjes, bladvalbakken en een LAI-meter. Naast deze standaardmetingen worden er nog locatiespecifieke metingen gedaan van grondwaterstand, afvoerdebieten en bodemvochtspanning. Het eddycorrelatiesysteem en het dataloggersysteem zijn gemonteerd op en in een hoge steigermast. De andere systemen bevinden zich in de nabijheid van deze mast.

3.1 De automatische meetsystemen

3.1.1 Het eddycorrelatiesysteem

Dit systeem is oorspronkelijk ontworpen in samenwerking met het Geografisch Instituut Kopenhagen en de vakgroep Meteorologie van de Landbouwwuniversiteit Wageningen. Het meet de volgende grootheden:

- windsnelheid (in drie dimensies)
- virtuele luchttemperatuur
- absolute luchtvochtigheid

Hieruit worden afgeleid :

- luchttemperatuur
- windrichting
- momentumflux
- voelbare warmteflux
- latente warmteflux (verdamping)

Kern van het systeem is een Gill 3D ultrasonische anemometer. Dit instrument meet met 20 Hz de drie vectoren van de windsnelheid en de geluidssnelheid en stuurt deze gegevens via RS232-communicatie naar een draagbare PC. Een sonische anemometer werkt met geluidspulsen. Een puls wordt uitgezonden door een 'transducer' en opgevangen door een 'receiver'. De tijd die een geluidspuls nodig heeft om de bekende afstand tussen transducer en receiver af te leggen wordt gemeten. Deze tijd wordt beïnvloed door de windsnelheid zodat deze hieruit berekend kan worden. De geluidssnelheid is afhankelijk van de luchttemperatuur. Uit de gemeten geluidssnelheid kan de (virtuele) luchttemperatuur worden berekend, omdat deze relatie bekend is.

De gebruikte draagbare PC is een Hewlett-Packard 200LX palmtop. Deze PC is klein, heeft een zeer laag energieverbruik en een 5 Mb PCMCIA geheugenkaart voor opslag van de data. Op deze PC draait een C-programma dat de 20 Hz data van de ultrasonische anemometer ontvangt, de covarianties en gemiddelden over een half uur interval berekent en deze opslaat op de geheugenkaart. Voor berekening van de gemiddelden wordt een voortschrijdend gemiddelde gebruikt met een tijdsconstante

van 200 seconden. Op het scherm van de PC laat het de over een half uur gemiddelde fluxen en gemiddelden zien (ongecorrigeerd).

De ultrasonische anemometer heeft vijf analoge ingangen die met 10 Hz gescand worden. Op een van deze ingangen is een Krypton 'fast response'-hygrometer aangesloten. De metingen van dit instrument worden meegestuurd met de andere metingen naar de PC.

De ultrasonische anemometer en de snelle-respons hygrometer zijn vlak naast elkaar gemonteerd op een pneumatisch uitschuifbare mast. Deze mast is geplaatst boven op de steigermast en kan eenvoudig op verschillende hoogtes ingesteld worden. Voor onderhoud wordt de mast een keer per week ingeschoven. De PC bevindt zich in een stalen kast die in de mast is opgehangen. In deze kast bevindt zich ook het dataloggersysteem. De specificatie van de instrumenten is gegeven in tabel 3.

Tabel 3 Beschrijving instrumentarium eddy correlatiesysteem

Parameter	Instrument	Fabrikant	Type	Nauwkeurigheid
windsnelheid u	sonische anemometer	Gill Instruments	Solent 1012R2	± 1,5%
windsnelheid v	sonische anemometer	Gill Instruments	Solent 1012R2	± 1,5%
windsnelheid w	sonische anemometer	Gill Instruments	Solent 1012R2	± 1,5%
luchttemperatuur	sonische anemometer	Gill Instruments	Solent 1012R2	± 0,5%
absolute luchtvochtigheid	fast response hygrometer	Campbell	Krypton KH2O	± 5%

3.1.2 Het dataloggersysteem

Het dataloggersysteem bestaat uit een Campbell CR10 datalogger, een Campbell AM416 analoge multiplexer, een Campbell SDM-SW8A 'switch closure module' en een aantal instrumenten (voor specificatie zie tabel 4). Het systeem meet:

- inkomende en uitgaande kortgolvlige straling
- inkomende en uitgaande langgolvlige straling
- temperatuur van de langgolvlige stralingsmeters
- luchttemperatuur
- relatieve luchtvochtigheid
- snelle-responsluchttemperatuur
- windsnelheid
- windrichting
- neerslag
- doorval
- bodemwarmteflux
- temperatuur van de datalogger
- de accuspanning

Iedere 20 seconden wordt er een meting gedaan. Het gemiddelde over een half uur en de standaarddeviatie worden in het geheugen opgeslagen. De neerslag en doorvalmetingen worden opgeslagen als totalen over een 5 minuten-interval. De luchttemperatuur wordt met het snelle-responsthermokoppel met een frequentie van 8 Hz gemeten. Ook hiervan wordt het gemiddelde over een half uur en de standaard deviatie opgeslagen. Een keer per week worden de data opgehaald met behulp van een palmtop-PC.

Tabel 4 Beschrijving instrumentarium dataloggersysteem

Parameter	Instrument	Fabrikant	Type	Nauwkeurigheid
Inkomende kortgolvlige straling	pyranometer	Kipp&Zonen	CM21	± 1%
Uitgaande kortgolvlige straling	pyranometer	Kipp&Zonen	CM21	± 1%
Inkomende langgolvlige straling	pyrgeometer	Kipp&Zonen	CG1	± 10%
Uitgaande langgolvlige straling	pyrgeometer	Kipp&Zonen	CG1	± 10%
Temperatuur langgolvlige stralingsmeters (2x)	platina weerstand	Kipp&Zonen	PT100	± 0,1 °C
Luchttemperatuur	platina weerstand	Vaisala	HMP35A	± 0,1 °C
Relatieve luchtvochtigheid	solid state	Vaisala	HMP35A	± 2% RH
Fast response-luchttemperatuur	thermokoppel	Omega	0,002 "	± 0,5 °C
Windsnelheid	cup anemometer	Vector	A101ML	± 1%
Windrichting	windvaan	Vector	W200P	± 2°
Neerslag	tipping bucket	EM	ARG100	± 0,2 mm
Doorval	tipping bucket	SC-DLO	-	± 0,07 mm
Bodemwarmteflux (1x)	fluxplaat	TPD-TNO	WS31	± 5%
Bodemwarmteflux (3x)	fluxring	Hukseflux	SH1	± 5%

3.1.3 Het bodemvochtsysteem

Voor het meten van de diëlektrische constante van de bodem, de bodemtemperatuur en de elektrische geleidbaarheid is heeft IMAG-DLO een bussysteem ontwikkeld waarop meerdere MCM101 sensoren kunnen worden aangesloten. Het bussysteem bestaat uit een PC, een 'powerunit' en een 'fieldunit'.

De PC zorgt voor de aansturing van de sensoren en registratie van de meetwaarden. De 'powerunit' verzorgt de voeding van het bussysteem en voor de vertaling van de RS232-signalen van de PC naar RS485-signalen voor het bussysteem. De

'fieldunit' ontvangt de bussignalen, wacht op een opdracht om een sensor in te schakelen en zendt vervolgens de meetwaarden terug via de 'powerunit' naar de PC.

Voor de PC is het programma HPmuxcom geschreven in TurboPascal. Dit is een speciale versie van muxcom die gebruik maakt van de 'Low Power' faciliteiten van de palmtop PC. Het bussysteem bestaat nu uit één 'fieldunit' met 10 sensoren. Het kan uitgebreid worden tot maximaal 30 'fieldunits' met elk 15 sensoren.

De MCM101-sensoren zijn uitgevoerd met drie pennen van 65 mm. De sensoren werken volgens de FD-meetmethode waarbij het diëlektricum van de bodem gemeten wordt bij een frequentie van 20 MHz. De diëlektrische constante (ϵ) heeft een bereik van 1-80 en een nauwkeurigheid van $\pm 1\%$, de geleidbaarheid (EC) heeft een bereik van $0 - \pm 2 \text{ mS.cm}^{-1}$ met een nauwkeurigheid van $\pm 0,01 \text{ mS.cm}^{-1}$ en de temperatuur heeft een bereik van $0-50 \text{ }^\circ\text{C}$ met een nauwkeurigheid van $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Voor de kalibratie kan gebruik gemaakt worden van de standaardkurve volgens Topp et al. (1980). Deze is echter alleen geschikt voor zandgronden. Voor een nauwkeuriger meting in andere grondsoorten moet een nieuwe curve worden bepaald.

Ieder half uur wordt een meting gedaan aan alle 10 sensoren. De resultaten worden opgeslagen op de PCMCIA-kaart van de palmtop-PC en wekelijks opgehaald. De PC en 'powerunit' bevinden zich in een stalen kast die in de mast is opgehangen.

3.1.4 De regenmeter

Op iedere locatie is ook een EM regenmeter geplaatst in een open veld in de nabijheid van de steigermast. Deze regenmeter is niet op het dataloggersysteem aangesloten maar heeft een eigen logger. Het instrument is verder identiek aan de regenmeter op de steigermast. De logger wordt gevoed met batterijen. Eens per maand worden de gegevens uitgelezen met behulp van een palmtop-PC.

3.1.5 Tensiometers

Vanaf voorjaar 1996 zal op elke locatie de zuigspanning van het bodemvocht gemeten gaan worden. Hiervoor worden in twee profielen in totaal 10 tensiometers aangebracht. De op druksensoren aangesloten tensiometers worden door een datalogger een keer per uur gemeten. Dit mV-sigitaal wordt via een kalibratiecurve omgezet naar een zuigspanning. Het zuigspanningssysteem is ontwikkeld en gebouwd op SC-DLO. Op het systeem is ook een eenvoudige regenmeter aangesloten. Bij een regenbui wordt de meetfrequentie tijdelijk verhoogd. Dit om een eventuele verplaatsing van een vochtfront goed vast te kunnen leggen. Gedurende de komende winters zal het systeem afgekoppeld worden om beschadiging van de druksensoren door vorst te voorkomen.

3.1.6 Grondwaterstandslogger

Op alle locaties wordt de grondwaterstand in ten minste één peilbuis automatisch gemeten. Het hiervoor gebruikte systeem bestaat uit een datalogger gekoppeld aan een druksensor. De druksensor hangt onder water in een grondwaterpeilbuis en meet de hoogte van de kolom water die zich boven de sensor bevindt. De nauwkeurigheid van de meting is beter dan 1 cm. De hoogte van de sensor ten opzichte van het maaiveld/NAP is bekend. Alle andere peilbuizen worden één maal in de week met de hand afgelezen.

3.1.7 De energievoorziening

Het eddycorrelatiesysteem, het dataloggersysteem en het FD-systeem worden gezamenlijk van energie voorzien door een 12V-accu. De accu wordt bijgeladen door een zonnepaneel en een windgenerator. Laadregelaars voorkomen overladen en overontladen. Het zonnepaneel en de windgenerator hebben samen voldoende vermogen om de systemen continu van stroom te voorzien. Alleen bij aanhoudende windstilte gecombineerd met bewolking kan op den duur een energietekort optreden. Het totale stroomverbruik is ± 300 mA.

3.1.8 De locatiegebonden systemen

Op twee locaties wordt gebruik gemaakt van meetstuwen gecombineerd met automatische peilschrijvers om de afvoeren te meten. In het Fleditebos wordt gebruik gemaakt van trapeziumvormige scherpe overlaten met een breedte van 0,35 m en een maximumhoogte van 0,15 m. De afvoer Q ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) kan als volgt berekend worden:

$$Q = C h^a \quad (5)$$

hierbij is h de waterhoogte (m) boven de drempel van het meetschot. Bij de Kampina wordt gebruik gemaakt van een V-vormige scherpe overlaat met een hoek van 90° en een maximum overstorthoogte van 0,15 m. De ijkwaarden C en a zijn: voor het Fleditebos $C = 1,860$ en $a = 1,5$ en voor Kampina $C = 1,365$ en $a = 2,5$. De peilschrijvers zijn uitgerust met vlotter en registreren elke 10 minuten de actuele, de gemiddelde, de maximum- en de minimumhoogte in het meetinterval. De nauwkeurigheid van de peilschrijvers is 0,001 m.

3.2 De niet-automatische metingen

3.2.1 Doorvalbakjes

In de nabijheid van de steigermast is een matrix van kleine doorvalmeters geplaatst. De matrix telt 6 bij 6 bakjes, in totaal 36 bakjes met een onderlinge afstand van 4 m. De oppervlakte van de matrix is 400 m². De bakjes bestaan uit lege plastic flessen met een inhoud van 2 l die door zijn gezaagd op een hoogte van 22,5 cm. Het bovenste gedeelte functioneert als trechter met een diameter van 9,72 cm en het onderste gedeelte als opvangreservoir. Deze doorvalbakjes zijn in een houder geplaatst. De houder bestaat uit een PVC-buis met een lengte van 25 cm en is ingegraven tot circa 15 cm. De openingen van de trechters zijn waterpas en, indien mogelijk afhankelijk van het reliëf van de locatie, op gelijke hoogte. Iedere week wordt de verzamelde doorval per bakje afgelezen.

3.2.2 Bladvalbakken

Gevallen naalden/bladeren worden wekelijks verzameld in vijf bladvalbakken. Deze staan verspreid rond de steigermast en worden iedere week verplaatst. Een bak bestaat uit een rechthoekig houten frame op poten waarin een fijnmazig doek (maaswijdte 0,1 mm) is gehangen. De oppervlakte van de bak is 1 m². Van de verzamelde naalden/bladeren wordt het oppervlak bepaald. Als ze te droog zijn worden ze bevochtigd. Voor de oppervlaktebepaling van de naalden wordt per monster de oppervlakte gemeten van 10 porties van 100 naalden. Voor de oppervlaktebepaling van de bladeren wordt van circa 10% van het monster de oppervlakte gemeten. Vervolgens worden de naalden/bladeren één week gedroogd bij circa 20 °C en gewogen. Aan de hand van de drooggewichten worden de oppervlaktes berekend voor de totale monsters.

3.2.3 Stamafvoermeters

Per locatie zijn zes bomen voorzien van stamafvoermeters. Deze bestaan uit een om de stam gedraaide, in de lengte doorgesneden, flexibele slang aangesloten op een verzamelvat. De slang heeft een diameter van 2 cm en is afgedicht op de boom met siliconenkit. Regelmatig wordt de afdichting gecontroleerd i.v.m. diktegroei van de stam. Iedere week wordt de verzamelde hoeveelheid water gemeten.

4 Dataverwerking

De verwerking van de ruwe data uit het veld tot gecontroleerde en opgeschoonde data in de database gaat in enkele fasen (zie figuur 5). Alle velddata van de automatische systemen behalve die van het eddycorrelatiesysteem worden eerst opgenomen in een ruwe database. Op de data in deze ruwe database worden een aantal controles uitgevoerd (zie § 4.4). Ook worden berekeningen uitgevoerd van de voelbare warmte flux met de temperatuurvariantiemethode (zie § 4.2) en van de langgolvlige straling (zie § 4.3). Hierna volgt een tweede controlefase, waarna de data opgenomen worden in de definitieve database. De gegevens van het eddycorrelatiesysteem worden eerst verwerkt met het programma EDDYCALC voordat deze in de ruwe database worden opgenomen (zie § 4.1).

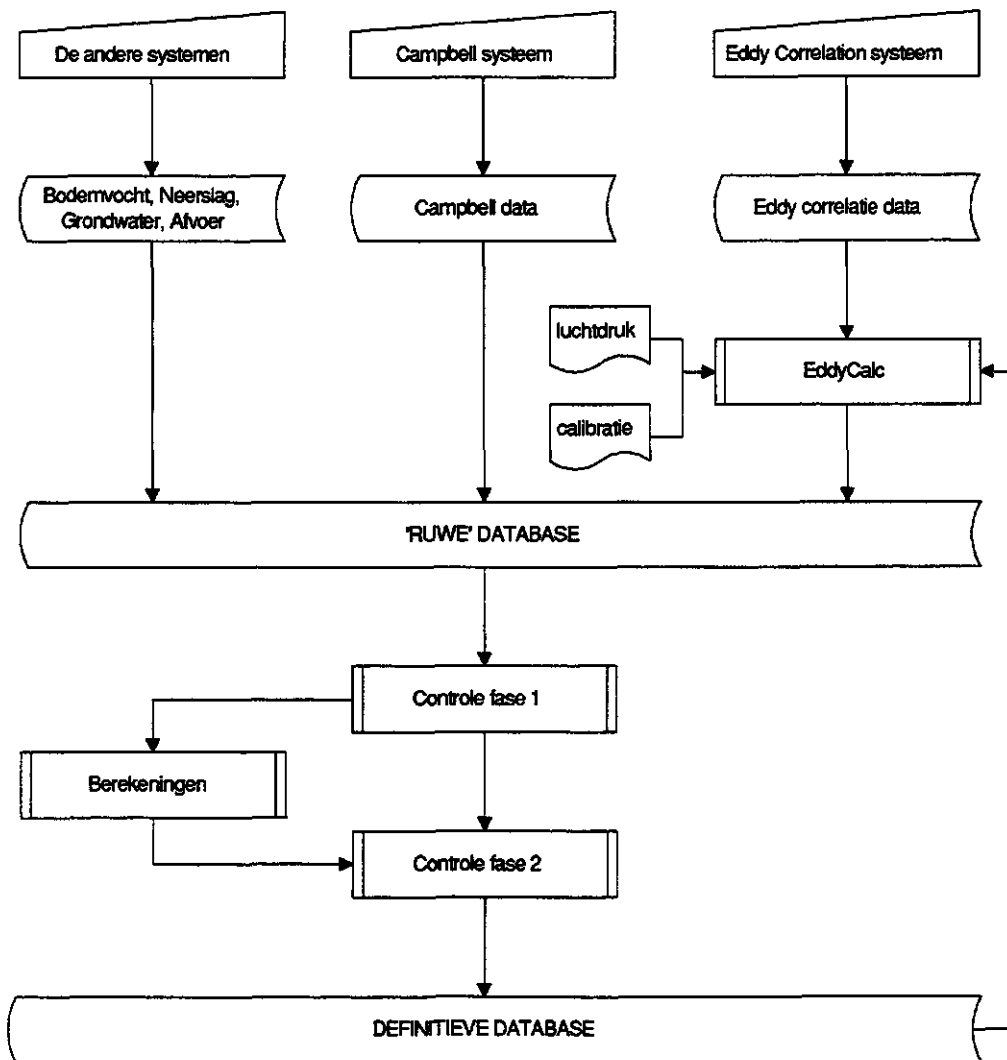


Fig. 5 Schematische weergave van de dataverwerking

4.1 Berekening van de eddycorrelatiefluxen met EDDYCALC

De opgeslagen covarianties en gemiddelden worden een maal per week opgehaald en verwerkt door nieuw ontwikkelde software. Deze is ontwikkeld in samenwerking met het Geografisch Instituut van de Universiteit van Kopenhagen, de vakgroep Meteorologie van de Landbouwniversiteit Wageningen, de Universiteit van Edinburgh en het Hydrologisch Instituut Wallingford. Het programma is geschreven in FORTRAN en voert de volgende taken uit:

- berekening van de fluxen, gemiddelden en standaarddeviaties;
- berekening van windrichting, wrijvingsnelheid en Monin-Obukhov stabiliteitslengte;
- berekening van de rotatiecorrecties (McMillen, 1988);
- berekening van de frequentieresponscorrecties (Leuning and Moncrieff, 1990; Moore, 1986);
- berekening van de dichtheidsfluctuatiecorrecties (Webb et al., 1980);
- uitvoer van de gecorrigeerde fluxen, gemiddelden en standaardafwijkingen per half uur periode.

4.2 Berekening van de voelbare warmtestroom (H) met de temperatuurvariantiemethode

Bij de temperatuurvariantiemethode wordt de voelbare warmtestroom H ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) als volgt berekend:

$$H = -\rho c_p T_* u_* \quad (6)$$

Hier is ρ de dichtheid van de lucht ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), T_* de temperatuurschaal (K) en u_* de wrijvingsnelheid van de lucht ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). De wrijvingsnelheid wordt berekend met vergelijking (9) en de temperatuurschaal wordt bepaald uit een empirische relatie zoals Tillman (1972) die heeft voorgesteld:

$$\frac{\sigma_\theta}{T_*} = -C_1 \left(C_2 - \frac{(z-d)}{L} \right)^{-1/3} \quad (7)$$

waarbij σ_θ de standaardafwijking van de temperatuur is, T_* de temperatuurschaal, z de referentiehoogte (m), d de verplaatsingshoogte van het nulvlak (m), L de Monin-Obukhov stabiliteitslengte (m). C_1 en C_2 zijn constanten met de volgende relatie: $C_2 = -(C_1/C_3)^3$, $C_1 = 0,95$ en $C_3 = -2,5$. Deze relatie kan alleen gebruikt worden onder onstabiele atmosferische condities.

4.3 Berekening van de langgolvlige straling

De pyrgeometer CG1 is in feite een temperatuursensor voor lage temperaturen. Het afgegeven microvoltsignaal is proportioneel met de infrarood-stralingsuitwisseling tussen sensor en stralingsbron. Om de absolute waarde van de stralingsflux te bepalen wordt de kalibratiewaarde en de temperatuur van het instrument gebruikt. De

temperatuur van het instrument wordt gemeten met een PT100 platina weerstand. Berekening van de langgolvlige straling $L^{\uparrow\downarrow}$ uit de afgegeven spanning V , de temperatuur van de sensor T_{sensor} en kalibratiewaarde K van het instrument:

$$L^{\uparrow\downarrow} = \frac{V}{K} + 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot T_{sensor}^4 \quad (8)$$

4.4 Controle van de gegevens

De gegevens moeten bij de eerste fase van de controle aan drie criteria voldoen: maximum/minimum, standaarddeviatie en verschil met de vorige meting. Bij de maximum/minimumcontrole wordt gekeken of de meetwaarden binnen tevoren vastgestelde boven- en ondergrenzen vallen. Deze grenzen zijn bepaald door te kijken naar het normale verloop van de meetwaarden over het jaar (zie tabel 5). Alle meetwaarden die hier buiten vallen worden in eerste instantie niet verwijderd uit de database maar krijgen een speciale code toegevoegd, wat het mogelijk maakt deze apart te behandelen. De controle op standaarddeviatie en verschil met de vorige meting gaat in principe op dezelfde manier. Ook hier wordt eerst een grens vastgesteld op basis van het normale verloop van de meetwaarden. De grenzen zijn zo genomen dat ongeveer 95% van de goede meetwaarden er binnen vallen.

Tabel 5 Gehanteerde limieten bij de eerste fase van de controle van de gegevens

Parameter	Ondergrens	Bovengrens	Maximale standaarddeviatie	Maximaal verschil per tijdstap
Kortgolvlige straling inkomend ($W.m^{-2}$)	0	870	350	500
Kortgolvlige straling uitgaand ($W.m^{-2}$)	0	94	39	50
Langgolvlige straling inkomend ($W.m^{-2}$)	225	415	34	64
Langgolvlige straling uitgaand ($W.m^{-2}$)	300	490	7,4	17
Bodemwarmteflux ($W.m^{-2}$)	-7	13	1	3
Relatieve luchtvochtigheid (%)	32	100	11	18
Temperatuur ($^{\circ}C$)	-10	30	2	3
Windrichting (graden)	0	360	360	360
Windsnelheid ($m.s^{-1}$)	0,1	10	2,3	2,3
Neerslag (mm)	0	6	n.v.t.	6
Voelbare warmtestroom ($W.m^{-2}$)	-100	500	n.v.t.	250
Latente warmtestroom ($W.m^{-2}$)	-100	500	n.v.t.	300
Absolute luchtvochtigheid ($g.m^{-3}$)	0	17	n.v.t.	2
Bodemtemperatuur ($^{\circ}C$)	-1	25	n.v.t.	0,5
Bodemvocht ($m^3.m^{-3}$)	0	0,5	n.v.t.	0,05
Bodemgeleidbaarheid ($mS.cm^{-1}$)	0	1,5	n.v.t.	0,05

De codes die worden toegevoegd aan de metingen die niet voldoen aan bovenstaande criteria worden gegeven in tabel 6.

Tabel 6 Codering van de meetwaarden

criterium	Code
> Bovengrens	1
< Ondergrens	2
> Maximale std	3
> Bovengrens, > maximale std	4
< Ondergrens, > maximale std	5
> Maximale verschil tijdstap	6
> Bovengrens > maximale verschil tijdstap	7
< Ondergrens > maximale verschil tijdstap	8
> Maximale std > maximale verschil tijdstap	9
> Bovengrens, > maximale std > maximale verschil tijdstap	10
< Ondergrens, > maximale std > maximale verschil tijdstap	11

De aldus geselecteerde data worden individueel bekeken en hierna worden ze alsnog geaccepteerd, verbeterd of verwijderd. De controles in fase 2 zijn anders van aard. Hier wordt een verband gelegd tussen de verschillende metingen en wordt op basis van meteorologische/fysische principes gecontroleerd. Een van de controles is die op de sluiting van de energiebalans; $R_n - H - LE - G - \Delta S$ moet gelijk zijn aan 0 (onder aanname dat er geen advectie optreedt). ΔS is hierbij de verandering in energieopslag in de laag tot $z = z_{ref}$. Ook worden duplometingen van dezelfde parameter met elkaar vergeleken. Een voorbeeld hiervan is de vergelijking tussen de voelbare-warmteflux berekend met data van het eddycorrelatiesysteem en dezelfde flux berekend met de temperatuurvariantiemethode uit de temperatuurfluctuaties van het snelle-respons- thermokoppel. Een volledig overzicht van de controles in de tweede fase staat in tabel 7.

Tabel 7 Toegepaste controles in de tweede fase

Parameter	Meting 1	Meting 2	Vergelijking
Straling	kortgolvig in	kortgolvig uit	onderling via albedo
Bodemwarmteflux	fluxplaat	fluxring	onderling
Luchtvochtigheid	solid state sensor	Krypton hygrometer	onderling
Luchttemperatuur	PT100	ultrasonische anemometer	onderling
Windsnelheid	cup anemometer	ultrasonische anemometer	onderling
Windrichting	windvaan	ultrasonische anemometer	onderling
Neerslag	kantelbakregenmeter veld	kantelbakregenmeter mast	onderling
Bodemtemperatuur	5 dieptes	5 dieptes	onderling
Bodemvocht	5 dieptes	5 dieptes	onderling
Bodemgeleidbaarheid	5 dieptes	5 dieptes	onderling
Voelbare warmtestroom	temp. variantiemethode <i>H</i>	eddycorrelatiesysteem <i>H</i>	onderling
Latente warmtestroom	<i>Rn,G,H</i>	eddycorrelatiesysteem <i>LE</i>	energiebalans

4.5 De database

De verzamelde data worden m.b.v. Paradox 5 voor Windows verwerkt in een database. Paradox is een relationeel database-systeem waarmee de data overzichtelijk kunnen worden opgeslagen in de verschillende tabellen. De tabellen kunnen aan elkaar gekoppeld worden en met behulp van 'queries' kunnen de data bewerkt worden. Verder is het mogelijk de data weer te geven in formulieren, rapporten en figuren. Met behulp van ObjectPal, een geïntegreerde programmeertaal voor Paradox, is het geheel geautomatiseerd.

De files afkomstig van de automatische meetsystemen hebben een ASCII-formaat en worden in de database ingelezen. De data van de verschillende automatische meetsystemen worden opgeslagen in halfuurwaarden. Na de datacontrole beschreven in § 4.4 zullen de gegevens uiteindelijk worden opgeslagen in de volgende hoofdbestanden (tabel 8).

Verder zijn er nog de nevenbestanden met de gegevens van de meetstuwten, grondwaterstanden, doorval gemeten in doorvalbakjes, stamafvoer en bladval.

Tabel 8 Overzicht bestanden database

Eddy correlatiesysteem	Datalogger-systeem	FD-systeem en tensiometers
Windsnelheid in $m.s^{-1}$	inkomende en uitgaande kortgolvlige straling in $W.m^{-2}$	bodemwarmteflux in $W.m^{-2}$
Windrichting in graden	inkomende en uitgaande langgolvlige straling in $W.m^{-2}$	bodemvocht in $m^3.m^{-3}$
Luchttemperatuur in $^{\circ}C$	luchttemperatuur in $^{\circ}C$	elektrische geleidbaarheid bodem in $mS.cm^{-1}$
Absolute luchtvochtigheid in $g.m^{-3}$	relatieve luchtvochtigheid in %	bodemtemperatuur in $^{\circ}C$
Voelbare warmteflux in $W.m^{-2}$	voelbare warmteflux in $W.m^{-2}$	zuigspanning bodemvocht in cm
Latente warmteflux $W.m^{-2}$	windsnelheid in $m.s^{-1}$	
Wrijvingssnelheid in $m.s^{-1}$	windrichting in graden	
z / L	neerslag in mm	
	doorval in mm	
	bodemwarmteflux in $W.m^{-2}$	

5 Eerste resultaten

5.1 Algemene beschrijving van meetjaar 1995

1995 werd door het KNMI gekenmerkt als zeer warm, zeer zonnig en aan de droge kant (KNMI, 1996). In figuur 6a zijn voor het KNMI-station De Bilt de decadegegevens van het meetjaar 1995 en de normalen weergegeven. In het begin van het jaar en aan het begin van de tweede helft van het jaar is sprake van een hogere temperatuur en meer globale straling dan normaal. Ook de windsnelheid en de relatieve luchtvochtigheid zijn hoger dan normaal. De meteorologische variabelen zoals die voor de boslocaties zijn gemeten, sluiten hier goed bij aan (vergelijk figuur 6a met figuur 6b-d). Gemiddeld over het hele land is de neerslag in 1995 lager dan normaal. In de omgeving van het Bankenbos is het tegengestelde het geval en is de neerslag hoger dan normaal (zie tabel 9).

Tabel 9 Neerslag (mm) voor de meetperiode in 1995 van de boslocaties. Voor de nabij gelegen KNMI-stations zijn ook de jaartotalen en de normalen (1961-1990) gegeven (KNMI, 1995)

Locatie	Normaal (1961-1990)	1995	Meetperiode boslocatie
Fleditebos	-	-	697
Zeewolde (KNMI)	-	793	710
Harderwijk (KNMI)	771	768	679
Loobos	-	-	813
Harskamp (KNMI)	815	813	760
Kootwijk (KNMI)	867	772	718
Bankenbos	-	-	832
Veenhuizen (KNMI)	846	854	735
Eelde (KNMI)	779	874	766

De neerslagverdeling door het jaar heen laat zien dat in heel Nederland de tweede helft van het jaar droger dan normaal is. September is hierop een uitzondering en heeft meer neerslag dan normaal. Dat het jaartotaal van de neerslag in het noorden van het land hoger is dan normaal wordt vooral veroorzaakt doordat hier, in tegenstelling tot de rest van Nederland, de neerslag hoger is dan normaal in de maanden juni en juli.

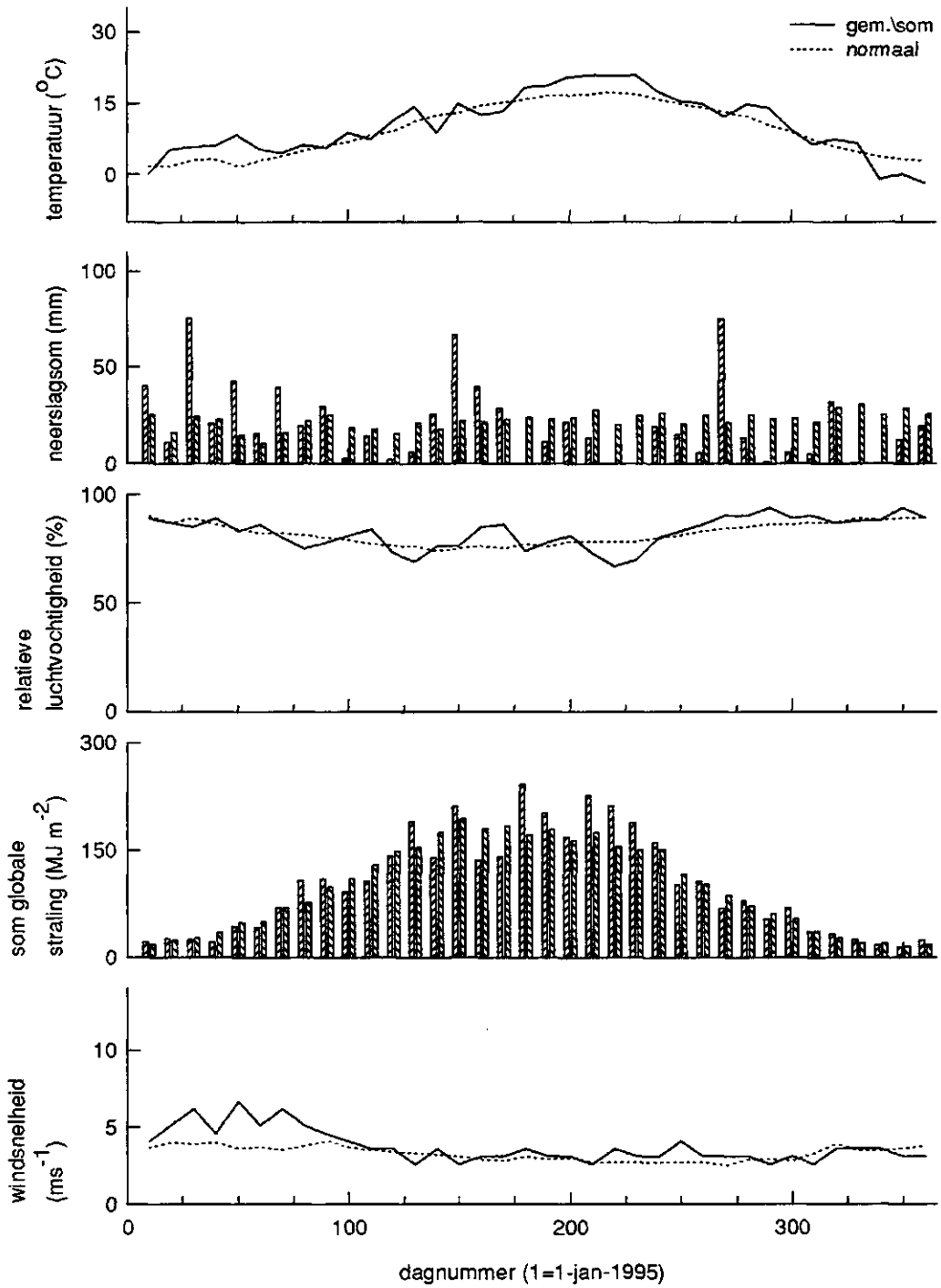


Fig. 6a Decadegegevens KNMI station de Bilt

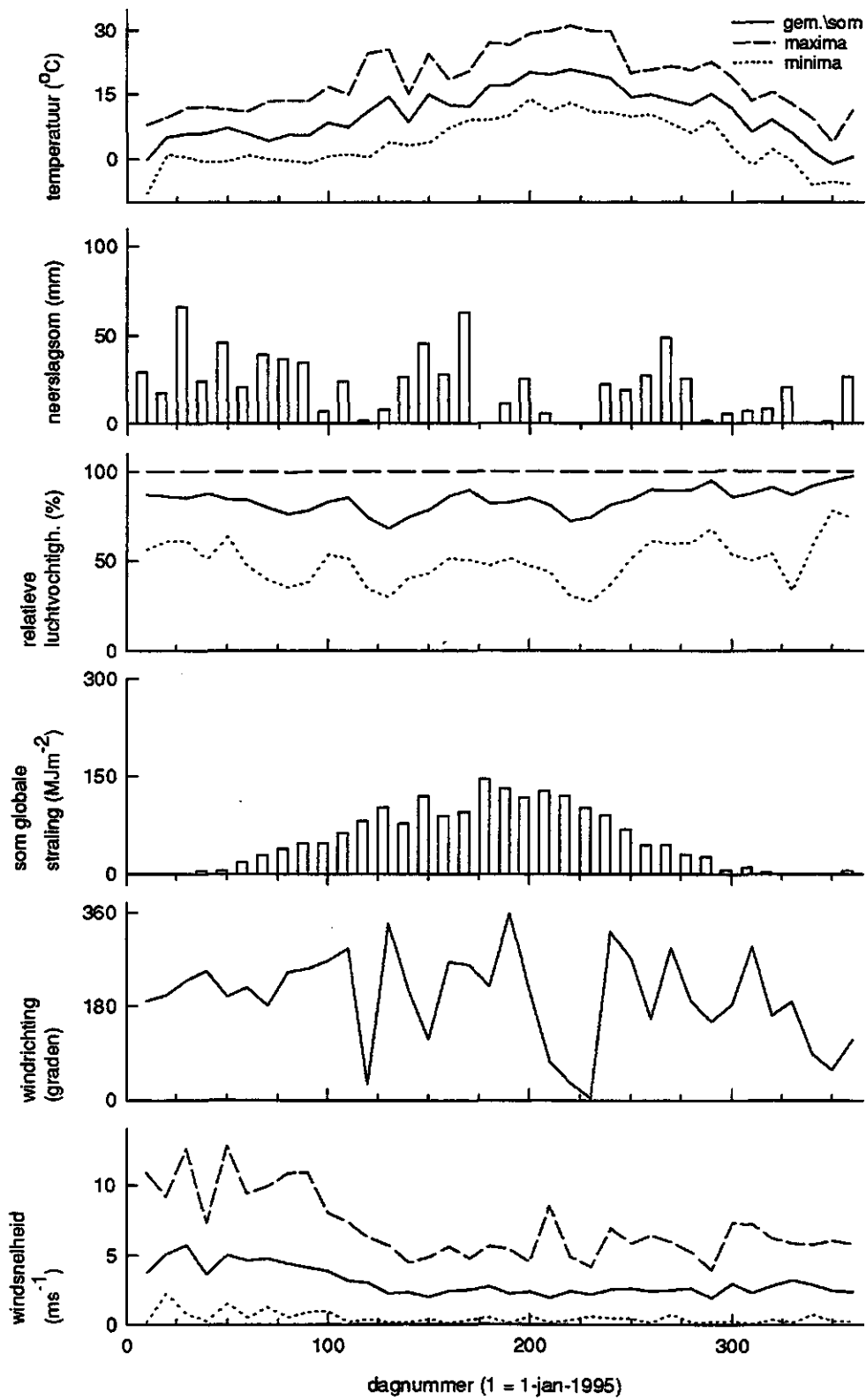


Fig. 6b Decadegegevens Fleditebos

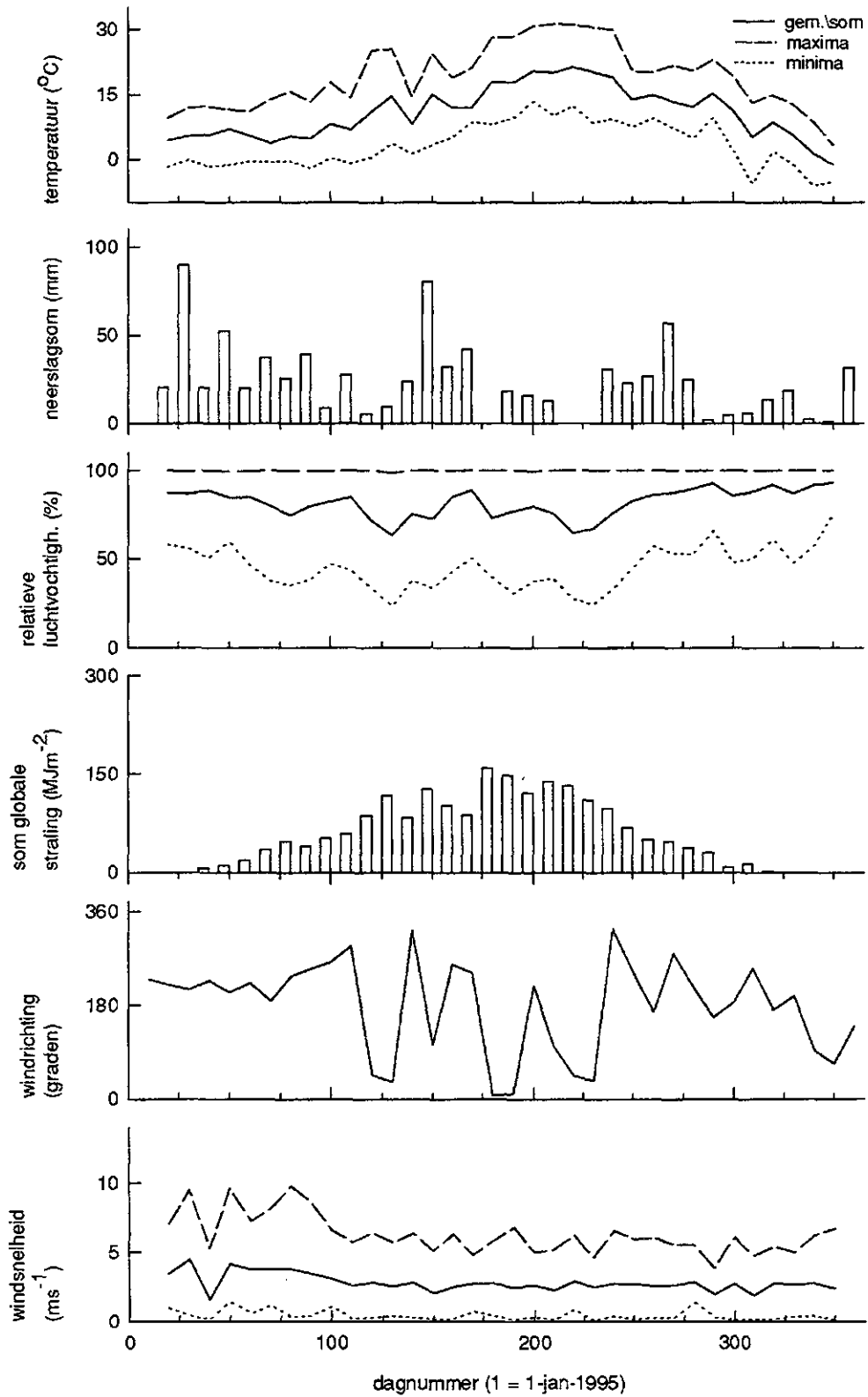


Fig. 6c Decadegegevens Loobos

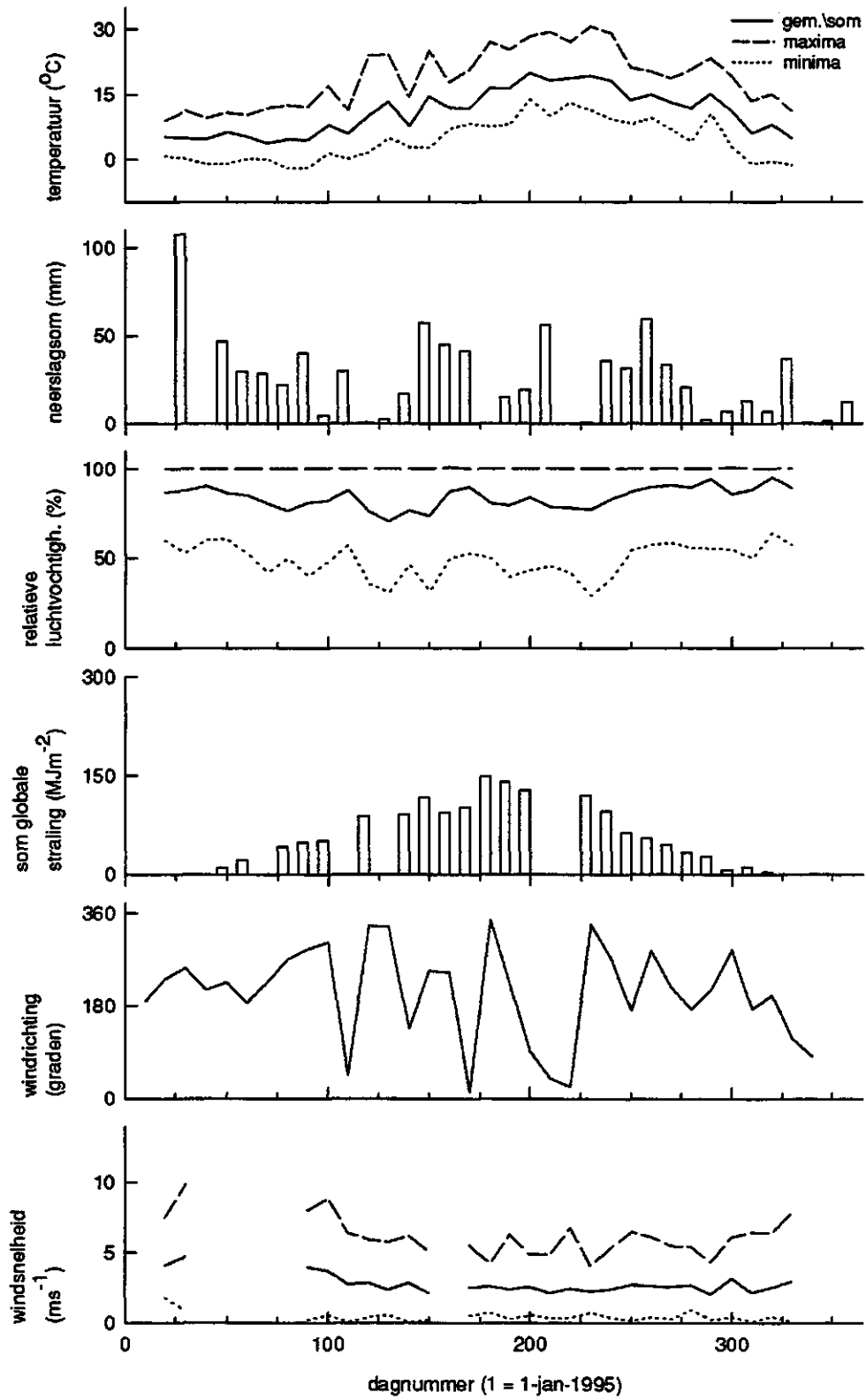


Fig. 6d Decadegegevens Bankenbos

5.2 Aërodynamische ruwheid

De aërodynamische ruwheid van een bos bepaalt in hoge mate de effectiviteit van turbulente uitwisselingsprocessen. In de praktijk wordt de aërodynamische ruwheid van een vegetatie weergegeven door de twee integratieconstanten van het windprofiel: de ruwheidslengte z_0 en de nulvlaksverplaatsing, d . Een meer fysische interpretatie van deze parameters is gegeven door Thom (1975). De nulvlaksverplaatsing is dan het (virtuele) aangrijpingspunt voor de uitwisseling van impuls, terwijl z_0 een maat is voor de effectiviteit van de impulsuitwisseling. In dit project zijn na het eerste jaar metingen voor drie locaties de waarden van z_0 en d bepaald. Hierbij is gebruik gemaakt van het feit dat er naast twee windsnelheidsmetingen, ook een bepaling van de impulsflux plaatsvindt. Deze opstelling maakt het mogelijk de vergelijking van het windprofiel zodanig te herschrijven dat oplossing van d en z_0 mogelijk wordt. De vergelijking van de windsnelheid u luidt:

$$u = \frac{u_*}{k} \left[\ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) - \Psi \left(\frac{z-d}{L} \right) \right] \quad (9)$$

waarin u de windsnelheid, u_* de wrijvingsnelheid en z de meethoogte is. Herschrijven naar twee meethoogten, onder de aanname dat de impulsflux constant is met de hoogte, levert:

$$u_2 - u_1 = \frac{u_*}{k} \left[\ln \frac{(z_2 - d)}{(z_1 - d)} - \Psi \left(\frac{z_2 - d}{L} \right) + \Psi \left(\frac{z_1 - d}{L} \right) \right] \quad (10)$$

Waarin ψ een stabiliteitscorrectie is (Paulson, 1970). Bovenstaande vergelijking geeft een oplossing voor d , de nulvlaksverplaatsing, waarna uit de vergelijking van het windprofiel de ruwheidslengte z_0 volgt. In de praktijk levert dit een wiskundige afhankelijkheid op van beide parameters. In dit rapport is dan ook gekozen om eerst d uit te rekenen voor alle profielen, en om daarna met een gemiddelde d de ruwheidslengtes uit te rekenen. Deze procedure heeft als voordeel dat er een goede schatting van de fout in de parameterwaarden kan worden gegeven.

In figuur 7 is de waarschijnlijkheidsverdeling van d en z_0 gegeven voor het Bankenbos voor het hele seizoen. De bijbehorende gemiddelde waarden voor zomer en winter zijn te vinden in tabel 10. Ook zijn hier de standaardfouten van het gemiddelde gegeven. Opvallend is het geringe verschil in ruwheid tussen zomer en winter bij het Bankenbos. Dit verschijnsel is al eerder gevonden bij eiken (Dolman, 1986). Bij de populieren in het Fleditebos is er een groter verschil. Dit verschil heeft waarschijnlijk te maken met de hoge bladdichtheid van de populieren in de zomer. De ruwheidslengte schaal goed met de hoogte van de opstand en is gemiddeld 10% van de hoogte, in overeenstemming met eerder gevonden waarden (Monteith and Unsworth, 1990). De nulvlaksverplaatsing schaal ook met hoogte maar iets lager dan eerder gevonden waarden, namelijk rond de 55 à 60%. Aanwijsbare verschillen in bladhoudende en bladverliezende soorten zijn er alleen bij de populieren in de ruwheidslengte.

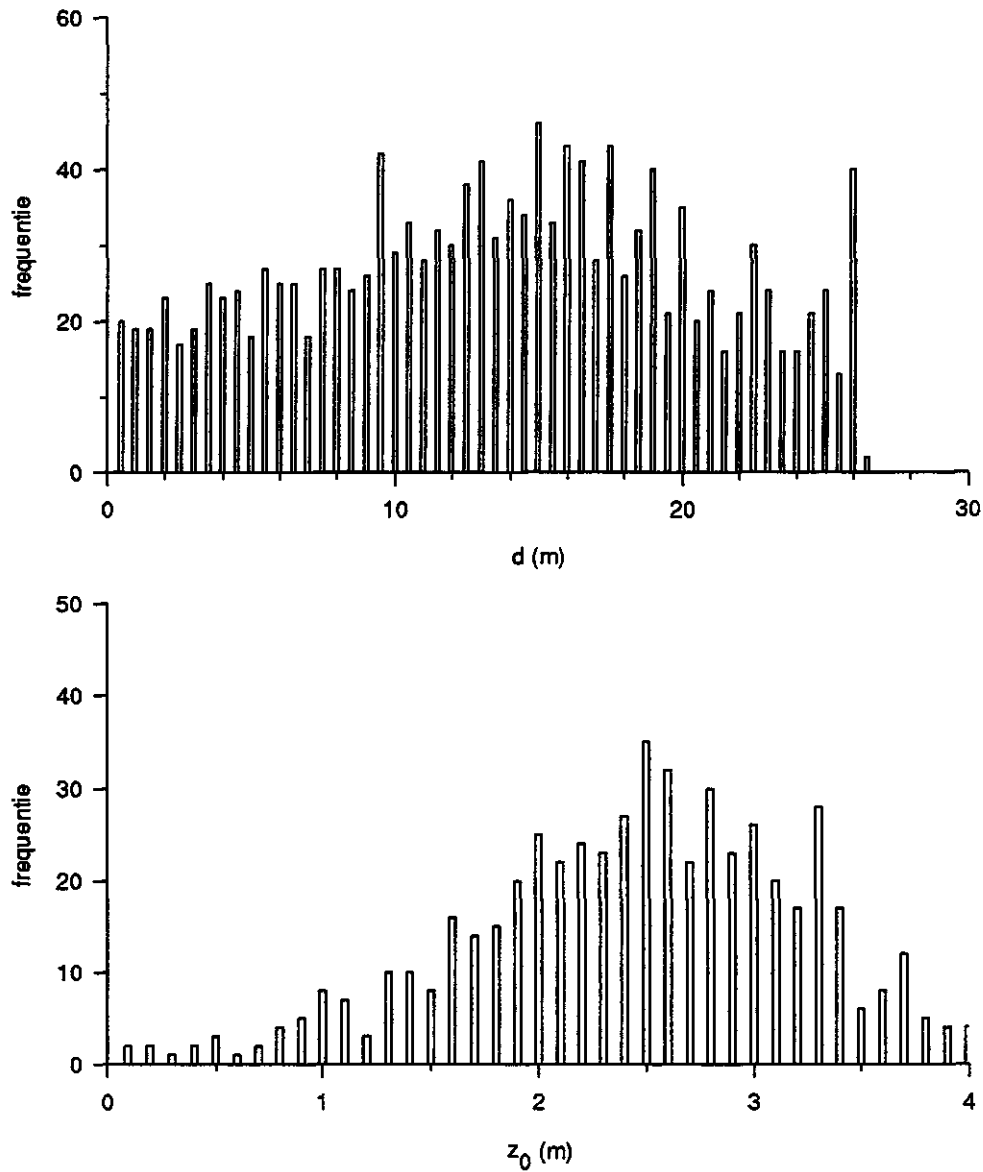


Fig. 7 Waarschijnlijkheidsverdeling van nulvlakverplaatsing (a) en ruwheidslengte (b) voor het Bankenbos

Tabel 10 Ruwheidslengte en nulvlakverplaatsing voor de drie locaties

Locatie	Hoogte (m)	d (m)	Standaard-fout	z_0 (m)	Standaard-fout
Fleditebos blad	16,2	9,1	0,31	1,7	0,05
Fleditebos bladloos	16,2	8,9	0,24	1,2	0,05
Loobos	15,1	8,1	0,17	1,5	0,04
Bankenbos blad	22	12,5	0,24	2,4	0,05
Bankenbos bladloos	22	13	0,39	2,2	0,06

5.3 Interceptie

Interceptieverdamping is het proces waarbij neerslag door het kronendak wordt onderschept en weer verdampt, zonder dat het het bodemoppervlak bereikt. Interceptie wordt daarom hydrologisch vaak als verliespost beschouwd. Interceptieverliezen van Nederlandse bossen kunnen tot 45% van de bruto-neerslag oplopen voor dichte bossen zoals met douglas. Op de Castricumse lysimeters werden verliezen van 62% gemeten bij Oostenrijkse dennen. Bij loofbossen liggen de interceptiepercentages aanzienlijk lager, vaak in de orde van 20 tot 25%. Bij loofbossen speelt echter wel een onderscheid tussen zomer en winter; in de winter liggen de interceptieverliezen zo'n 10% lager dan het zomerniveau.

Het meten van interceptie vereist een nauwkeurige bepaling van de doorval in een opstand. Doorval is een ruimtelijk variabel proces, waarbij stroming langs preferente banen kan optreden, bijvoorbeeld langs druppunten. Dit kan soms leiden tot doorvalpercentages van boven de 100%. In het huidige project worden deze hoge doorvalpercentages meegenomen in de bepaling van het opstandsgemiddelde dat op 36 plaatsen in een opstand wordt bepaald. De doorval wordt op twee manieren bepaald. De ruimtelijke spreiding in doorval wordt bepaald door 36 regenmeters die in zes lijnen van zes regenmeters elk in de ruimte een evenwijdig meetgrid vormen. De gemiddelde afstand tussen de regenmeters bedraagt 4 m. Met deze opstelling wordt het gemiddelde en de accuratesse van de metingen bepaald (zie Lloyd et al., 1988). De doorval wordt eveneens door een doorvalgoot op één plaats bepaald. De waarnemingen met korte tijdsinterval die hieruit voortvloeien, worden vervolgens gecorrigeerd met de ruimtelijk beter betrouwbare wekelijkse metingen.

In figuur 8 is de doorval per week uitgezet tegelijk met de gemeten bruto-neerslag in het open veld voor de drie locaties. Te zien is dat het Fleditebos een wat hoger percentage doorval geeft dan de twee andere locaties: deze hebben een hoger interceptieverlies. Voor lariks in het Bankenbos is het interceptieverlies over het hele seizoen het hoogst: 29% (tabel 11). Grove den in het Loobos verliest eveneens zo'n 22% van de neerslag voordat het de bosvloer bereikt. Het interceptieverlies bij populier in het Fleditebos is het geringst: 21%. Opvallend in deze eerste resultaten is dat grove den ongeveer 50% van het interceptieverlies van douglas heeft. Een groot deel van de Veluwe is bedekt met grove den. In recente studies (Gehrels, 1995) naar grondwaterstandsafhankelijkheid van landoppervlaktebedekking wordt echter vaak een interceptiepercentage gehanteerd dat op douglas betrekking heeft.

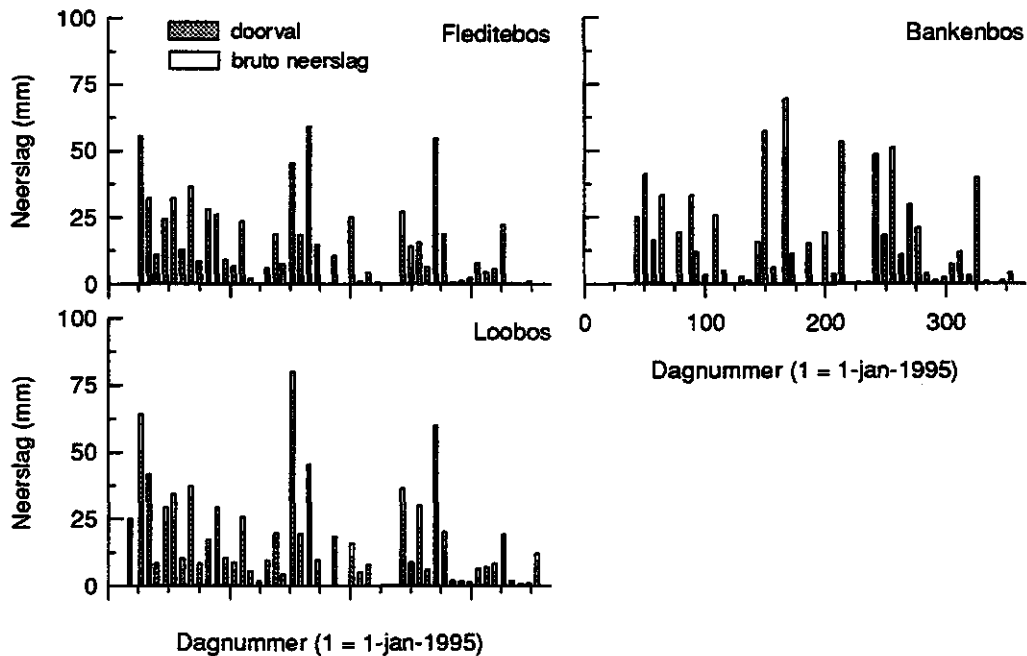


Fig. 8 Doorval en bruto-neerslag voor het Fleditebos, Loobos en Bankenbos

Tabel 11 Doorval en interceptieverlies voor de drie in 1995 bemenen opstanden als percentage van de neerslag (mm)

Opstand	Neerslag z/w (mm)	Doorval jaarlijks (%)	Interceptie zomer (%)	Interceptie winter (%)	Geschatte doorvalfout (%)
Fleditebos	369/328	79,4	26,7	16,7	0,5
Loobos	813	78,5	21,5	21,5	0,5
Bankenbos	539/160	71,1	32,2	23,7	0,7

In figuur 9 wordt het cumulatieve verloop van de doorval weergegeven. De bladrijke en bladloze periode worden hier afzonderlijk aangegeven. In overeenstemming met eerder gevonden resultaten neemt het interceptieverlies af na bladval. In het Bankenbos is het interceptieverlies teruggelopen van 32% in de winter; in de zomer tot 24% van de neerslag, in het Fleditebos van 27 naar 17%. Bij zowel het Bankenbos als het Fleditebos is zo'n 20% van het interceptieverlies afkomstig van buien kleiner dan 3 mm.

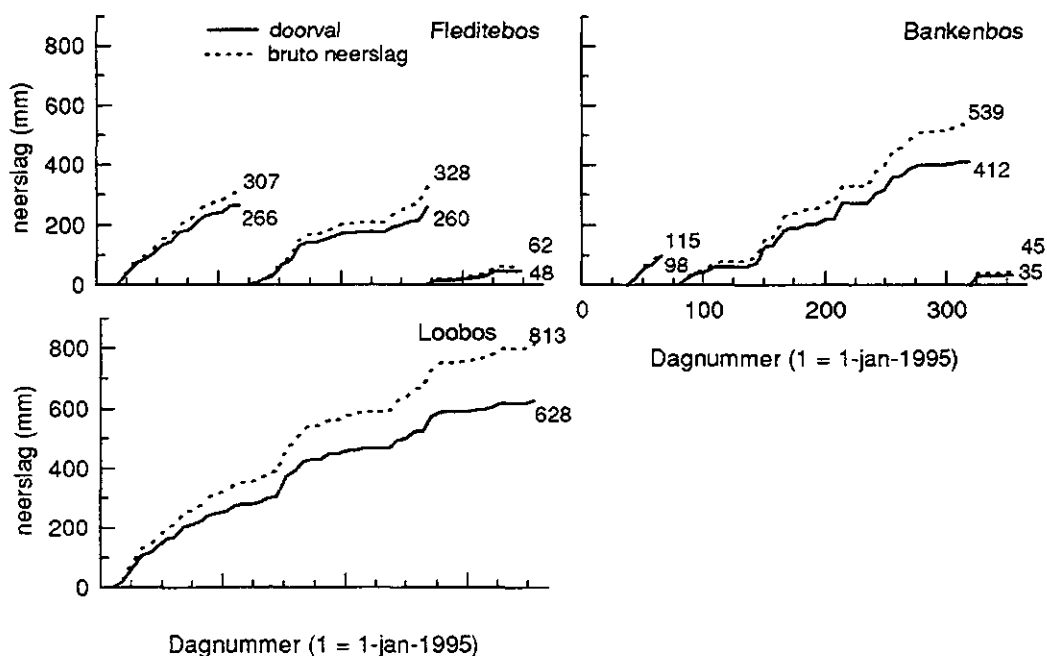


Fig. 9 Cumulatief verloop doorval en bruto-neerslag voor het Fleditebos, Loobos en bankenbos

5.3.1 Foutenbepaling

Van belang is te onderzoeken hoe nauwkeurig en betrouwbaar deze metingen zijn. Twee factoren zijn hierbij van belang. Allereerst is de nauwkeurige waarneming van de bruto-neerslag een eerste vereiste. In dit project wordt de bruto-neerslag op twee manieren bepaald: door middel van een automatisch registrerende neerslagmeter boven in de mast en door een identieke neerslagmeter op de grond, op een open plek, niet te ver van de mast.

Figuur 10 laat de ratio zien tussen de beide neerslagmeters. Gezien de versturende effecten van wind op neerslagmetingen valt het te verwachten dat de neerslagmeting op de mast een onderschatting ten opzichte van de open-veldmeting zal geven. Dit is gemiddeld genomen ook te zien. In de interceptie- en doorvalberekeningen zijn de open-veldwaarnemingen zo veel mogelijk gebruikt. Waar dit niet mogelijk was zijn de mastwaarnemingen gecorrigeerd met de veldwaarnemingen. Twee punten zijn vermeldenswaard. Bij het Fleditebos treden zo nu en dan in de zomer grote verschillen op tussen veld- en mastregenmeters. Deze zijn in deze gevallen te wijten aan de relatief grote afstand tussen de beide regenmeters. Waar de ene regenmeter nog wel neerslag ondervindt, is dit bij de andere al opgehouden. In het Bankenbos doet zich een andere situatie voor. Hier verandert het teken van het verschil nadat overtollige grasgroei rond de open veld regenmeter op het veen verwijderd is. Het verschil blijft in alle gevallen echter rond de 10 à 20% schommelen. Hoewel de open-veldregenmeter betrouwbaarder is dan de mastregenmeter moet ook bij de open-veldregenmeter met een mogelijke fout van zo'n 5 à 10% rekening worden gehouden.

gehouden.

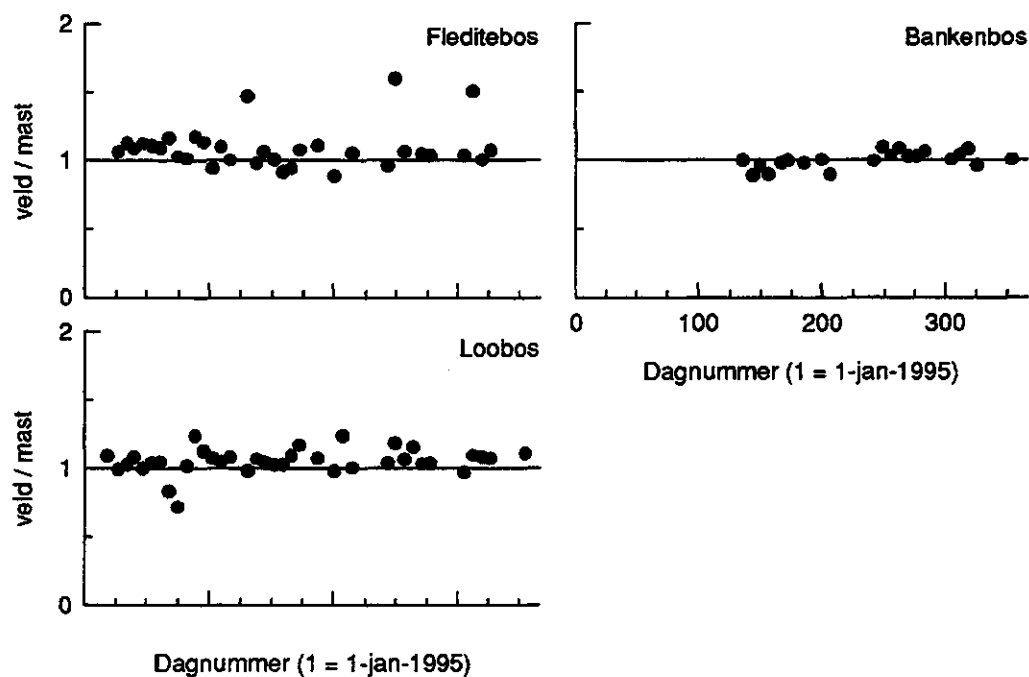


Fig. 10 Ratio neerslag gemeten op het open veld en op de mast voor het Fleditebos, Loobos en Bankenbos

In figuur 11 zijn de verhoudingen tussen de gootdoorval en de bakjesdoorval weergegeven. Hoewel ook hier sprake is van een redelijke mate van spreiding van de resultaten geven de bakjes gemiddeld meer doorval dan de goot. Zoals eerder vastgesteld is doorval een sterk ruimtelijk variërend proces, zodat aan de waarde van de bakjes een grotere betrouwbaarheid moet worden toegekend. Bij de berekening van wekelijkse interceptieverliezen zijn deze waarnemingen dan ook gebruikt. Bij berekeningen die waarnemingen met een kortere tijdsinterval vereisten zijn de gootwaarnemingen gecorrigeerd met de bakjes/gootratio voor die betreffende week.

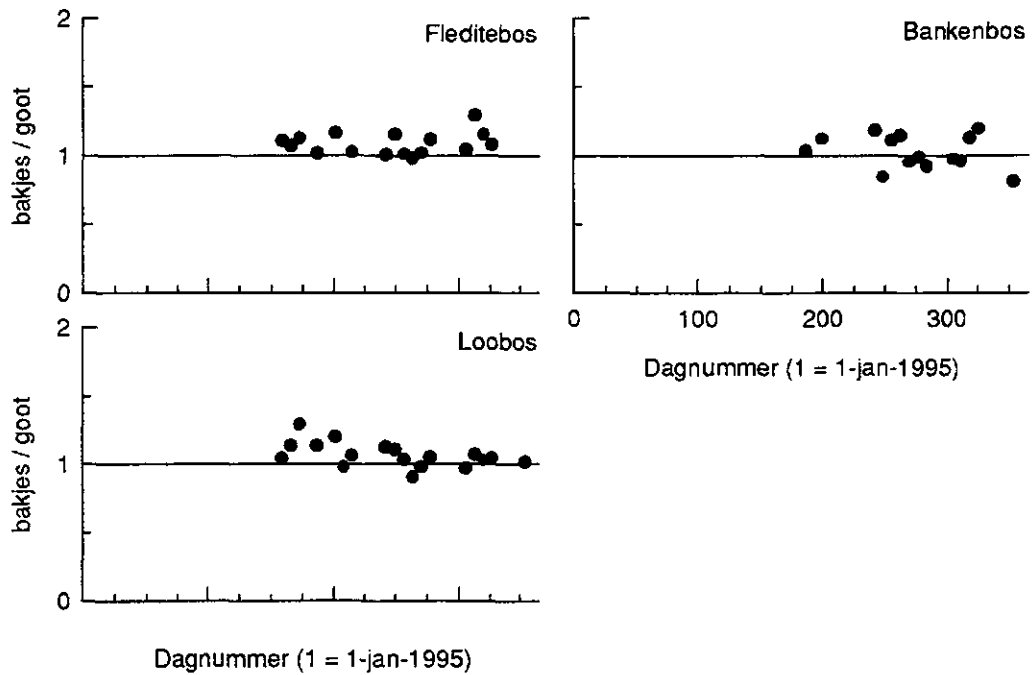


Fig. 11 Ratio doorval gemeten met bakjes en met de doorvalgoot voor het Fleditebos, Loobos en Bankenbos

Lloyd et al. (1988) analyseren de spreiding van ruimtelijke doorvalmetingen in bossen en suggereren dat de fout in die meting kan worden bepaald door de verdeling van de doorval te bepalen. Indien deze normaal verdeeld is kan de fout weergegeven worden met de standaardfout van het gemiddelde. In figuur 12a-b is te zien dat de verdeling min of meer normaal is.

De fout in de interceptieberekeningen is voor alle locaties gering (tabel 11). Dit geeft vertrouwen in de interceptiemetingen en toont aan dat de gevolgde methodiek waarbij zowel ruimtelijke als tijdsresolutie bepaald kunnen worden, goed voldoet.

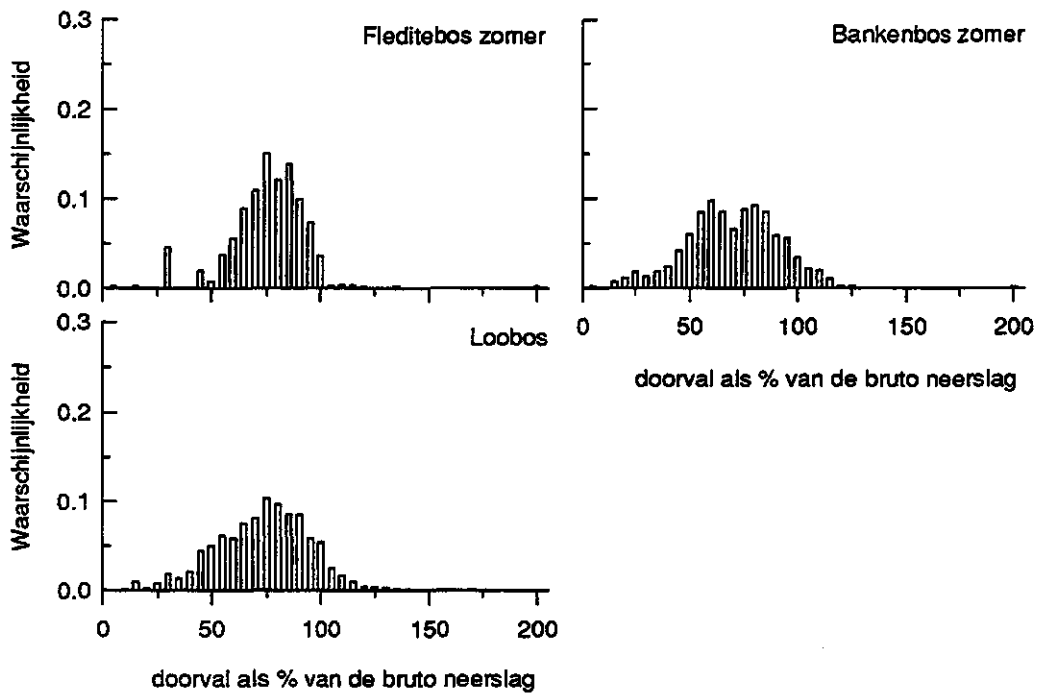


Fig. 12a Waarschijnlijkheidsverdeling van de doorval als percentage van de bruto-neerslag voor het Fleditebos en Bankenbos in de zomer en voor het Loobos voor het gehele jaar

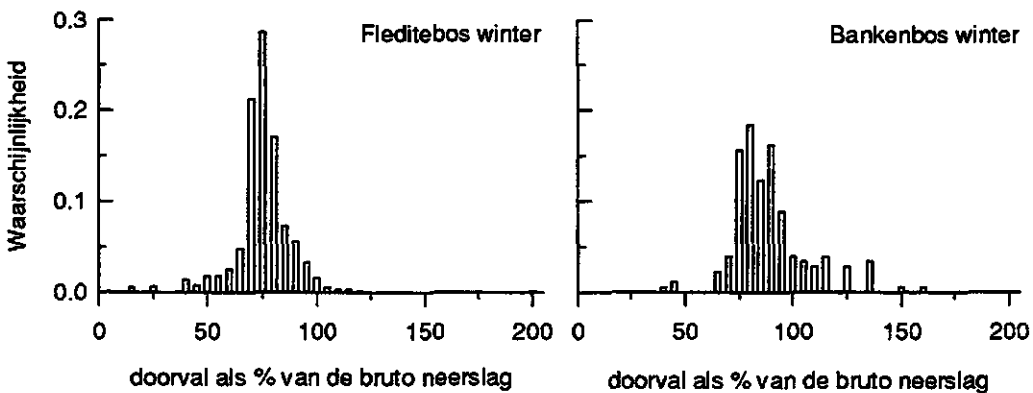


Fig. 12b Waarschijnlijkheidsverdeling van de doorval als percentage van de bruto-neerslag voor het Fleditebos en Bankenbos in de winter

5.3.2 Bepaling verzadigingsconstante

Het bepalen van de verzadigingsconstante voor interceptie bij bossen is een niet geheel van subjectiviteit ontlote procedure (e.g. Leyton et al., 1967). Aangezien onderlinge vergelijkbaarheid in het huidige bosonderzoek een belangrijk item is, is gezocht naar een methode die iets objectiever te werk gaat. Om deze methode te kunnen controleren, of de nauwkeurigheid beter te kunnen bepalen is ook van een andere methode gebruik gemaakt.

De traditionele methode om de grootte van de verzadigingsconstante te kunnen schatten gaat uit van de zogenoemde Leyton-analyse (Leyton et al., 1967). Hierbij wordt de doorval uitgezet tegen de bruto-neerslag. Boven de hoogst gelegen punten wordt een rechte lijn getrokken, die die punten met elkaar verbindt waarbij de minste verdamping *tijdens* de neerslag optreedt. De identificatie van deze punten is echter nogal subjectief. Een te subjectieve procedure verhindert de mogelijkheid om later de opstandskarakteristieken met elkaar te vergelijken. In dit project is dan ook gekozen voor een andere benadering, waarbij door alle punten een regressielijn wordt getrokken. Deze benadering heeft als voordeel dat het dynamische aspect dat aan de verzadigingsconstante kleeft, goed wordt meegenomen. Dit bijvoorbeeld in tegenstelling tot de bepaling van de verzadigingsconstante met behulp van doelbewust nat maken van de kruin, dat geen realistisch beeld van het werkelijke nat worden van een bos geeft (e.g. Jackson, 1975). Bovendien wordt een intensiteit-afhankelijke meetfout door deze procedure uitgemiddeld.

In figuur 13 is de procedure voor het Loobos weergegeven. In dit rapport wordt de procedure enigszins aangepast en wordt interceptie tegen de neerslag uitgezet (vgl. Klaassen et al., 1996). De gemiddelde verzadigingsconstante wordt dan gevonden als het intercept van de regressielijn. De aldus gevonden waarden zijn weergegeven in tabel 12. Opvallend is de lage waarde die gevonden wordt voor de populierenopstand in het Fleditebos. De beide bladverliezende soorten hebben een lagere waarde in de bladloze periode.

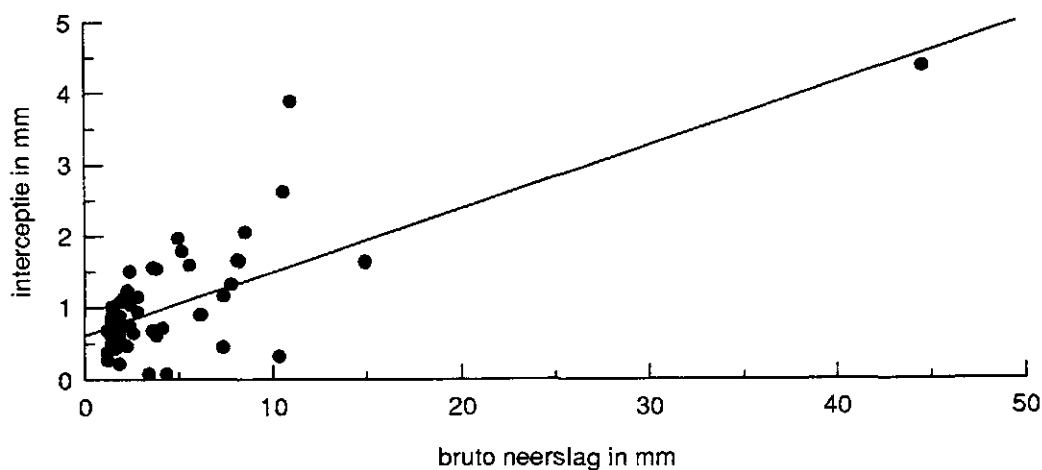


Fig. 13 Bepaling verzadigingsconstante m.b.v. de regressielijn van alle buien in 1995 in het Loobos

De hier gebruikte methode om de verzadiging bij interceptie te bepalen is onderhevig aan een aantal problemen. De methode gaat ervan uit dat er een gemiddelde verzadiging optreedt en dat er geen drainage optreedt voordat de kruin verzadigd is. Klaassen et al. (1996) suggereren dat een andere methode waarbij een exponentiële curve door de bovenste punten (met minimumverdamping) wordt getrokken een beter beeld geeft van de maximale verzadiging van een kruin. Deze verzadiging wordt echter vrijwel nooit bereikt. Het gebruik van zo'n maximale verzadiging in een

Rutter-type interceptiemodel (Dolman en Moors, 1994) is dan ook problematisch. Om toch enige onderbouwing in dit stadium van deze studie aan de waarden voor verzadiging te geven is de verzadiging ook op een andere manier bepaald. Hierbij is gebruik gemaakt van de hoge tijdsresolutie van de doorvalmetingen van de goot.

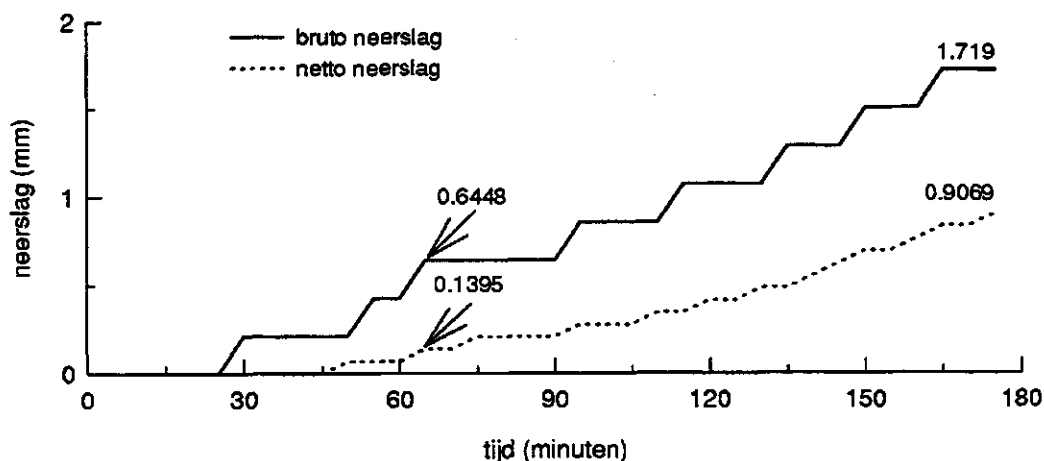


Fig. 14 Bepaling verzadigingsconstante voor één bui in het Loobos

In figuur 14 is deze procedure uitgevoerd voor een bui in het Loobos. In deze figuur is doorval en neerslag uitgezet tegen de tijd. Een aantal dingen valt op. Er is inderdaad geen sprake van doorval de eerste twintig minuten nadat de bui gestart is. Dit suggereert dat deze aanname, geen doorval voor verzadiging, in de gemiddelde procedure inderdaad toepasbaar is. Het verschil tussen doorval en neerslag in het begin van de bui is de verzadiging van de kruin: dit komt voor deze bui overeen met 0,5 mm. Aan het eind als de neerslag opgehouden is, is het verschil tussen doorval en neerslag 0,8 mm: deze hoeveelheid water kan vanaf de kruin verdampen. In tabel 12 zijn de aldus bepaalde verzadigingsconstanten voor een aantal buien weergegeven, tezamen met de daarbij berekende standaardfout. De waarden komen redelijk overeen met de eerder berekende waarden, en suggereren een redelijke mate van betrouwbaarheid. Opvallend is dat de bepaling met de hoeveelheid water aan het eind van de bui systematisch een hogere verzadiging geeft dan bij het begin van de bui. In de relatie nat worden, drainage van de kruin en neerslag zit dus ogenschijnlijk een zekere mate van hysteresis verborgen. In het verdere verloop van het project zullen met meer gegevens dan nu beschikbaar waren, verdere analyses uitgevoerd worden om zo goed mogelijk de verzadigingsconstanten en de rol van kruindrup en interceptie te kunnen bepalen.

Tabel 12 Bepaling verzadigingsconstante volgens twee methoden

Opstand	Gemiddelde S	S volgens bui (begin-eind)	Fout (begin-eind)
Fleditebos zomer	0,4	0,54-0,79	0,04-0,09
Fleditebos winter	0,22	0,37-0,41	0,1-0,08
Loobos	0,62	0,5-1,0	0,05-0,1
Bankenbos zomer	0,73	0,7-0,8	0,15-0,1
Bankenbos winter	0,44	0,5-0,8	0,09-0,15

5.4 Termen in de waterbalans

5.4.1 Verdamping

Verdamping wordt direct gemeten met de eddycorrelatietechniek op alle locaties. Hierbij wordt gebruik gemaakt van snelle-responsensoren voor vocht, windsnelheid en temperatuur. Vooral de meting van het vochtgehalte met snelle-responsensoren is problematisch. Tijdens neerslag is het apparaat, de Krypton-Hygrometer, niet betrouwbaar. In maart 1995 bleek bovendien dat er corrosie aan de behuizing van de lamp van het apparaat optrad tijdens neerslag. Na reparatie van de instrumenten, is een extra beveiliging ingebouwd die ervoor zorgt dat de hygrometer wordt uitgeschakeld bij neerslag. Om toch een schatting te kunnen geven van de verdamping tijdens perioden dat de hygrometer is uitgeschakeld (en dus geen directe meting van de verdamping mogelijk is) is de verdamping berekend als restterm van de energiebalans. Dit veronderstelt dat er een gesloten energiebalans is. Niet-volledige sluiting van de energiebalans kan twee oorzaken hebben. Allereerst kan er sprake zijn van een instrumenteel probleem, waarbij één van de sensoren niet correct meet. Een tweede mogelijkheid is dat er situaties optreden waarbij randeffecten zoals advection een overheersende rol in de energiebalans spelen. Het is in dit stadium nog niet mogelijk deze twee oorzaken te scheiden.

Van belang is op te merken dat bij continue metingen vrijwel altijd instrumentele problemen ervoor zullen zorgen dat de meetreeks onderbroken wordt. De ontwikkeling van een betrouwbare 'invul'-procedure is dan ook een eerste vereiste voor de creatie van continue meetreeksen. In dit stadium van het onderzoek zijn dagwaarden voor verdamping ingevuld met dagwaarden als restterm van de energiebalans. In het verdere verloop van het onderzoek zal aan een combinatie van een dergelijke procedure en invullen met behulp van gekalibreerde modellen worden gewerkt.

In figuur 15 is de dagelijkse gesommeerde energiebalanssluiting uitgedrukt als fractionele fout ten opzichte van de netto-straling in het Fleditebos, het Loobos en het Bankenbos. Tijdens de zomer is de fout gemiddeld nul. Bij geringe straling in de herfst en winter wordt de fout veel groter. Dit komt omdat gedeeld wordt door de netto-straling die dan gering wordt.

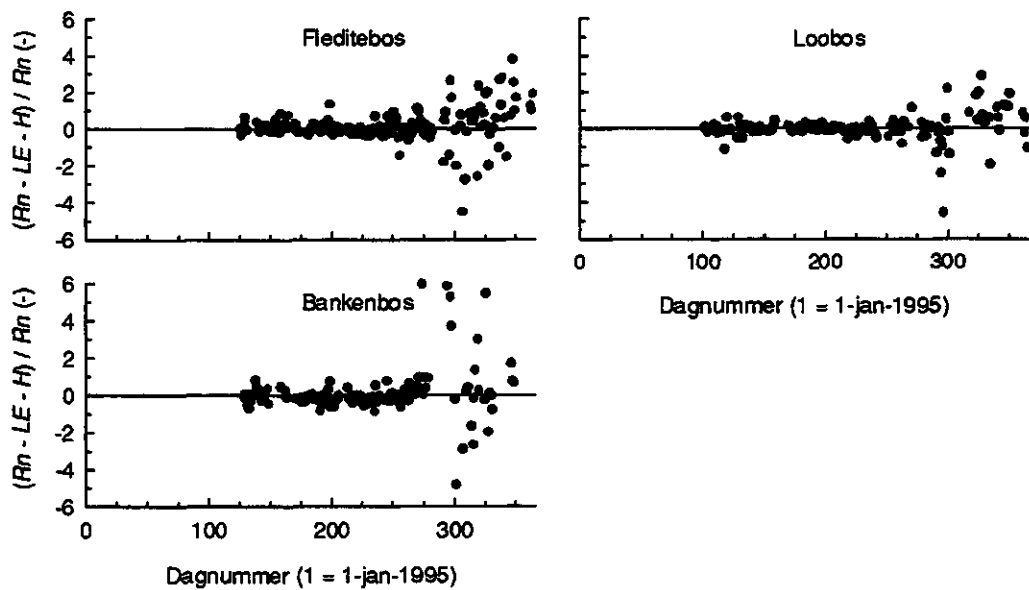


Fig. 15 Dagelijkse gesommeerde energiebalanssluiting uitgedrukt als fractionele fout ten opzichte van de netto-straling in het Fleditebos, het Loobos en het Bankenbos

In figuur 16 is de dagelijkse verdamping over 1995 uitgezet tegen de tijd. De verdamping is zowel direct bepaald als berekend als restterm van de energiebalans. Idealiter zouden deze twee waarden gelijk moeten zijn. Gemiddeld genomen is dat ook het geval voor het Fleditebos, het Bankenbos en het Loobos.

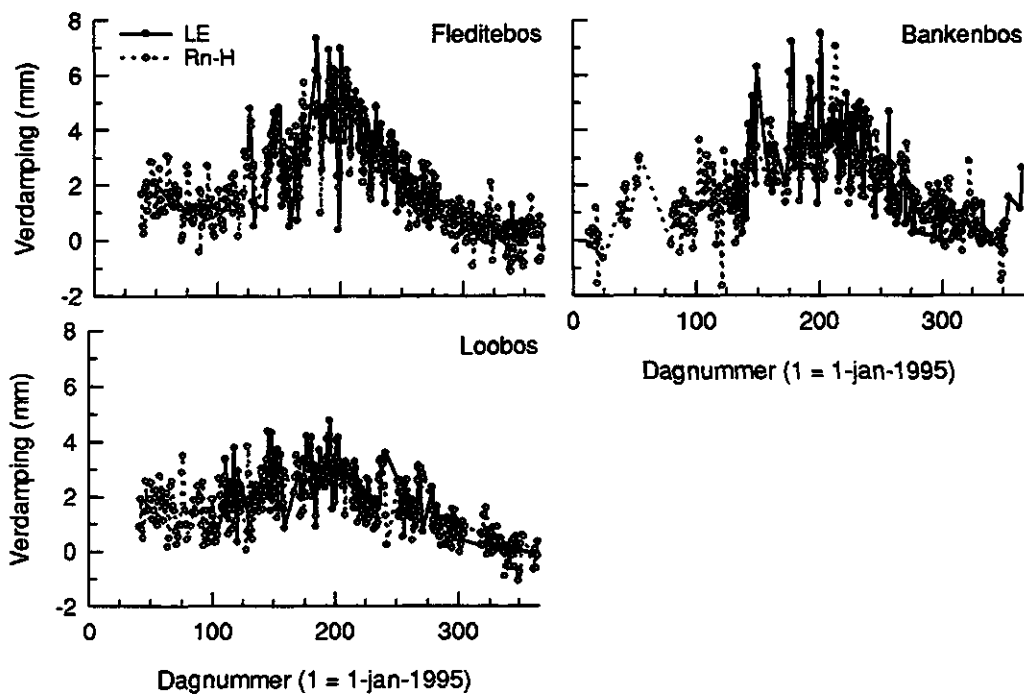


Fig. 16 Dagelijkse verdamping voor het Fleditebos, Loobos en het Bankenbos direct gemeten (LE) en bepaald als restterm van de energiebalans ($R_n - H$)

De hier weergegeven verdamping is overigens de totale verdamping en bestaat uit een deel interceptie en een deel transpiratie. Om een vergelijking mogelijk te maken tussen de verschillende locaties is een continue reeks gecreëerd, waarbij eerst directe metingen zijn gebruikt, daarna aangevuld met schattingen uit de energiebalans. Hierbij is een voortschrijdend gemiddelde van vijf dagen gebruikt om een wat rustiger beeld te creëren. Deze waarden hebben dus vooral relevantie voor een kwalitatieve vergelijking tussen opstanden. Precieze waterbalansen kunnen er niet mee worden bepaald.

In figuur 17 is de dagelijkse verdamping voor het Fleditebos, Loobos en Bankenbos uitgerekend met een vijfdaags voortschrijdend gemiddelde weergegeven. Een aantal dingen valt op. De verdamping van het Fleditebos (655 mm tussen dag 38 en 365) en het Bankenbos (651 mm) is systematisch hoger dan die van het Loobos (539 mm). Deze waarden moeten in dit stadium echter met de nodige voorzichtigheid worden betracht, aangezien de berekeningswijze gebruik maakt van een middelingsprocedure.

Ook is duidelijk te zien dat er in de winterperiode aanzienlijke verdamping kan optreden. Deze kan over de eerste drie maanden van het jaar tot zo'n 100 mm oplopen. Aan het eind van het jaar treedt ook na bladval verdamping op, maar ogenschijnlijk iets minder. Een groot deel van deze verdamping zal interceptieverdamping zijn, maar ook kan verdamping van de bodem en strooisellaag een rol spelen. Vergelijking met figuur 9 suggereert dat zo'n 50% van de winterverdamping uit interceptieverlies bestaat.

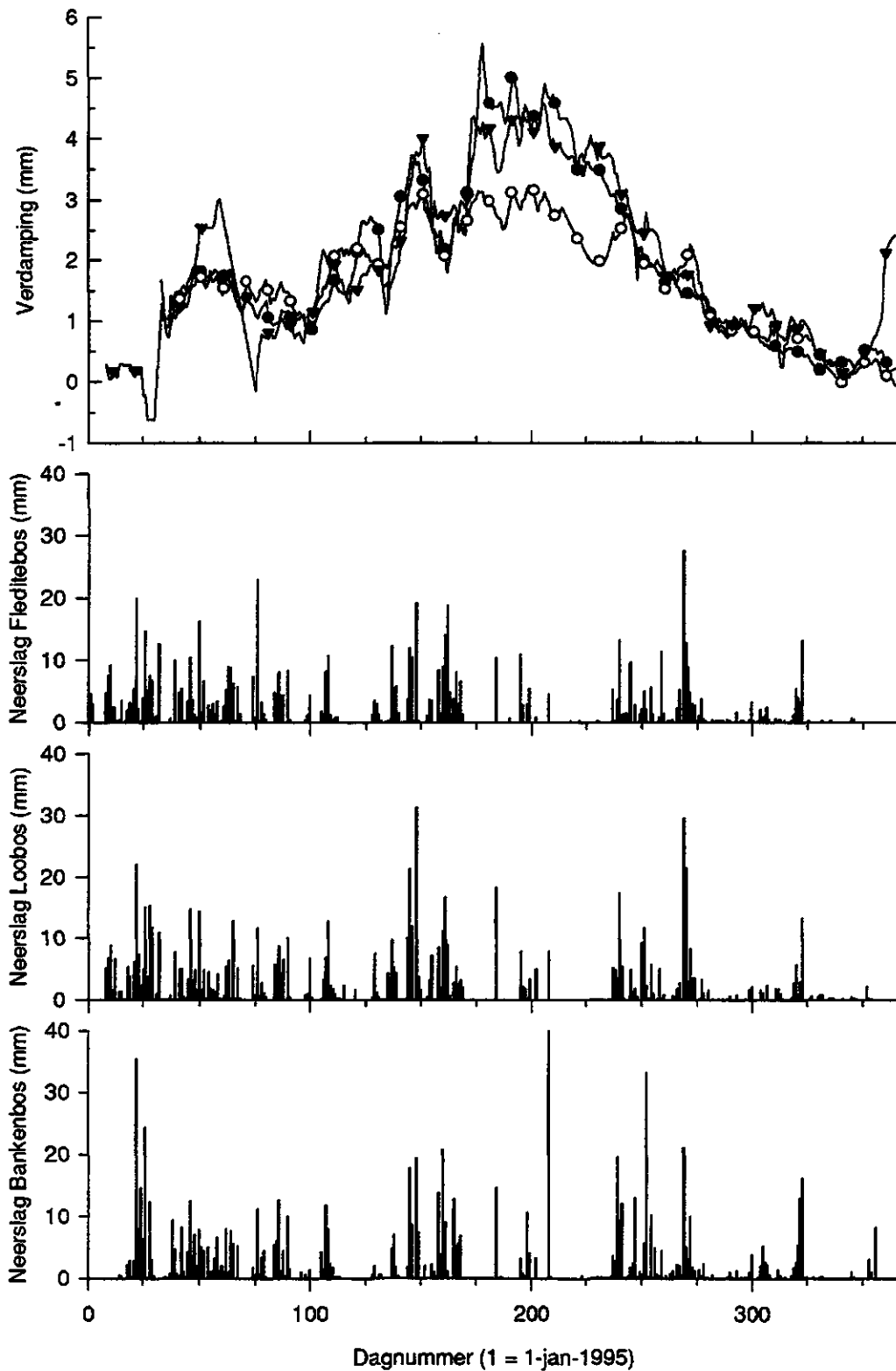


Fig. 17 Dagelijkse verdamping voor het Fleditebos, Loobos en Bankenbos uiterekend met een 5-daags voortschrijdend gemiddelde en de bruto-neerslag voor de drie locaties

5.4.2 Bodemvocht

Het bodemvochtgehalte is bepaald met behulp van FD-sensoren op alle locaties. Echter, de vereiste kalibratiecurves zijn nog niet voor alle locaties beschikbaar. Om toch een indruk van het verloop van het bodemvochtgehalte te krijgen is voor de locaties Loobos en Bankenbos het vochtgehalte berekend volgens Topp et al. (1980). Hierbij moet er rekening mee gehouden worden dat de curve van Topp niet geschikt is voor humus en/of kleihoudende gronden. Voor het Fleditebos is de Topp-curve niet gebruikt (kleigrond) en is i.p.v. het vochtgehalte de diëlektrische constante weergegeven. Relatieve verschillen in amplitude in diëlektrische constanten laten zich niet lineair vertalen in verschillen in bodemvocht, dus enige voorzichtigheid bij de interpretatie is geboden. Een waarde van 80 komt overeen met 100% water, de diëlektrische constante van lucht is 0 (figuur 18a-c).

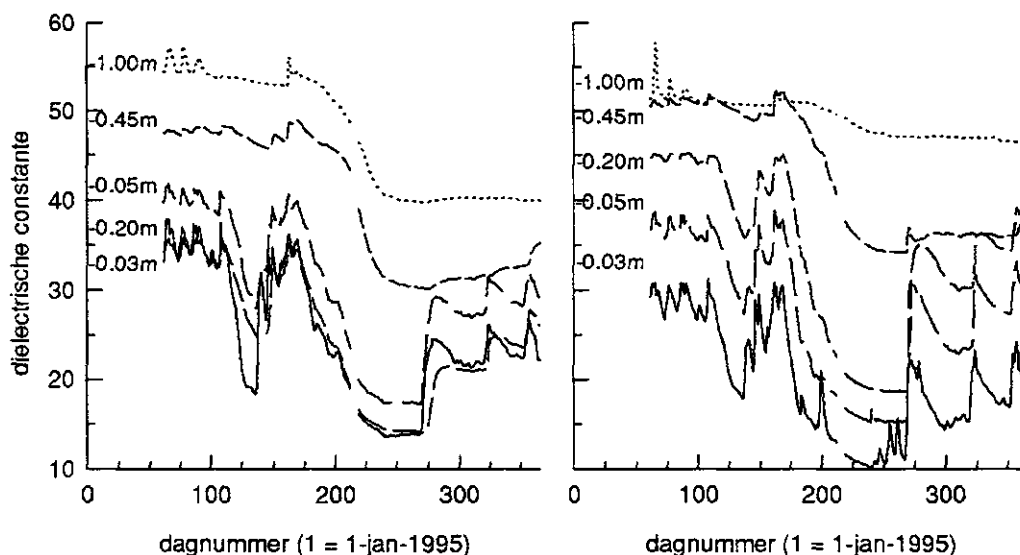


Fig. 18a Verloop in diëlektrische constante voor vijf sensoren in twee profielen voor het Fleditebos

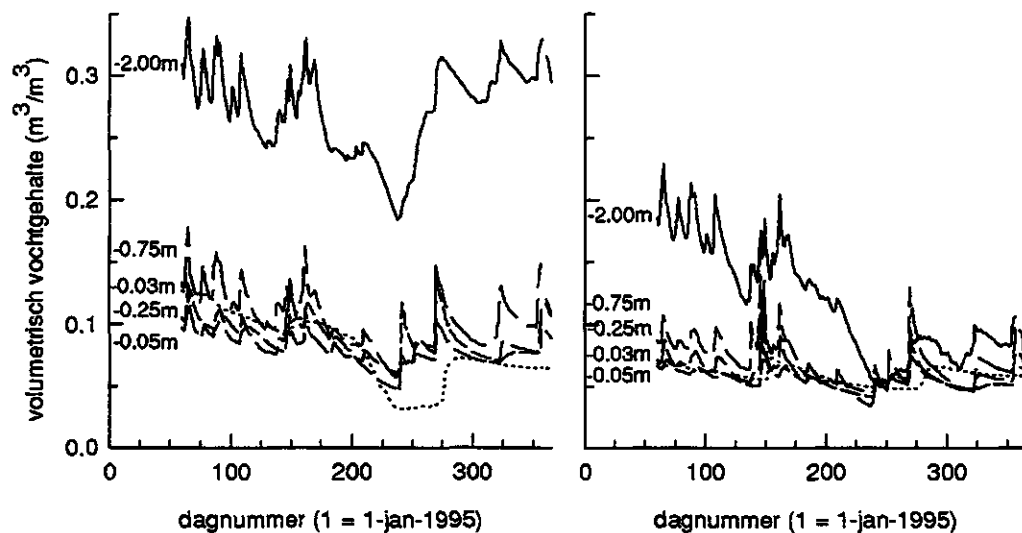


Fig. 18b Verloop in volumetrisch vochtgehalte voor vijf sensoren in twee profielen voor het Loobos

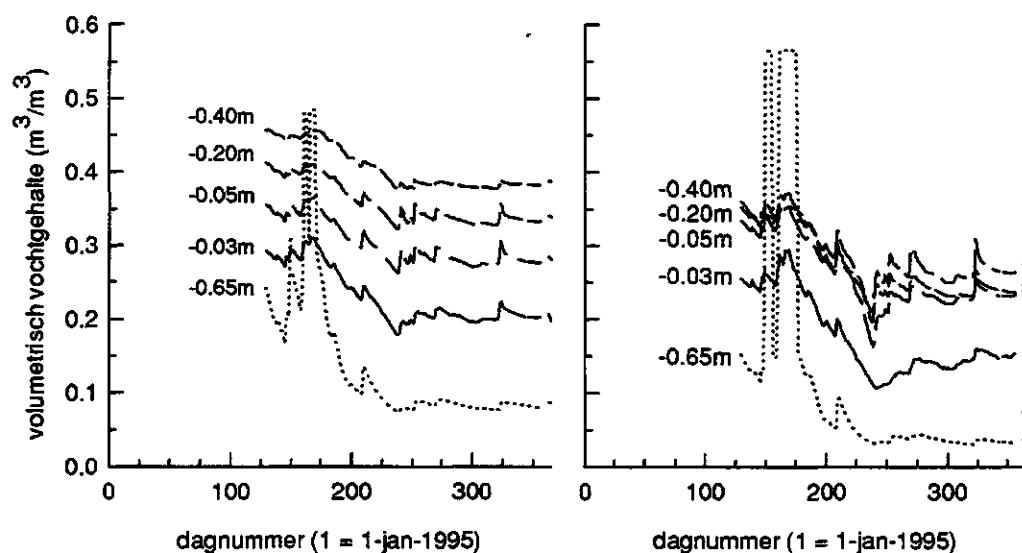


Fig. 18c Verloop in volumetrisch vochtgehalte voor vijf sensoren in twee profielen voor het Bankenbos

Duidelijk is te zien dat er in de loop van de zomer een daling van het bodemvochtgehalte op alle drie locaties optrad in de bovenste laag. Ook is te zien dat het vochtgehalte in het Bankenbos later terugvalt in respons op de neerslag rond dag 207, overeenkomstig de verdampingsmetingen. Het vochtgehalte dieper in het profiel is hoger. Hier stabiliseert het vochtgehalte zich in de herfst en winter, na een teruggang in de zomer. Van vochtaanvulling in de winter is nog geen sprake. In de bovenste laag is wel enige vochtaanvulling te zien na dag 270, maar deze vindt alleen in het Fleditebos plaats.

5.4.3 Grondwaterstand

In figuur 19 is het verloop van de gemeten grondwaterstand weergegeven voor de drie locaties. Opgemerkt moet worden dat de meting in het Loobos betrekking heeft op de buis in het lage deel (dal) van het bos; de mast staat zo'n 4 m hoger. Onderzoek met de Georadar heeft aannemelijk gemaakt dat de grondwaterspiegel niet het microreliëf volgt in het Loobos. Dit moet echter nog nader worden uitgewerkt.

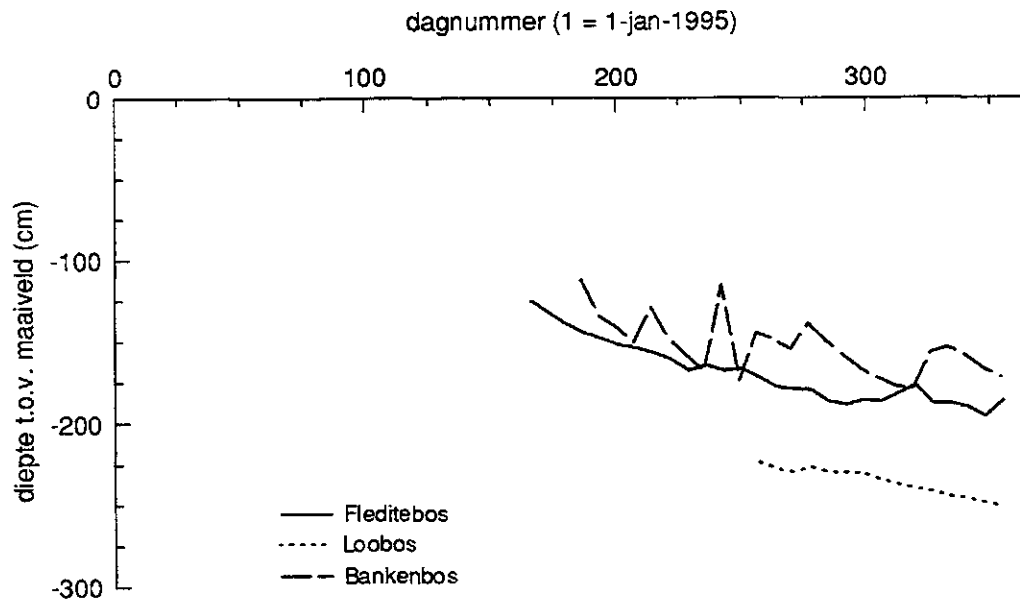


Fig. 19 Verloop in grondwaterstandsdiepte voor het Fleditebos, Loobos en Bankenbos

In alle drie locaties daalt het grondwater in de loop van de zomer en herfst, en blijft zelfs nog geruime tijd dalen in de winter. Een daling van 50 cm betekent ruwweg dat er ongeveer 200 mm vocht uit de zone van daling genomen is. Aangezien er geen drukmetingen zijn, is het moeilijk onderscheid te maken in wegzijging en onttrekking door transpiratie. Opvallend is verder de grote variatie in het Bankenbos, waarschijnlijk veroorzaakt door de onderliggende keileemlaag.

6 Conclusies

6.1 Analyse meetresultaten 1995

In 1995 is de waterbalans op drie locaties bepaald. Dit is gebeurd op alle locaties met hetzelfde meetsysteem dat nu operationeel is. Het meetsysteem is gericht op langdurige metingen en heeft in het eerste jaar van dit project bewezen robuust te zijn. De gebruikte procedures zijn betrouwbaar en in de praktijk goed hanteerbaar. Het doen van langdurige metingen is echter iets anders dan het doen van continue metingen. In het geval dat door instrumentele problemen essentiële onderdelen van het meetsysteem uitvallen moet een acceptabele methode worden gebruikt om de ontstane gaten in de meetreeks op te vullen. Dit is een punt van verdere aandacht. Mogelijkheden dienen te worden onderzocht om de gaten met behulp van statistische analyse op te vullen, of met behulp van fysische modellen.

De hydrologisch relevante conclusies van het onderzoek kunnen als volgt worden weergegeven.

- 1) Het totale waterverbruik van populier en lariks is vrijwel gelijk (655 en 651 mm) en hoger dan dat van grove den (539 mm). De populieren hebben een hogere transpiratie dan lariks; bij interceptie geldt het omgekeerde waardoor het totale waterverbruik gelijk is. Grove dennen hebben zowel het laagste transpiratie- als interceptieverlies.
- 2) Tijdens de zomer van 1995 heeft bodemvocht waarschijnlijk de transpiratie in het Fleditebos en Loobos geremd. Dit ondanks het feit dat de bomen in het Fleditebos en Bankenbos waarschijnlijk het grondwater als extra bron voor vochtvoorziening kunnen gebruiken.
- 3) Tijdens de winter treedt er op alle locaties een substantiële verdamping op. In de eerste drie maanden van 1995 loopt dit op tot zo'n 100 mm. Vijftig procent hiervan is vermoedelijk interceptieverdamping; de rest is waarschijnlijk afkomstig uit bodem en strooisel.
- 4) Het interceptieverlies neemt af in de volgorde Bankenbos, Fleditebos, Loobos. In de winter heeft de populierenopstand de geringste interceptieverdamping, echter altijd nog zo'n 17% van de bruto-neerslag. Dit verloop is consistent met de bepaling van de verzadigingswaarde en ruwheid.
- 5) De transpiratie neemt af in de volgorde Fleditebos, Bankenbos, Loobos. Een eerste schatting voor het groeiseizoen (dag 120 t/m 275), verkregen uit de metingen van totale verdamping en interceptie, is 422, 375 en 283 mm.
- 6) Het verloop in verdamping is consistent met metingen van bodemvocht (diëlektrische constante) en grondwaterstandsdiepte.

6.2 Perspectief en verder onderzoek

De in dit rapport gepresenteerde resultaten zijn een eerste schatting van een aantal parameters en van de grootteorde van een aantal termen in de waterbalans van de drie in 1995 onderzochte locaties. De resultaten zijn voorlopig, en geven niet meer dan een kwalitatief beeld van de verschillen in hydrologisch gedrag tussen de drie locaties. Niettemin is het belangrijk te onderzoeken in hoeverre deze resultaten i) in het bestaande beeld van boshydrologisch onderzoek passen, en ii) in welke mate het vervolgonderzoek aangepast moet worden vanwege deze resultaten.

De gevonden waarden voor de grootte van aërodynamische en verzadigingsconstanten suggereren dat een groot deel van het interceptieverlies verklaard kan worden uit de grootte van deze parameters: de bosopstanden met de hoogste verzadigingsconstante en ruwheid hebben ook het grootste interceptieverlies. In het algemeen lijken de waarden voor de verzadigingsconstante aan de lage kant. Echter, de waarden zijn op twee manieren berekend en in ieder geval bevestigt de tweede berekening kwalitatief de eerste. Het lijkt de moeite waard te proberen deze berekeningen opnieuw uit te voeren met meer metingen, zodat wellicht een kwantitatief iets betrouwbaarder beeld kan worden gegeven. Als er verschillen optreden in bladgroei tussen de jaren kan dit echter problematisch worden. Ook lijkt het aanbevelenswaardig de hier gevonden waarden te gebruiken om licht te werpen op mogelijke onvolkomenheden in de parameterisatie van interceptie (Klaassen et al., 1996).

De waarden voor de ruwheidslengte lijken in overeenstemming met eerder gepubliceerde waarden (Jarvis, 1976 en Wieringa, 1993). Net als bij de waarden voor verzadigingsconstanten zal ook hier in de komende jaren moeten blijken hoe de aërodynamische eigenschappen van de onderzochte bossen afhangen van hoogte, bladdichtheid, windrichting en groei.

Voor het adequaat vaststellen van de complete waterbalans is een ononderbroken meetreeks van de termen van de balans een eerste vereiste. In dit verslag is een eersteorde-opvulprocedure gekozen om gaten in de verdampingsreeks te vullen. Dit verhoogt de onzekerheid die aan deze meetreeks moet worden toegekend. In het verdere onderzoek zal dit een belangrijk aandachtspunt moeten vormen. Mogelijkheden om gaten op te vullen zijn onder te verdelen in statistische en op fysische processen gebaseerde technieken. Uiteindelijk zal de laatste categorie moeten worden toegepast, maar om snel inzicht te krijgen in de aard van de resultaten lijkt de eerste het meest geschikt.

In beide gevallen zal een grondige foutenanalyse de basis moeten vormen van verdere analyse. Hoewel in dit rapport de eddycorrelatiemetingen gecorrigeerd zijn voor frequentieverlies en coördinaatrotatie (zie verder hoofdstuk 3) blijft er aan de metingen een onzekerheid verbonden die gekwantificeerd moet worden. Slechts indien instrumentele fouten van locatiegebonden processen kunnen worden gescheiden, kan met enige zekerheid de fout in de waarnemingen bepaald worden.

Dit dient zo spoedig mogelijk te gebeuren. Ook zullen 'standaard' technieken om de kwaliteit van turbulentie metingen te toetsen uitgevoerd moeten worden (Panosfky en Dutton, 1984).

Ondanks bovengenoemde gebreken is het mogelijk gebleken een eersteorde-schatting te geven van de transpiratie van de drie bossen. Opvallend, maar niet geheel onverwacht, is het grote verschil in transpiratie: variërend van 422 tot 283 mm per jaar. Transpiratie is gekoppeld aan de snelheid van fotosynthese, en dus aan de groeisnelheid van bomen. Populieren groeien harder dan bijvoorbeeld grove dennen, en het lijkt erop dat dit verschil ook in de jaartotalen voor transpiratie terug te vinden is. In dit verband loont het de moeite om te pogen deze hypothese met behulp van metingen van de koolstof flux verder uit te bouwen. Dit opent dan ook de weg naar een andere parameterisatie van de oppervlakteweerstand die wellicht minder locatieafhankelijk is en meer gestoeld op plantenfysiologische processen (e.g. Leuning, 1995) en de beschikbaarheid van nutriënten.

In dit verband is het goed er op te wijzen dat op de locatie Loobos in de zomer van 1996 gezamenlijke metingen met IBN-DLO zullen worden uitgevoerd aan de waterbalans van individuele bomen met behulp van sapstroommetingen. Deze metingen maken het mogelijk onderscheid te maken tussen transpiratie van bomen en verdamping/transpiratie van de ondergroei en bodem op deze locatie. De metingen zullen worden aangevuld met continue metingen van de koolstof flux met behulp van eddycorrelatietechnieken.

Wegens de droogte in het najaar van 1995 zijn er wel metingen van oppervlakkige afvoer uitgevoerd, maar werkelijke afvoer is helaas niet opgetreden. In december was de hoeveelheid bodemvocht ook nog niet geheel aangevuld. Dit biedt gunstige perspectieven voor (modelmatig) onderzoek naar droogtelimitatie van transpiratie, maar het is voor een compleet inzicht in de grootte van de afvoertermen van de waterbalans van bossen te wensen dat er in de komende twee jaar een zeer nat jaar optreedt. De nieuwe locatie in Kampina is overigens ook ingericht met de nadruk op dergelijke metingen.

In het Loobos zijn eind 1995 metingen uitgevoerd met een geologische radar GeoRadar (van Overmeeren et al., 1995). De eerste resultaten waren dermate positief dat in 1996 nog drie keer wordt gemeten. De metingen geven een beeld van de ruimtelijke spreiding van bodemvocht op de locatie.

Een van de hoofddoelstellingen van het project is het ontwikkelen van een modelinstrumentarium. Een complex model is inmiddels beschikbaar, maar niet zonder meer bruikbaar voor toepassingen op andere dan de vier in dit project bemeeten locaties. Versimpeling van dit model is dan ook gewenst. In het verdere verloop van het project zal hier dan ook de nodige aandacht naar uit moeten gaan. Parallel aan deze modelontwikkeling zullen methoden moeten worden ontwikkeld die het mogelijk maken goede schattingen te leveren van parameterwaarden in zowel simpele als meer complexe modellen.

Naast dit onderzoek gericht op een betere modellering van (pseudo)eendimensionale boshydrologische processen is het van belang een start te maken met de regionalisering van deze kennis. Remote sensing-opnamen zullen worden gebruikt om de regionale representativiteit van de metingen nader te bepalen. In een later stadium zal er een techniek moeten worden ontwikkeld om deze ruimtelijke informatie ook in de tijd te kunnen extrapoleren.

Literatuur

Ashby, M., E.J. Moors, M.J. Ogink-Hendriks, A.J. Dolman & P. Kabat, 1996. *SWAPS version 1.0 technical reference manual*. Staring Centrum, Wageningen (in press).

Bouten, W., 1992. Monitoring and modelling forest hydrological processes in support of acidification research. University of Amsterdam. Ph.D thesis.

Dolman, A.J. & E.J. Moors, 1994. Hydrologie en waterhuishouding van bosgebieden in Nederland, Fase 1: Toetsing instrumentarium. Wageningen, Staring Centrum, Rapport 333.

Dolman, A.J., 1986. Estimates of roughness length and zero plane displacement for a foliated and non-foliated oak canopy. *Agric. For. Meteorol.* 36: 241-248

Dyer, A. J., 1974. A review of flux profile relationships. *Boundary-layer Meteorol.*, 7: 363-372.

Gash, J.H.C., 1986. A note on estimating the effect of a limited fetch on micrometeorological evaporation measurements. *Boundary-layer Meteorol.* 35: 409-414.

Gehrels, J.C., 1995. Niet-stationaire grondwatermodellering van de Veluwe; een studie naar de invloed van grondwaterwinning, inpoldering en verloofing op de grondwaterstand sinds 1951. Vrije Universiteit, Amsterdam. 81 p., 91 fig.

Hendriks, M.J., P. Kabat, F. Homma & J. Postma, 1990. Onderzoek naar de verdamping van een loofbos: meetresultaten en enkele modelberekeningen. Staring Centrum, Wageningen, Rapport 90.

Jackson, I.J., 1975. Relationships between rainfall parameters and interception by tropical forest. *J. Hydrol.* 24: 215-238.

Jarvis, P. G., 1976. The interpretation of variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philosophical Transactions of the Royal Society London. Series B.*, 273: 593-610

Klaassen, W., F. Bosveld & E. de Water, 1996. On water storage and evaporation as constituents of rainfall interception. BAHC issue *J. Hydrol.* (in press).

KNMI, 1996. Maandoverzicht van het weer in Nederland, 1995. MOW bulletin 92, 1-12.

KNMI, 1995. Maandoverzicht neerslag en verdamping in Nederland, 1995. MONV bulletin 64, 1-12.

Leuning, R., 1995. A critical appraisal of a combined stomatal photosynthesis model for C₃ plants. *Plant, Cell and Environment* 18: 339-355.

Leuning, R. & J.B. Moncrieff, 1990. Eddy covariance CO₂ flux measurements using open- and closed path CO₂ analysers: corrections for analyser water vapour sensitivity and damping of fluctuations in air sampling tubes. *Boundary-Layer Meteorol.* 57: 311-322.

Leyton, L., E.R.C. Reynolds, F.B. Thompson, 1967. Rainfall interception in forest and moorland. In: W.E. Sopper and H.W. Lull (ed.). International symposium on forest hydrology. Oxford, Pergamon Press. pp. 163-178.

Lloyd, C.R., J.H.C. Gash, W.J. Shuttleworth & F.A. de O. Marques, 1988. The measurements and modelling of rainfall interception by Amazonian rainforest. *Agric. For. Meteorol.* 43: 277-294.

Lloyd, C.R. & F.A. de O. Marques, 1988. Spatial variability of throughfall and stemflow measurements in amazonian rainforest. *Agric. For. Meteorol.* 42: 63-73.

Lloyd, C.R., 1995. The effect of heterogeneous terrain on micrometeorological flux measurements: a case study from Hapex-Sahel. *Agric. For. Meteorol.* 73: 209-216.

Lloyd, C.R., J.H.C. Gash et. al. 1988. The measurements and modelling of rainfall interception by Amazonian rainforest. *Agric. For. Meteorol.* 42: 277-294.

McMillen, R.T., 1988. An eddy correlation technique with extended applicability to non-simple terrain. *Boundary-Layer Meteorol.* 43: 231-245.

Monteith, J.L. & M.H. Unsworth, 1990. Principles of environmental physics. Second edition. London: Arnold.

Moore, C. J., 1986. Frequency response corrections for eddy correlation systems. *Boundary-Layer Meteorol.* 37: 17-35.

Overmeeren, R.A. van, E.J. Moors, A.J. Dolman & J. Stolte, 1995. Georadaronderzoek naar de ruimtelijke variatie in bodemvocht in het Loobosch nabij Kootwijk. Concept interim verslag. Stichting OODAM.

Panofsky, H. A. & J.A. Dutton, 1984. Atmospheric turbulence. New York: Wiley.

Paulson, C.A., 1970. The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. *J. Appl. Meteorol.* 9: 857-861.

Schmid, H. P., 1994. Source areas for scalars and scalar fluxes. *Boundary-Layer Meteorol.* 67: 293-318.

Schuepp, P.H., M.Y. Leclerc, J.I. Macpherson & R.L. Desjardins, 1990. Footprint prediction of scalar fluxes from analytical solutions of the diffusion equation. *Boundary-Layer Meteorol.* 50: 355-373.

Slager, H., 1991. De waterhuishouding van de bossen in Zuidelijk Flevoland 1980-1989. Rijkswaterstaat Directie Flevoland. Flevobericht 327.

Thom, A.S., 1975. Momentum, mass and heat exchange of plant communities. In: J.L. Monteith (ed.). *Vegetation and the atmosphere*. London, Academic Press. Vol I: 57-109.

Tillman, J.E., 1972. The indirect determination of stability, heat and momentum fluxes in the atmospheric boundary layer from simple scalar variables during dry unstable conditions. *J. Appl. Meteor.* 11: 783-792.

Topp, G.C., J.C. Davis & A.P. Annan, 1980. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.* 3: 574-582.

Webb, E.K., G.I. Pearman, & R. Leuning, 1980. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 106: 85-100.

Wieringa, J., 1993. Representative roughness parameters for homogeneous terrain. *Boundary-Layer Meteorol.* 63: 323-363.