stowa

GEMETEN ACTUELE VERDAMPING VOOR TWAALF LOCATIES IN NEDERLAND

RAPPORT 2010 36

stowa

GEMETEN ACTUELE VERDAMPING VOOR TWAALF LOCATIES IN NEDERLAND

STOWA 2010 36

ISBN 978.90.5773.489.2

Publicaties van de STOWA kunt u bestellen op www.stowa.nl

stowa@stowa.nl www.stowa.nl
TEL 033 460 32 00 FAX 033 460 32 01
Stationsplein 89 3818 LE Amersfoort
POSTBUS 2180 3800 CD AMERSFOORT

COLOFON

Amersfoort, 2010

UITGAVE STOWA, Amersfoort

AUTEURS J.A. Elbers (Alterra)
E.J. Moors (Alterra)
C.M.J. Jacobs (Alterra)

BEGELEIDINGSGROEP
G. van den Eertwegh (Waterschap Rivierenland)
H. van Hardeveld (Hoogheemraadschap van Delfland)
J. Heijkers (Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden)
H. Niewold (Waterschap Rivierenland)
M. Talsma (STOWA)

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau

STOWA rapportnummer 2010-36
ISBN 978.90.5773.489.2

TEN GELEIDE

Verdampingsgegevens worden in het regionaal waterbeheer veel gebruikt in modelstudies en bij het opstellen van waterbalansen. Daarbij wordt veelal uitgegaan van een referentie gewasverdamping en wordt de actuele verdamping ingeschat op basis van het gewas en de vochttoestand van de bodem. De fouten die hiermee gemaakt worden kunnen aanzienlijk zijn en kunnen leiden tot een onnauwkeurige inschatting van droogte- en hoogwaterproblematiek.

Stowa heeft Alterra de opdracht gegeven jaarreeksen van actuele dagelijkse verdamping af te leiden voor twaalf meetlocaties in Nederland. Daarbij is gebruik gemaakt van bestaande (micro)meteorologische meetgegevens. De meetgegevens zijn gecontroleerd op kwaliteit en continuïteit en ontbrekende dagtotalen zijn aangevuld met door een Artificieel Neuraal Netwerk gesimuleerde gegevens. De onzekerheid in de jaartotalen van de bepaalde actuele verdamping ligt tussen de 10 en 15%.

De gecreëerde reeksen kunnen worden gebruikt om de berekening van actuele verdamping in modellen of waterbalansen te toetsen. Waar geen reeksen beschikbaar zijn, kunnen deze worden afgeleid in combinatie met satellietwaarnemingen en modellering in ruimte en tijd.

Wij hopen dat dit onderzoek leidt tot een betere inschatting van de actuele verdamping in het regionaal waterbeheer.

Utrecht, november 2010

De directeur van de STOWA
Ir. J.M.J. Leenen

SAMENVATTING

In opdracht van STOWA zijn jaarreeksen van dagelijkse verdamping gecreëerd voor twaalf meetlocaties in Nederland. Hiervoor is gebruik gemaakt van bestaande (micro)meteorologische meetgegevens. De meetgegevens zijn gecontroleerd op kwaliteit en continuïteit en ontbrekende dagtotalen zijn aangevuld met door een Artificieel Neuraal Netwerk gesimuleerde gegevens. De gecreëerde reeksen van dagelijkse verdamping zijn beschikbaar via STOWA.

De onzekerheid in de jaartotalen van actuele verdamping ligt bij de hier gebruikte methode tussen de 10 en 15%. De verschillen in de jaartotalen van actuele verdamping zijn aanzienlijk. Een goede bepaling van de actuele verdamping in zowel ruimte als tijd is dus belangrijk. Overal meten is te arbeidsintensief maar deze metingen kunnen wel gebruikt worden, in combinatie met satellietwaarnemingen en modellering, voor het opschalen van actuele verdamping in ruimte en tijd.

DE STOWA IN HET KORT

De Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer, kortweg STOWA, is het onderzoeksplatform van Nederlandse waterbeheerders. Deelnemers zijn alle beheerders van grondwater en oppervlaktewater in landelijk en stedelijk gebied, beheerders van installaties voor de zuivering van huishoudelijk afvalwater en beheerders van waterkeringen. Dat zijn alle waterschappen, hoogheemraadschappen en zuiveringsschappen en de provincies.

De waterbeheerders gebruiken de STOWA voor het realiseren van toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk juridisch en sociaal-wetenschappelijk onderzoek dat voor hen van gemeenschappelijk belang is. Onderzoeksprogramma's komen tot stand op basis van inventarisaties van de behoefte bij de deelnemers. Onderzoekssuggesties van derden, zoals kennisinstituten en adviesbureaus, zijn van harte welkom. Deze suggesties toetst de STOWA aan de behoeften van de deelnemers.

De STOWA verricht zelf geen onderzoek, maar laat dit uitvoeren door gespecialiseerde instanties. De onderzoeken worden begeleid door begeleidingscommissies. Deze zijn samengesteld uit medewerkers van de deelnemers, zonodig aangevuld met andere deskundigen.

Het geld voor onderzoek, ontwikkeling, informatie en diensten brengen de deelnemers samen bijeen. Momenteel bedraagt het jaarlijkse budget zo'n 6,5 miljoen euro.

U kunt de STOWA bereiken op telefoonnummer: 033 - 460 32 00.
Ons adres luidt: STOWA, Postbus 2180, 3800 CD Amersfoort.
Email: stowa@stowa.nl.

Website: www.stowa.nl

GEMETEN ACTUELE VERDAMPING VOOR TWAALF LOCATIES IN NEDERLAND

INHOUD

		TEN GELEIDE	
		SAMENVATTING	
		STOWA IN HET KORT	
1		DOELSTELLING	1
2		MEETLOCATIES	2
3		METINGEN	4
	3.1	Meetapparatuur	4
	3.2	Meetgegevens	4
4		METHODE VOOR HET BEPALEN VAN DE GEMIDDELDE DAGELIJKSE VERDAMPING	6
5		RESULTATEN	10
	5.1	Verdampingsreeksen	10
	5.2	Mogelijke toepassingen	11
		5.2.1 Vergelijking met de Makkink-verdamping	11
		5.2.2 Neerslagoverschot voor bos, gewassen en gras	12
		5.2.3 Dagelijks verloop actuele verdamping	14
6		CONCLUSIES	15
		LITERATUUR	16
		BIJLAGEN	
	1	COÖRDINATEN VAN DE TWAALF MEETLOCATIES	17
	2	RESIDUALS VAN HET ARTIFICIEEL NEURAAL NETWERK (ANN)	18
	3	DATABASE MET DE DAGELIJKSE VERDAMPING VOOR DE TWAALF LOCATIES	19

1

DOELSTELLING

In de definitiestudie 'Verbetering bepaling actuele verdamping voor het strategisch waterbeheer' vastgelegd in STOWA rapport 11 (Droogers, 2009) wordt een aantal aanbevelingen gedaan voor de korte en lange termijn om de bepaling van de actuele verdamping ten behoeve van het regionale waterbeheer te verbeteren. Eén van deze aanbevelingen is **bestaande actuele verdampingsmetingen te ontsluiten**.

Uit de inventarisatie is gebleken dat er veel metingen zijn uitgevoerd, maar dat slechts een klein gedeelte van deze metingen ook echt ontsloten zijn en direct in een database zijn opgenomen behorende bij dit rapport. Een gedeelte van deze metingen zou echter wel opgenomen kunnen worden, maar vereisen een nadere kwaliteitscontrole inclusief het opvullen van ontbrekende dagen. Het is dan ook aan te bevelen om deze metingen op te schonen en te ontsluiten voor verder gebruik.

Naar aanleiding hiervan heeft STOWA Alterra gevraagd een aantal jaarreeksen van metingen van actuele verdamping beschikbaar te maken in de vorm van opgeschoonde en opgevulde dagsommen. Deze dagsommen zijn opgenomen in een database die via het internet beschikbaar wordt gesteld.
Onder actuele verdamping, ook wel evapotranspiratie genoemd, wordt de totale verdamping verstaan, bestaande uit transpiratie, verdamping van eventuele ondergroei, bodemverdamping en interceptieverdamping.

In dit rapport wordt informatie gegeven over de gekozen meetlocaties, wordt kort beschreven welke metingen beschikbaar zijn en hoe deze meetreeksen opgevuld zijn.

2

MEETLOCATIES

De metingen zijn gedaan op meetlocaties waar in het verleden, of nog steeds, onderzoek wordt gedaan naar, onder andere, de verdamping en de koolstofbalans. Een overzicht van de meetlocaties is gegeven in tabel 1 en figuur 1. Bankenbos, Fleditebos en Kampina zijn gedurende enkele jaren bemeten in het kader van het project Boshydrologie. Haastrecht is gedurende een jaar bemeten in het kader van het Chiotto-project. De meetlocaties Langerak, Molenweg, Dijkgraaf, Lutjewad, Oostwaard en Vredepeel zijn alle ongeveer gedurende een jaar bemeten in het kader van het Bsik-ME1 project. Het Loobos is een meetlocatie waar vanaf eind 1994 wordt gemeten in het kader van verschillende projecten. Cabauw is een meetlocatie van het KNMI. Voor de meetlocaties waarvan meerdere meetjaren beschikbaar zijn is een periode gekozen met de grootste dekking van de meetgegevens in de tijd.

TABEL 1 OVERZICHT VAN DE MEETLOCATIES, LOCATIEKARAKTERISTIEKEN EN DE GEBRUIKTE MEETPERIODE

Locatienaam	Vegetatie	Bodemtype	Gebruikte periode
Bankenbos	Lariks	Zand met keileem	1/1/1996-31/12/1996
Fleditebos	Populier	Klei	1/1/1996-31/12/1996
Kampina	Gemengd bos	Zand	1/1/1996-31/12/1996
Cabauw	Gras	Liedeerdgrond	1/1/2006-31/12/2006
Haastrecht	Gras	Liedeerdgrond	26/5/2003-26/5/2004
Langerak	Maïs	Liedeerdgrond	2/4/2005-2/4/2006
Molenweg	Aardappelen	Poldervaaggrond	25/5/2005-25/5/2006
Dijkgraaf	Maïs	Beekeerdgrond	14/5/2007-14/5/2008
Lutjewad	Wintertarwe	Poldervaaggrond	10/5/2006-10/5/2007
Oostwaard	Wilg	Klei	14/3/2008-14/3/2009
Vredepeel	Bieten	Veldpodzolgrond	24/3/2006-24/3/2007
Loobos	Grove den	Duinvaaggrond	1/1/2006-31/12/2006

FIGUUR 1 **GEOGRAFISCH OVERZICHT VAN DE MEETLOCATIES (BRON: GOOGLE EARTH). DE METINGEN OP DE RODE LOCATIES ZIJN INMIDDELS GESTOPT, OP DE GROENE LOCATIES WORDT NOG DOORGEMETEN**

3

METINGEN

3.1 MEETAPPARATUUR

Op alle meetlocaties zijn de metingen van latente warmte stroom (λE) en voelbare warmte stroom (H) verkregen met een micrometeorologische meettechniek genaamd 'eddy-correlatie'. Met deze techniek kan rechtstreeks het turbulente transport van gassen (incl. waterdamp), warmte en momentum in de onderste laag van de atmosfeer worden gemeten.

Het hart van dit systeem is een Gill R3-50 3-D ultrasone anemometer gecombineerd met een Li-cor LI-7500 open pad infrarood gas analysator. De ultrasone anemometer meet de drie vectoren van de windsnelheden en de geluidssnelheid met een frequentie van 10 Hz. Uit de geluidssnelheid kan de zogenoemde virtuele luchttemperatuur berekend worden. De gas analysator meet, ook op 10 Hz, de concentratie van CO_2 en H_2O in de lucht.

De instrumenten, randapparatuur en opslagmedia waren gemonteerd op een pneumatisch uitschuifbare mast. De hoogte van de mast kon aangepast worden aan de hoogte van de vegetatie (figuur 2).

De meteorologische gegevens zijn per half uur gemeten met een Automatisch Weer Station (AWS). De belangrijkste grootheden voor deze studie zijn luchttemperatuur, relatieve luchtvochtigheid, netto straling en neerslag. Alle instrumenten, behalve de neerslagmeter, en de bijbehorende datalogger waren ook gemonteerd op een uitschuifbare mast. De neerslag werd gemeten met een neerslagmeter op 40 cm hoogte. De meetgegevens werden dagelijks via een mobiele telefoonverbinding opgehaald.

3.2 MEETGEGEVENS

Met speciaal hiervoor ontwikkelde software (zie www.climatexchange.nl/projects/alteddy/index.htm) werden per half uur de variaties in de verticale windsnelheid gecorreleerd met de variaties in de H_2O-concentratie en met de variatie in temperatuur. Hieruit volgt uiteindelijk het netto verticale transport van waterdamp (verdamping) en warmte (voelbare warmte flux). Voor een volledige beschrijving van de methodologie zie Aubinet et al. (2000).

De methode voor het bepalen van het netto verticale transport van waterdamp (of andere gassen) verandert door voortschrijdend inzicht. De resultaten van deze studie zijn dan ook niet statisch maar vertegenwoordigen de huidige stand van zaken.

FIGUUR 2 **FOTO VAN EEN AUTOMATISCH WEERSTATION (LINKS) EN EEN EDDY-CORRELATIE STATION OP MEETLOCATIE VREDEPEEL**

4

METHODE VOOR HET BEPALEN VAN DE GEMIDDELDE DAGELIJKSE VERDAMPING

De gemiddelde dagelijkse latente warmtestroom (λE) is bepaald volgens drie methodes:

1 uit de middeling van de op halfuur-basis gemeten λE:
2 uit de daggemiddelde netto straling minus voelbare warmte stroom, $R_{net} - H$:
3 uit een schatting met een Artificieel Neuraal Netwerk (ANN).

De uiteindelijke opgevulde verdampingsreeks is in eerste instantie samengesteld met de gegevens uit (1). Ontbrekende daggemiddelden zijn opgevuld met gegevens uit (2), mits deze beschikbaar waren. Bij ontbreken van gegevens uit (2) is gebruik gemaakt van gegevens uit (3).

De meetreeksen van halfuurs meetwaarden van λE en H zijn om verschillende redenen niet compleet. De belangrijkste redenen zijn:

- De meteorologische condities voldoen niet aan de voorwaarden die de eddy-correlatie techniek vereist.
- Door dauw of regendruppels op de lenzen werkt het instrument dat de H_2O concentratie meet niet goed.
- Technische redenen zoals uitval van de energievoorziening.

De uiteindelijke verdampingsreeks met verdamping in mm per dag is berekend uit de opgevulde verdampingsreeks met gemiddelde dagelijkse λE volgens:

$$E = \frac{\lambda E}{\lambda} \bullet t_d \qquad \lambda = 2500300 - (T \bullet 2359)$$

Waarbij

E = verdamping (kg m^{-2} = mm)
λE = latente warmtestroom (W m^{-2})
λ = verdampingswarmte van water (J kg^{-1})
T = luchttemperatuur (°C)
t_d = aantal seconden per dag (86400) (s)

Figuur 3 geeft een stroomschema van de verschillende stappen in de dataverwerking. Hieronder worden de drie methoden in meer detail toegelicht.

1 MIDDELING VAN DE OP HALFUUR-BASIS GEMETEN λE

Voordat daggemiddelden werden berekend zijn eerst de metingen tijdens de nacht en negatieve metingen tijdens de dag in de halfuurs λE op nul gezet. Dit is acceptabel aangezien 's nachts de verdamping in bijna alle gevallen verwaarloosbaar klein is. Ook zijn 's nachts de atmosferische condities voor eddy-correlatie vaak niet optimaal waardoor er onrealistische

uitschieters kunnen voorkomen in de individuele halfuurs warmtestromen. De ontbrekende enkele halfuursmetingen zijn opgevuld via lineaire interpolatie. Bij gaten van meerdere halfuursmetingen achter elkaar is dit niet gedaan.

De daggemiddelden werden alleen berekend als meer dan 80% van de halfuursmetingen overdag beschikbaar was. De 80%-grens is gekozen zodat een voldoende nauwkeurig gemiddelde berekend kan worden zonder al te veel meetdagen geheel af te keuren. Dag/nacht-condities werden bepaald door berekening van de theoretische zonnestraling ter plekke van de meetlocatie (FAO, 1998).

In tabel 2 staat per locatie hoeveel daggemiddelden niet berekend konden worden (zowel λE als H ontbreekt). Wanneer de meetperiode voor een bepaalde locatie korter was dan een jaar ontbreken voor deze dagen uiteraard ook de daggemiddelden.

TABEL 2 AANTAL ONTBREKENDE DAGWAARDEN VAN HET AWS EN FLUXEN EN DICHTSTBIJZIJNDE WEERSTATION

Locatienaam	Ontbrekende dagen AWS-metingen	Ontbrekende dagen fluxmetingen	Dichtstbijzijnde weerstation
Bankenbos	42	79	Loobos
Fleditebos	13	39	Kampina
Kampina	16	27	Fleditebos
Cabauw	0	174	Niet van toepassing
Haastrecht	58	82	De Bilt (KNMI)
Langerak	0	9	Niet van toepassing
Molenweg	65	84	Gilze-Rijen (KNMI)
Dijkgraaf	76	115	Deelen (KNMI)
Lutjewad	0	71	Niet van toepassing
Oostwaard	0	12	Niet van toepassing
Vredepeel	0	23	Niet van toepassing
Loobos	0	5	Niet van toepassing

De onzekerheid van de daggemiddelden van de gemeten verdamping is gesteld op 10% volgens Moncrieff et al. (1996) en Kruijt (2004). Deze onzekerheid komt goed overeen met de onzekerheid die volgt uit de energiebalanssluiting van de boslocaties (5-15%). De belangrijkste bronnen van onzekerheid zijn willekeurige en systematische fouten in de metingen en dataverwerking zoals onzekerheid van de calibratie, non-stationariteit en de toepassing van de assen-rotatie. Ook de grootte en positie van de footprint, het flux-brongebied, van de metingen speelt een rol. Het meetsysteem was zo opgezet dat onder de meeste omstandigheden het flux-brongebied binnen het te bemeten perceel valt maar soms (zeer stabiele atmosfeer) was het flux-brongebied ook groter dan het te bemeten perceel. De grootte van de footprint werd berekend volgens Schuepp (1990).

Om de verschillen in meteorologische condities te minimaliseren is voor het opvullen van de AWS-data van de boslocaties zoveel mogelijk gebruik gemaakt van AWS-data van andere boslocaties. Figuur 3a geeft het stroomschema weer van de dataverwerking van λE en H.

2 DAGGEMIDDELDE NETTO STRALING MINUS VOELBARE WARMTE STROOM

De methode voor de bepaling van de gemiddelde H was identiek aan die voor λE. Daarna zijn daggemiddelden berekend van op de meetlocatie op halfuur-basis gemeten netto straling. Ontbrekende daggemiddelden zijn aangevuld met dagwaarden van het dichtstbijzijnde

meteorologische station. In tabel 2 staat per locatie hoeveel daggemiddelden ontbraken en welk meteorologisch station is gebruikt. Vervolgens is (voor de dagen dat er een gemiddelde voelbare warmtestroom en netto straling berekend is) de gemiddelde λE berekend uit de gemiddelde netto straling minus de gemiddelde voelbare warmteflux:

$$\lambda E = R_{net} - H$$

3 SCHATTING MET EEN ARTIFICIEEL NEURAAL NETWERK (ANN)

Een ANN geeft de beste resultaten bij het schatten van ontbrekende waarden in een meteorologische datareeks, zie Moffat (2007). Een ANN is een empirisch niet-lineair regressiemodel. Het model bestaat uit knooppunten die via wegingsfactoren met elkaar verbonden zijn. Het model wordt getraind met een set van invoergegevens en de hiermee geassocieerde uitvoergegevens. Na training worden de afhankelijkheden van de uitvoergegevens tot de invoergegevens vastgelegd in de wegingsfactoren. Het gebruikte Neurale Netwerk is NNDT (Neural Network Development Tool) versie 1.2, ontwikkeld door Bjorn Saxén, Heat Engineering Laboratory, Abo Akademi University, Finland (1995).

Figuur 3c geeft het stroomschema van de dataverwerking met het ANN. Het ANN is getraind op de relatie tussen de meteorologische data (netto straling, luchttemperatuur, relatieve luchtvochtigheid, windsnelheid en λE berekend volgens methode Makkink (1957)) en de gemeten λE voor de dagen waarvoor deze bekend is. Dit ANN is vervolgens gebruikt om λE voor de ontbrekende dagen te schatten.

Hiervoor zijn daggemiddelden berekend van ter plaatse op halfuur-basis gemeten luchttemperatuur, relatieve luchtvochtigheid en windsnelheid. Ontbrekende daggemiddelden zijn aangevuld met dagwaarden van het dichtstbijzijnde meteorologische station. Voor de boslocaties is gebleken dat vanwege de verschillen tussen akkerbouw- en boslocaties de ontbrekende daggemiddelden beter aangevuld kunnen worden met de data van een andere boslocatie. Wanneer de meetperiode voor een bepaalde locatie korter was dan een jaar ontbreken voor deze dagen uiteraard ook de daggemiddelden. Figuur 3b geeft het stroomschema weer van de dataverwerking van de AWS-data.

De gemiddelde dagelijkse λE volgens Makkink is berekend met:

$$\lambda E = 0.65 \bullet \frac{s}{s+\gamma} \bullet K \qquad \gamma = \frac{C_p \bullet p}{0.622 \bullet \lambda}$$

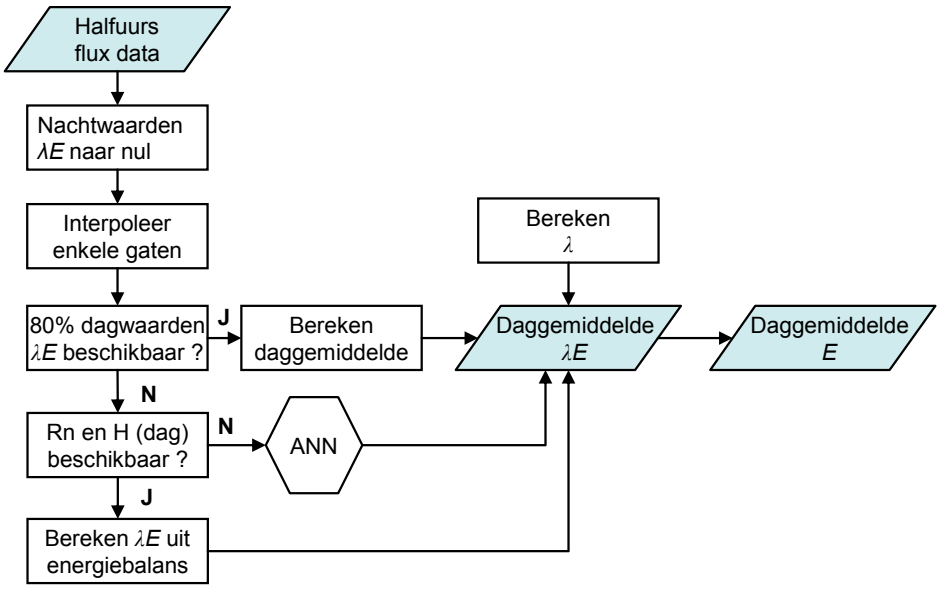
Waarbij

λE = latente warmtestroom (W m^{-2})
s = helling dampspanningscurve (hPa K^{-1})
γ = psychrometer constante (hPa K^{-1})
C_p = warmtecapaciteit droge lucht (J kg^{-1} K^{-1})
p = luchtdruk (hPa)
K = inkomende globale straling (W m^{-2})

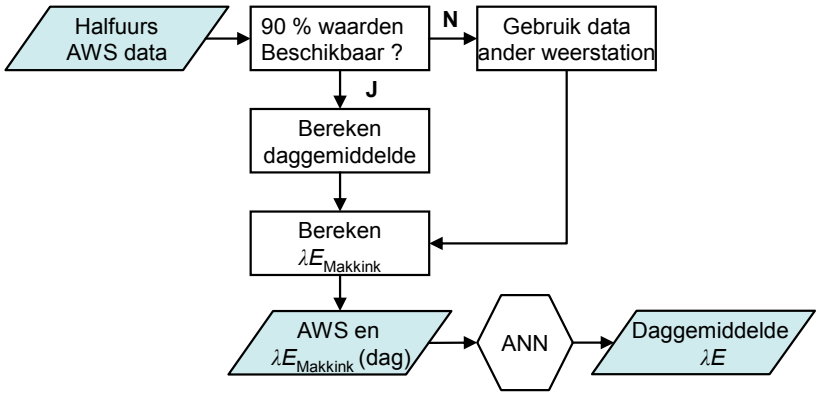
De helling van de dampspanningscurve is berekend voor de gemiddelde dagelijkse temperatuur. De luchtdruk is voor deze berekening gesteld op 1000 hPa.

In figuur 8 in bijlage 2 zijn de residuals per locatie weergegeven van de training van het ANN. Dit zijn, per dag, de verschillen tussen de gemeten en berekende dagverdamping, voor de dagen waarvoor het netwerk getraind is. Ter indicatie; een fout van 30 W m^{-2} in de daggemiddelde λE komt overeen met een fout in de dagverdamping van ongeveer 1 mm. De in tabel 3 gegeven onzekerheid in ANN- verdamping O_b is een gemiddelde van deze dagelijkse residuals.

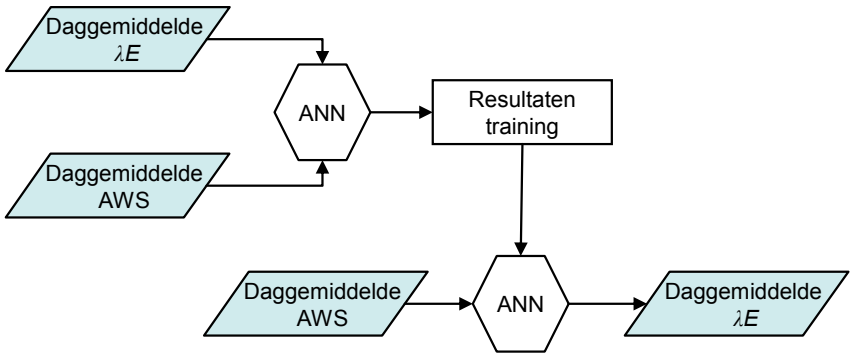
FIGUUR 3A STROOMSCHEMA DATAVERWERKING λE EN H. MET ENKELE GATEN WORDEN GATEN IN DE DATAREEKS BEDOELD VAN ÉÉN ENKEL HALFUUR



FIGUUR 3B STROOMSCHEMA DATAVERWERKING AUTOMATISCH WEER STATION DATA



FIGUUR 3C STROOMSCHEMA DATAVERWERKING ARTIFICIEEL NEURAAL NETWERK (ANN)



5

RESULTATEN

5.1 VERDAMPINGSREEKSEN

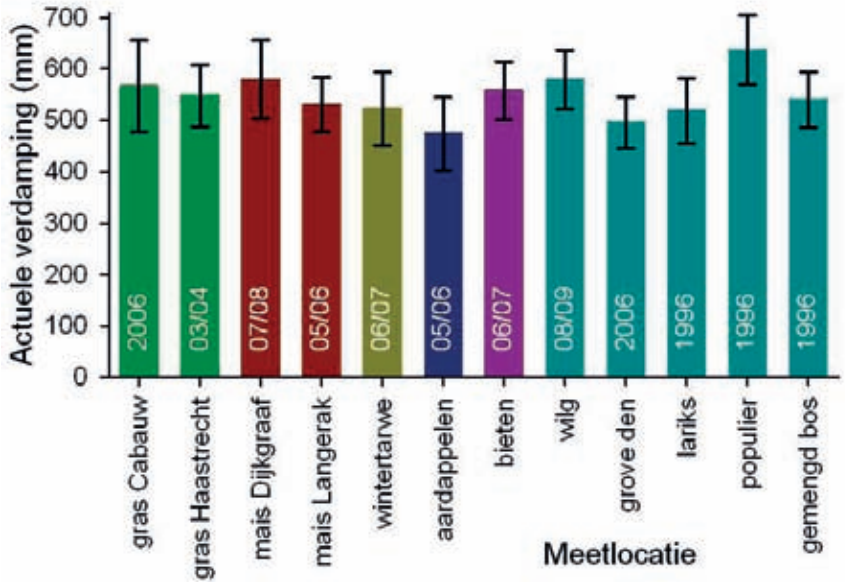
Tabel 3 geeft een overzicht van de totale verdamping per locatie voor één heel jaar. Deze periode is niet altijd precies een kalenderjaar, zie tabel 1. De onzekerheid in dit totaal is gegeven voor de dagen waarvoor gemeten verdamping is gebruikt (Oa) en voor de dagen die zijn opgevuld met het ANN (Ob) . De totale onzekerheid in de jaarlijkse verdamping in tabel 3 is berekend volgens: $\sqrt{O_a^2 + O_b^2}$

TABEL 3 JAARVERDAMPING EN ONZEKERHEDEN

Locatienaam	Verdamping (mm)	Onzekerheid in gemeten verdamping O_a (per jaar, mm)	Onzekerheid in ANN-verdamping (per dag, mm)	Onzekerheid in ANN- verdamping O_b (per jaar, mm)	Totale onzekerheid (per jaar, mm)
Bankenbos Lariks	519	52	0.44	35	63
Fleditebos Populier	637	64	0.53	21	67
Kampina Gemengd bos	540	54	0.39	11	55
Cabauw Gras	567	57	0.39	68	89
Haastrecht Gras	548	55	0.28	23	60
Langerak Maïs	531	53	0.43	4	53
Molenweg Aardappelen	474	47	0.63	53	71
Dijkgraaf Maïs	580	58	0.43	49	76
Lutjewad Wintertarwe	523	52	0.68	48	71
Oostwaard Wilg	579	58	0.52	6	58
Vredepeel Bieten	558	56	0.58	13	57
Loobos Grove den	496	50	0.50	2.5	50

Figuur 4 geeft de totale actuele verdamping weer per meetlocatie. De onzekerheid van dit totaal is weergegeven in de foutenbalken. Omdat het hier gaat om deels verschillende jaren is het niet mogelijk deze verdampingstotalen zonder meer onderling te vergelijken.

FIGUUR 4 TOTALE JAARLIJKSE ACTUELE VERDAMPING PER MEETLOCATIE



5.2 MOGELIJKE TOEPASSINGEN

5.2.1 VERGELIJKING MET DE MAKKINK-VERDAMPING

Tabel 4 geeft nogmaals de jaarlijkse verdamping per locatie, de neerslag over deze periode, de verdamping volgens de Makkink-methode en de gemiddelde ratio $E/E_{makkink}$. Deze ratio is niet de gewasfactor voor de bepaling van de referentie-verdamping maar de verhouding actuele verdamping – Makkink-verdamping. Hierbij is de Makkink-methode gebruikt zonder gewasfactor.

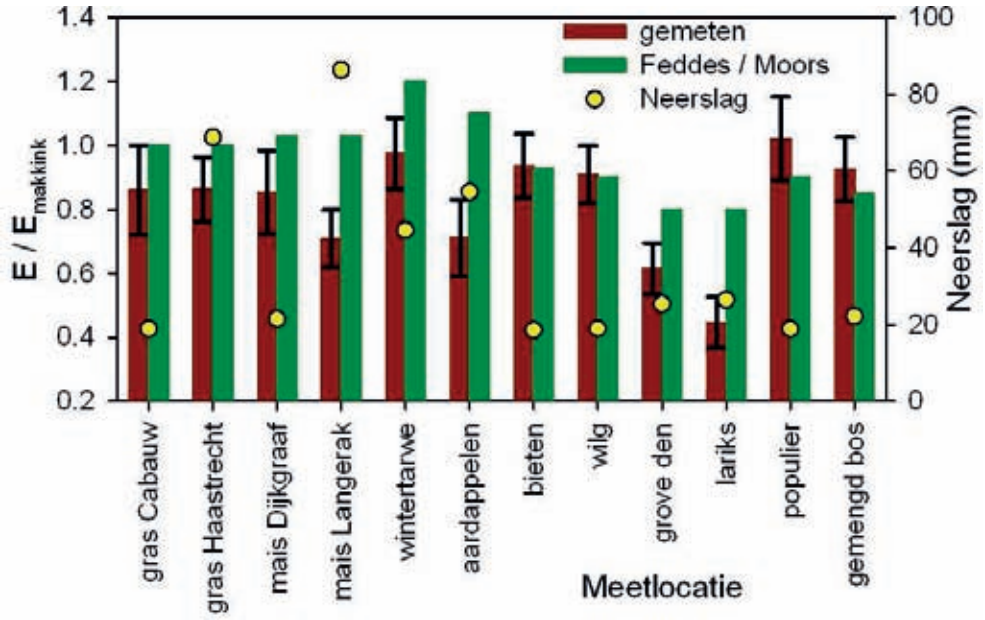
TABEL 4 JAARVERDAMPING MET ONZEKERHEID, NEERSLAG, VERDAMPING VOLGENS MAKKINK EN RATIO $E/E_{MAKKINK}$ MET ONZEKERHEID. NEERSLAG DE KOOY IS GEBRUIKT VOOR DE VOLLEDIGE PERIODE OMDAT DE NEERSLAGMETING TER PLAATSE ONDER DE KRUIN PLAATSVOND

Locatienaam	Verdamping (mm)	Neerslag (mm)	Verdamping volgens Makkink (mm)	Ratio $E/E_{Makkink}$ (-)
Bankenbos	519 ± 63	800	774	0.67 ± 0.08
Fleditebos	637 ± 67	889	528	1.21 ± 0.13
Kampina	540 ± 55	892	556	0.97 ± 0.10
Cabauw	567 ± 89	775	616	0.92 ± 0.14
Haastrecht	548 ± 60	676	619	0.88 ± 0.10
Langerak	531 ± 53	865	615	0.86 ± 0.09
Molenweg	474 ± 71	716	606	0.78 ± 0.12
Dijkgraaf	580 ± 76	843	569	1.02 ± 0.13
Lutjewad	523 ± 71	810	647	0.78 ± 0.11
Oostwaard	579 ± 58	895 *	646	0.90 ± 0.09
Vredepeel	558 ± 57	830	592	0.93 ± 0.10
Loobos	496 ± 50	827	597	0.83 ± 0.08

Figuur 5 laat de uit actuele verdamping en verdamping volgens methode Makkink berekende ratio $E/E_{makkink}$ zien voor juni voor alle locaties. Voor ieder gewas is ook de gemiddelde gewasfactor voor de referentieverdamping voor juni volgens Feddes (1987) weergegeven. Op de rechter y-as is de totale neerslag over juni weergegeven.

Voor de boslocaties is de ratio $E/E_{makkink}$ gebruikt volgens Moors (1996). Uiteraard is de ratio $E/E_{makkink}$ lager dan de gewasfactor, de gewasverdamping is in de zomer vaak vochtgelimiteerd. De ratio $E/E_{makkink}$ voor populier (Fleditebos) en gemengd bos (Kampina) is voor deze maand juni hoger dan volgens Moors. De verklaring hiervoor is dat de ratio $E/E_{makkink}$ door Moors is bepaald voor droge dagen, dus zonder interceptieverdamping.

FIGUUR 5 RATIO $E/E_{MAKKINK}$ IN JUNI VOLGENS METINGEN, GEWASFACTOR VOLGENS FEDDES, RATIO $E/E_{MAKKINK}$ VOLGENS MOORS EN NEERSLAG



5.2.2 NEERSLAGOVERSCHOT VOOR BOS, GEWASSEN EN GRAS

In figuur 6 is het neerslagoverschot uitgezet tegen de tijd voor alle bos- (a), gewas- (b) en graslocaties (c). Door het weergeven van het neerslagoverschot (neerslag-verdamping) is het beter mogelijk de verschillende meetjaren met elkaar te vergelijken. Voor sommige locaties zijn bovendien, omdat de meetperiode niet op 1 januari begon, de verdampings- en neerslagdata van het voorjaar aan het eind van de meetperiode naar voren verplaatst zodat alle meetreeksen op 1 januari beginnen.

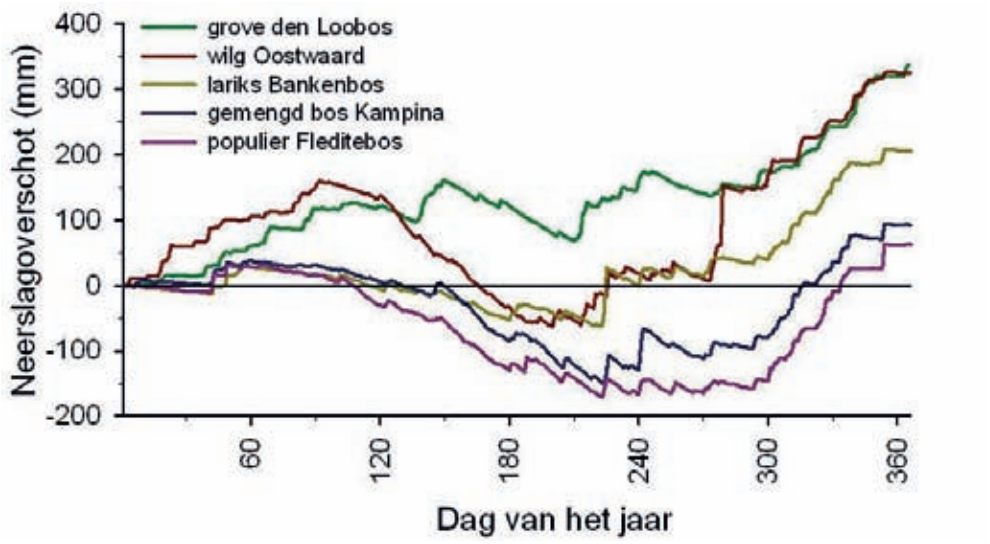
In de grafiek van de boslocaties is te zien dat het neerslagoverschot van de goed van water voorziene locaties Kampina en Fleditebos zeer klein is vergeleken met de watergelimiteerde locatie Loobos. Oostwaard zou op grond van de bodemgesteldheid en grondwaterstand niet bijzonder watergelimiteerd moeten zijn. Dat het neerslagoverschot toch in de buurt komt van dat van het Loobos komt door een uitzonderlijke regenval van ongeveer 155 mm in een week tijd (waarvan 90 mm in 18 uur) in de periode eind september tot begin oktober 2008.

In de grafiek van de gewaslocaties valt op dat alle gewassen (in verschillende jaren en met verschillende bodems) een vergelijkbaar neerslagoverschot hebben. Uitzondering is het bietengewas in Vredepeel, dit gewas blijkt (in de zomer van 2006) een relatief grote hoeveelheid water te kunnen verdampen.

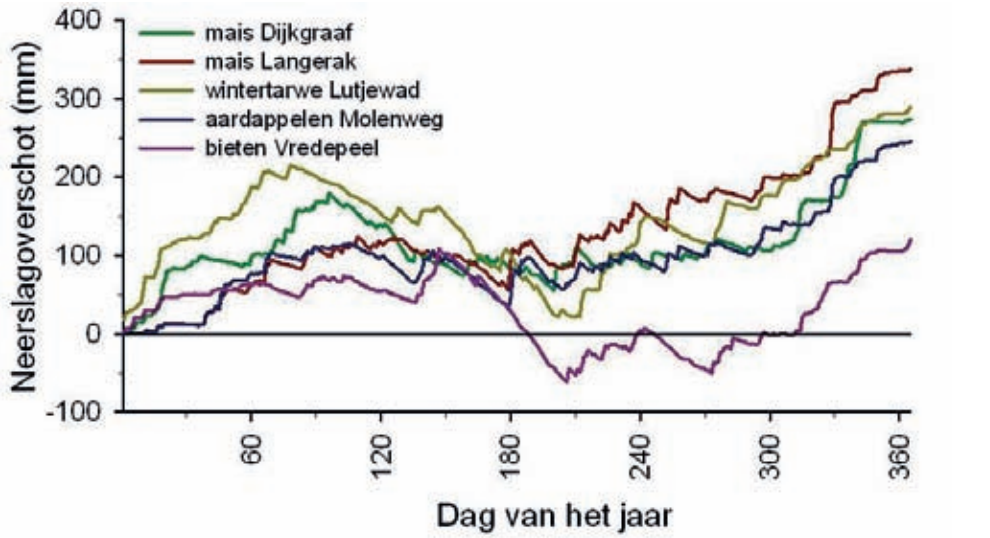
De graslocaties Cabauw en Haastrecht in grafiek 6c geven duidelijk verschillende patronen te zien. De verdamping van het gras in Haastrecht in de zomer is beduidend hoger dan die in het nabij gelegen Cabauw. Dit kan verklaard worden uit het feit dat een groot deel van de meetreeks van Haastrecht valt in de extreem warme en droge zomer van 2003 en de meetreeks van Cabauw in het warme, maar niet opvallend droge, jaar 2006. Het hoge neerslagoverschot in het voorjaar van Haastrecht is een gevolg van de relatief natte omstandigheden in de maanden januari en februari van 2004.

Op basis van de hier gepresenteerde 12 meetreeksen is het niet mogelijk algemene conclusies te trekken over de verdamping van bepaalde gewassen. Hiervoor zijn veel meer gelijktijdige meetreeksen nodig van verschillende gewassen op verschillende bodemtypen.

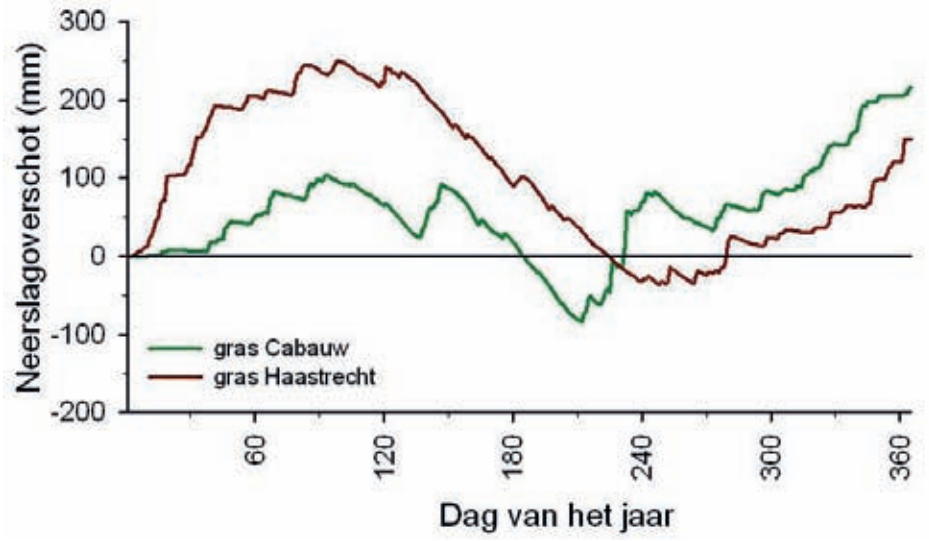
FIGUUR 6A NEERSLAGOVERSCHOT VOOR ALLE BOSLOCATIES



FIGUUR 6B NEERSLAGOVERSCHOT VOOR ALLE GEWASLOCATIES



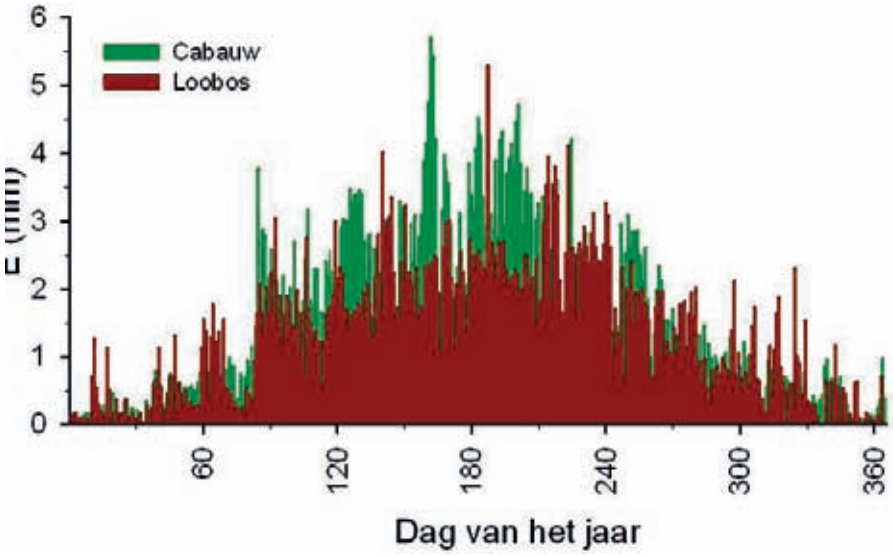
FIGUUR 6C **NEERSLAGOVERSCHOT VOOR BEIDE GRASLOCATIES**



5.2.3 DAGELIJKS VERLOOP ACTUELE VERDAMPING

Als laatste voorbeeld van een toepassing van de meetreeksen is een grafiek gemaakt van de dagelijkse verdamping van Cabauw en Loobos, beide voor het jaar 2006. Figuur 7 laat zien dat de verdamping in het Loobos in de zomer duidelijk lager ligt dan in Cabauw. In de winter is de verdamping vergelijkbaar maar de verdamping van het Loobos vertoont uitschieters. Deze uitschieters zijn een gevolg van interceptieverdamping in periodes dat de boomkruinen nat zijn. Een voorbeeld is de periode net na dag 60 waarin het gedurende een aantal dagen elke dag enkele millimeters regent.

FIGUUR 7 **ACTUELE VERDAMPING VAN CABAUW EN LOOBOS**



6

CONCLUSIES

De onzekerheid in de jaartotalen van actuele verdamping ligt bij de hier gebruikte methode tussen de 10 en 15%.

De onzekerheid in de jaartotalen wordt nauwelijks vergroot door het gebruik van een ANN als opvulmethode.

De onzekerheid in de dagtotalen bij gebruik van het ANN is maximaal 0.68 mm. In de database is per dag aangegeven of het dagtotaal direct is verkregen uit de metingen of berekend is met het ANN.

In tabel 4 is te zien dat de verschillen in de jaartotalen van actuele verdamping aanzienlijk zijn. Een goede bepaling van de actuele verdamping in zowel ruimte als tijd is dus belangrijk. Overal meten is te arbeidsintensief maar deze metingen kunnen wel gebruikt worden, in combinatie met satellietwaarnemingen en modellering, voor het opschalen van actuele verdamping in ruimte en tijd.

LITERATUUR

Aubinet M., A. Grelle., A. Ibrom, Ü. Rannik., J. Moncrieff., T. Foken, A.S. Kowalski, P.H. Martin, P. Berbigier, Ch. Bernhofer, R. Clement, J.A. Elbers, A. Granier, T. Grünwald, K. Morgenstern, K. Pilegaard, C. Rebmann, W. Snijders, R. Valentini en T. Vesala. Estimates of the Annual Net Carbon and Water Exchange of Forests: the EUROFLUX Methodology. *Adv. Ecol. Research*, 30 (2000), 113-175.

Droogers, P., 2009. *Verbetering bepaling actuele verdamping voor het strategisch waterbeheer*. STOWA rapport 2009-11.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1998. *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water Requirements*. FAO Irrigation and drainage paper 56.

Feddes, R.A., 1987. *Crop factors in relation to Makkink reference-crop evapotranspiration*, in (ed) Hooghart, Evaporation and weather, Technical Meeting 44, Ede, 25 maart 1987, Proceedings and Information no. 39, TNO Committee on Hydrological Research, Den Haag: 33-45.

Kruijt, B., J. A. Elbers, C. von Randow, A. C. Araújo, P. J. Oliveira, A. Culf, A. O. Manzi, A. D. Nobre, P. Kabat, and E. J. Moors, 2004. The robustness of eddy correlation fluxes for Amazon rain forest conditions. *Ecological Applications* 14:S101–S113.

Makkink, G. F., 1957. Testing the Penman formula by means of lysimeters, *J. Inst. Wat. Engrs.*, 11, 277-288.

Moffat, A..M., D. Papale, M. Reichstein, D. Y. Hollinger, A. D. Richardson, A. G. Barr, C.. Beckstein, B. H. Braswell, G. Churkina, A. R. Desai, E. Falge, J. H. Gove, M. Heimann, D. Hui, A. J. Jarvis, J. Kattge, A. Noormets, V. J. Stauch. Comprehensive comparison of gap-filling techniques for eddy covariance net carbon fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology* 147 (2007) 209–232.

Moors, E.J., A.J. Dolman, W. Bouten en A.W.L. Veen, 1996. De verdamping van bossen, H_2O 29 (1996) (16), pp. 462-466.

Moncrieff, J., Y. Malhi and R. Leuning, 1996. The propagation of errors in long-term measurements of land-atmosphere fluxes of carbon and water, *Glob. Change Biol.*, 2: 231-240.

Saxén, B. and H. Saxén, 1995. *NNDT - a neural network development tool. Version 1.2*. Å bo Akademi University, Åbo, Finland., 19 pp.

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

BIJLAGE 1

COÖRDINATEN VAN DE TWAALF MEETLOCATIES

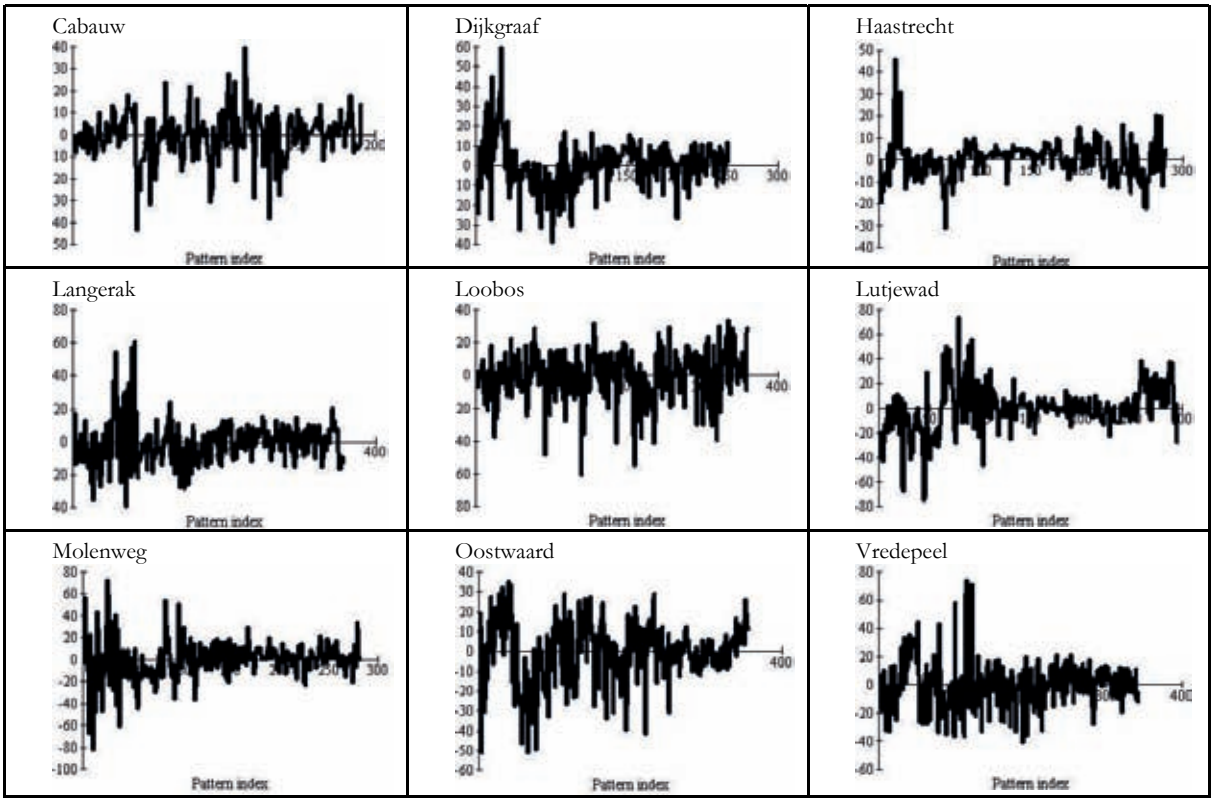
TABEL 5 **COÖRDINATEN VAN DE MEETLOCATIES**

Locatienaam	Coördinaten
Bankenbos	53° 1’14.75”N, 6°24’9.93”E
Fleditebos	52°19’6.00”N, 5°27’12.00”E
Kampina	51°34’1.00”N, 5°17’27.00”E
Cabauw	51°58’12.79”N, 4°55’34.28”E
Haastrecht	52° 0’11.29”N, 4°48’19.83”E
Langerak	51°57’12.91”N, 4°54’10.46”E
Molenweg	51°39’9.80”N, 4°38’10.85”E
Dijkgraaf	51°59’31.42”N, 5°38’45.40”E
Lutjewad	53°23’56.12”N, 6°21’21.70”E
Oostwaard	52°49’53.88”N, 4°54’33.52”E
Vredepeel	51°31’51.37”N, 5°50’37.50”E
Loobos	52° 9’59.69”N, 5°44’36.80”E

BIJLAGE 2

RESIDUALS VAN HET ARTIFICIEEL NEURAAL NETWERK (ANN)

FIGUUR 8 **RESIDUALS VAN DE ANN FIT (W M^{-2})**



BIJLAGE 3

DATABASE MET DE DAGELIJKSE VERDAMPING VOOR DE TWAALF LOCATIES

De verdampingsreeksen zijn voor deze toepassing beschikbaar gesteld vanuit de volgende onderzoeksprojecten:

- Besluit Subsidies Investeringen Kennisinfrastructuur (Bsik) ME1 (Nationaal Onderzoeksprogramma Klimaat voor Ruimte), <www.senternovem.nl/BSIK>
- Carboeurope-IP (Europese Unie FP6 EU-DGResearch), <www.carboeurope.org>
- Continuous HIgh PrecisiOn Tall Tower Observations of greenhouse gases (Chiotto) (Europese Unie FP5 EU-DGResearch), <www.chiotto.org>
- Euroflux (Europese Unie FP5 EU-DGResearch), <www.unitus.it/dipartimenti/disafri/progetti/eflux/euro.html>
- Boshydrologie project (Ministerie van LNV, Staatsbosbeheer, Vereniging van exploitanten van Waterleidingbedrijven in Nederland, Unie van Landschappen, Natuurmonumenten, Europese Unie), <www.climatexchange.nl/projects/boshydrologie/index.htm>
- Kennisbasis Klimaatverandering, ministerie van LNV.

De in deze studie gegenereerde datareeksen zijn toegankelijk voor niet-commerciële toepassingen.

De in deze studie gebruikte halfuurs data worden centraal bewaard in de database van het Carboeurope-IP project, http://gaia.agraria.unitus.it/database/carboeuropeip/. ‘
Deze data zijn vrij toegankelijk voor onderzoeksdoeleinden.

DATAPOLICY ALTERRA

Alterra, Wageningen UR stimulates the use of this data for research purposes. Questions about the data can be directed to the e-mail address given below. The user is kindly asked to communicate any problem in the data set to the e-mail address given below.
Users of this data are kindly requested to contact the address below prior to publication and to acknowledge: ‘Alterra, Wageningen UR’ in any publication in which the data are used. Users are also kindly asked to send a copy of any publication in which the data are used to the address given below. The quality assurance of the data includes a timestamp for the data set. Please always mention the version number of the data set.

Eddy Moors
Alterra, Wageningen UR, PO box 47, 6700AA, Wageningen, the Netherlands
Email: eddy.moors@wur.nl

KNMI ACKNOWLEDGEMENT CABAUW DATA

Users of this data are not allowed to pass this data to a third party. The data are only to be used for the research purpose as communicated between the user and KNMI. Questions about the data can be directed to the e-mail address given below. The user is kindly asked to communicate any problem in the data set to the e-mail address given below.

Users of this data are kindly requested to acknowledge: 'The Royal Netherlands Meteorological Institute' in any publication in which the data are used. Users are also kindly asked to send a copy of any publication in which the data are used to the address given below:
Dr. Fred Bosveld
Royal Netherlands Meteorological Institute, PO box 201, 3730 AE, De Bilt, The Netherlands
Email: fred.bosveld@knmi.nl

De database met de verdampingsreeksen is te downloaden van de website van STOWA, zie www.stowa.nl en van www.climatexchange.nl/projects/verdamping