

28 DEC. 1977

KONINKLIJK NEDERLANDS
METEOROLOGISCH INSTITUUT

De Bilt

WETENSCHAPPELIJK RAPPORT

W.R. 77-10

H.A.R. de Bruin en W. Kohsiek

De verdamping uit gras op kleigrond
in de zomer van 1976
vergeleken met de Penman-formule

De Bilt, 1977

Kon. Ned. Meteor. Inst.

De Bilt

II. e. 582.

Publikationsnummer: K.N.M.I. W.R. 77-10. (MO)

U.D.C.: 551.573

Summary

Measurements of daily evaporation from a grass surface (E^{EB}) with the energy balance method (using Bowen ratio) are described. These are compared with the daily potential evaporation, calculated with the empirical method of Penman: $E^{pot} = f E_0$, where f is a factor (see Table I) depending on the month and E_0 is the evaporation of a hypothetical open water surface, exposed to the meteorological conditions of the site under consideration.

The ratio E^{EB}/E^{pot} qualitatively agreed with the observed time pattern of rainfall and soil moisture (the latter measured with a neutron-probe).

The evaporation experiments form part of a research programme on the structure of the boundary layer of the atmosphere. For this programme a 200 m high tower (see photograph) was installed and equipped with instruments for sensing wind (speed and direction), temperature, humidity, etc.

Inleiding.

Naar aanleiding van de droge zomer van 1976 bereikten het K.N.M.I. vele vragen over de verdamping. Omdat er op het ogenblik géén methoden bekend zijn om met betrekkelijk eenvoudige invoergegevens de actuele verdamping te bepalen uit de diverse gebieden in Nederland, die qua begroeiing, bodemsoort e.d. van elkaar verschillen, konden deze vragen slechts ten dele worden beantwoord. In hoofdzaak betrof de informatie die kon worden verschaft de "openwaterverdamping" E_0 volgens Penman en de daarvan af te leiden "potentiële verdamping" uit kortgeknipt gras. E_0 wordt maandelijks per decade voor een 15-tal stations door het K.N.M.I. gepubliceerd.

In het kader van een verdampingsonderzoek wordt sinds augustus 1975 de verdamping bepaald uit een grasland bij Cabauw (Lopikerwaard). Het doel van dit artikel is enige voorbeelden te geven van de gemeten actuele verdamping in de droge zomer van 1976 en deze waarden te vergelijken met die van E_0 zoals die gepubliceerd worden door het K.N.M.I.

Het verdampingsonderzoek te Cabauw.

Vorig jaar augustus startte het K.N.M.I. een vrij intensief verdampingsonderzoek te Cabauw, dat een onderdeel vormt van een groter onderzoek naar de structuur van de onderste honderden meters van de atmosfeer. Dit wordt verricht o.a. om een inzicht te verkrijgen in de mechanismen die de verspreiding van luchtverontreiniging verzorgen en voor het verbeteren van (regionale) weersverwachtingen. Voor dit grenslaagonderzoek werd in 1972 een 200m hoge meetmast in gebruik genomen (zie foto 1).

Hieraan worden onder meer metingen verricht van temperatuur, windsnelheid en windrichting. Sinds vorig jaar augustus worden, op een terrein van 100m bij 100m bij deze mast, metingen verricht van diverse meteorologische grootheden, waaruit de verschillende componenten van de energiebalans van het aardoppervlak (waarvan de "latente warmtestroomdichtheid", ofwel de verdamping er één is) kunnen worden bepaald. Kennis van deze componenten is van belang, omdat de opbouw van de onderste honderden meters van de atmosfeer voor wat de temperatuur en de vochtigheid betreft in hoge mate bepaald wordt door de warmteuitwisselingsprocessen aan het aardoppervlak.

Hoewel het verdampingsonderzoek een meteorologische achtergrond heeft, draagt het ook een zeer duidelijk hydrologisch karakter.

Eén van de hoofddoelstellingen: "Het ontwikkelen en testen van diverse verdampingsmodellen voor kleinere en grotere gebieden in Nederland", werd namelijk geformuleerd naar aanleiding van de vele vragen die het K.N.M.I. (ook voor 1976) bereikten over verdamping.

Theorie.

Actuele Verdamping bepaald met de energiebalans methode.

Op grond van de wet van behoud van energie kan men, onder verwaarlozing van een aantal, doorgaans kleine, termen (b.v. foto synthese), schrijven:

$$R_n = L.E + H + G \quad (1)$$

R_n = de nettostraling (W/m^2)

E = de actuele verdamping ($kg/m^2 \cdot s$)

H = de voelbare warmtestroomdichtheid (W/m^2)

G = de bodemwarmtestroomdichtheid (W/m^2)

L = de specifieke verdampingswarmte van water

($2450 \cdot 10^3$ J/kg bij 20 °C)

Te Cabauw worden R_n en G direct gemeten.

Voor H en E kan worden geschreven: *

$$E = - \rho K_E \frac{\overline{\partial q}}{\partial z} \quad (2)$$

en

$$H = - \rho c_p K_H \frac{\overline{\partial T}}{\partial z} \quad (3)$$

ρ = de dichtheid van lucht (kg/m^3)

c_p = de warmtecapaciteit van lucht ($J/kg \cdot ^\circ C$)

T = de luchttemperatuur ($^\circ C$) (Eigenlijk de zg. potentiële luchttemperatuur; het verschil is in dit geval niet van belang).

* Een streepje boven een symbool betekent "gemiddeld over een periode van 30 min." .

q = de specifieke vochtigheid (kg waterdamp per kg natte lucht)

z = de hoogte boven het aardoppervlak (m)

K_E en K_H zijn uitwisselingscoëfficiënten voor respectievelijk vertikaal waterdamp- en warmtetransport (m^2/s).

K_E en K_H zijn moeilijk te meten grootheden, die onder andere van de stabiliteit van de atmosfeer afhankelijk zijn.

In zeer goede benadering blijkt dat $K_E = K_H$.

Uit (1), (2) en (3) volgt dan:

$$E = \frac{1}{L} \cdot \frac{R_n - G}{1 + \beta} \quad (4)$$

waarin $\beta \equiv \frac{H}{L \cdot E}$ de z.g. Bowenverhouding is, die m.b.v. (2)

en (3) geschreven kan worden als:

$$\beta = - \gamma \frac{\partial \bar{T} / \delta z}{\partial \bar{e} / \delta z} = - \gamma \frac{\Delta \bar{T}}{\Delta \bar{e}} \quad (5)$$

γ = de psychrometerconstante (≈ 0.66 mbar/°C)

e = de dampspanning van waterdamp (mbar)

Door op twee hoogten vlak boven het aardoppervlak (bijv. op 0,5 en 1,5 m) e en T te meten kan β en dus E bepaald worden, met de direct te meten waarden van R_n en G

De potentiële verdamping volgens Penman.

Penman [1, 2] leidde af dat voor de verdamping E_0 van een zeer uitgestrekt, ondiep wateroppervlak geldt dat:

$$E_0 = \frac{s R_n + \gamma f(u) \cdot (e_s - e)}{s + \gamma} \quad (6)$$

e_s = de maximale dampspanning van waterdamp bij de luchttemperatuur T_a op 2 m hoogte (mbar)

e = de dampspanning op 2 m

$$s = \left(\frac{\partial e}{\partial T} \right)_{T = T_a} \quad (\text{mbar}/^\circ\text{C})$$

$f(u)$ = een lineaire functie van de windsnelheid op 2 m hoogte.

Penman gaf tevens een methode om R_n , die in het algemeen niet direct wordt gemeten, te schatten uit de bewolkingsgraad n/N (of de relatieve zonneshijnduur), T_a en e .

Uit u , n/N , T_a en e kan dus E_0 worden berekend. Dit kan uiteraard ook geschieden met metingen van deze vier grootheden boven land.

E_0 wordt dan berekend voor een hypothetisch wateroppervlak. Penman vergeleek deze E_0 -waarden met gemeten verdamping uit kort geknipt gras dat goed van water was voorzien. Hij vond op deze manier de volgende empirische relatie tussen E_0 , "boven land gemeten" en de potentiële verdamping E^{pot} uit kort gras:

$$E^{\text{pot}} = f \cdot E_0 \quad (7)$$

f is een faktor waarvan de gemiddelde waarde wordt gegeven in tabel I (ontleend aan [2]).

Het K.N.M.I. publiceert maandelijks E_0 per decade van 15 stations [3]. Voor de exacte wijze waarop E_0 wordt berekend wordt verwezen naar Kramer [4]. De verdamping te Cabauw werd met (4) bepaald voor een aantal geselecteerde dagen, verspreid over de zomer van 1976. Om deze gemeten verdampingswaarden te kunnen vergelijken met die

van E_0 uit [3], moest E_0 voor deze geselecteerde dagen worden geschat uit de decade sommen.

Hiervoor werd gebruik gemaakt van de empirische relatie die o.a. door Makkink [5] is gevonden:

$$E_0 \approx \frac{s}{s + \gamma} \cdot \frac{Q}{L} \quad (8)$$

Q = de globale straling.

Aan deze relatie zijn de factoren ontleend om een decade som te verdelen over de dagen. De decade som van E_0 te Cabauw werd geschat met die van De Bilt en van Oudenbosch met gewichten resp. 2 en 1. In (8) werden de te De Bilt gemeten waarden van s en Q gebruikt. De op deze manier berekende waarde van E_0 werd vervolgens vermenigvuldigd met de factor f zodat een schatting van de potentiële verdamping E^{pot} van de beschouwde dagen werd verkregen. Met nadruk moet worden opgemerkt dat de methode die hier gevolgd is om de potentiële verdamping te schatten vrij onnauwkeurig is.

Apparatuur.

Voor de bepaling van de energiebalans worden de netto straling, de bodem-warmtestroom en de Bowen-verhouding gemeten. Bovendien worden, met oog op de modellering van het verdampingsproces, ook windsnelheid, neerslag, grondwaterpeil en vochtgehalte van de bodem bepaald. De netto straling wordt gemeten met een apparaat volgens Suomi. De sensor is een horizontaal plaatje, dat aan de boven- en onderzijde zwart is. Het temperatuurverschil tussen boven- en onderkant is recht evenredig met de netto straling. Met thermokoppels wordt dit temperatuurverschil gemeten. De sensor is niet afgeschermd tegen weersinvloeden (regen, wind); deze wordt kunstmatig geventileerd met een luchtstroom van ca. 20 ms^{-1} .

De bodemwarmtestroom wordt bepaald uit meting van de warmtestroom op 5 en 10 cm diepte met warmtestroomplaatjes (op 3 plaatsen), en het temperatuurverschil tussen 0 en 2 cm diepte. Dit laatste gebeurt met naaldvormige weerstandelementen (lang 30 cm, diameter 2 mm) welke over hun gehele lengte gevoelig zijn. Deze meting geschiedt op één plaats.

De Bowen-verhouding wordt berekend uit het verschil in (droge) temperatuur en het verschil in natte-bol temperatuur van de lucht op twee niveaus, en de natte boltemperatuur van de lucht op één hoogte. De temperatuurmetingen worden met geventileerde sensoren volgens het type van Assman uitgevoerd. De hoogten van de niveaus zijn instelbaar tussen 0 en 3 m; in de meeste gevallen is gekozen voor 0,45 m en 1,10 m. (zie foto 2). Hierboven is gezegd dat wij ook behoefte hebben aan informatie omtrent de vochttoestand van de bodem. De grootheid die het meest interessant is ten aanzien van het verdampingsproces is echter de zuigspanning ψ van de bodem ter diepte van de wortelzone. Deze grootheid is voor het van belang zijnde traject niet direkt in het veld meetbaar.

Men is dan aangewezen op indirecte methodes. Een methode is die waarbij gebruik gemaakt wordt van een in het laboratorium bepaald verband tussen de zuigspanning en het vochtgehalte (vochtkarakteristiek). In het veld kan men dan volstaan met meting van het vochtgehalte. Bovengenoemd verband is voor ons gemeten door de Heidemij. [6] Het vochtgehalte werd door de Rijkswaterstaat (zie J.J. Mannaerts [7]) bepaald met een neutronensonde. In fig. 1 is de plaats van de instrumenten aangegeven.

Terrein.

De grond van het energiebalansterrein is tot een diepte van ca. 0,60 m bewerkt om een zo uniform mogelijk bodemprofiel te verkrijgen. Het profiel is te beschouwen als een komgrond op veen. Karakteristiek is de zeer zware kleilaag van ca. 18 tot 60 cm diepte. Het terrein is gedraïneerd met buizen op een diepte van 65 cm en op onderlinge afstand van ongeveer 5 m. De begroeiing bestaat uit grassen, voornamelijk roodzwenkgras. In de loop van de zomer van 1976 is echter het gras hier en daar verwelkt en overwoekerd door hondsdraf.

De Heidemij. [6] heeft een bodemkundig onderzoek verricht waarbij onder meer de vocht karakteristiek van verscheidene monsters is bepaald. De gemiddelde vocht karakteristiek van de kleilaag blijkt het best te passen bij de karakteristiek van "Basin clay", bodentype nr. 19 van Rijtema, (fig. 2).

Enige resultaten.

In de tabel II zijn voor een 9-tal dagen in het tijdvak juni t/m september 1976 de gemeten termen van de energiebalans (netto straling R_n , bodemwarmtestroom G , latente warmtestroom LE^{EB} , voelbare warmtestroom H^{EB}) en de potentiële verdamping LE^{pot} gegeven.

De gegevens verzameld te Cabauw hebben betrekking op overdagsommen, waarbij als overdag de periode waarvoor geldt $R_n > 0$ is genomen. LE^{pot} is berekend (behoudens de windsnelheid die als etmaalgemiddelde is ingevoerd) met de overdaggemiddelden van de invoergegevens. We mogen aannemen dat de verdamping in de nachtperiode verwaarloosbaar is t.o.v. die overdag.

In de tabel is ook opgenomen het quotiënt van de overdagsommen van de gemeten voelbare en latente warmtestroom - een soort gemiddelde Bowen-verhouding dus - , het quotiënt van de gemeten en de potentiële verdamping, alsmede de hoeveelheid neerslag welke in het tijdvak tussen de vorige datum en de actuele is gevallen.

De keuze van de data is in zekere mate willekeurig; er is naar een gelijkmatige verdeling over het tijdvak 1 juni t/m 30 september gestreefd, terwijl dagen met een geringe dagsom voor de netto straling vermeden zijn. Ook voor de andere data in het tijdvak zullen t.z.t. - voor zover dit mogelijk is - de termen van de energiebalans worden bepaald.

De tabel laat zien dat voor de geselecteerde dagen de werkelijke verdamping soms aanzienlijk kleiner is dan de potentiële. Dit hangt vrijwel zeker samen met de vrij slechte conditie van de grasbedekking; in de hier beschouwde periode was het terrein niet uniform bedekt met groen gras, maar waren er plekken waar het gras niet wilde groeien en die dientengevolge een meer geel/bruin dan groen aanzien hadden. Aan de beschrijving: "een kortgeknipte, optimaal van water voorziene grasmat", welke terug te vinden is in de definitie van de potentiële verdamping, voldeed het gras op energiebalansterrein bepaald niet.

Het is in dit verband van belang op te merken dat er een samenhang tussen het quotiënt LE^{EB} / LE^{pot} en de hoeveelheid neerslag in de voorafgaande periode (zie tabel II) te constateren is.

Na een periode met neerslag is het beschouwde quotiënt groter dan na een periode met weinig (zoals van 9 tot 19 augustus) of geen

neerslag. Het ligt voor de hand te veronderstellen dat het vochtgehalte van de bodem niet toereikend was voor een optimale verdamping. Na regenval zal deze situatie gunstiger worden, en de actuele verdamping zal de potentiële meer benaderen.

Het is interessant deze gedachtengang te toetsen aan de metingen van de bodemvochtigheid. In fig. 3 zijn metingen van de bodemvochtigheid op ca. 20 cm beneden het maaiveld weergegeven [7], samen met de neerslag* en de grootheid LE^{EB}/LE^{pot} .

In de periode 1 juni - 13 juli vertoont de bodemvochtigheid een dalende tendens, welke onderbroken is bij het meetpunt 29 juni. Voor deze onderbreking moet de neerslag gevallen op 19 en 20 juni verantwoordelijk geacht worden. (Deze hoeveelheden zijn in de grafiek ingetekend op 20 en 21 juni wegens de afspraak betreffende het tijdvak.) De verhouding LE^{EB}/LE^{pot} is op 21 juni maximaal in de gepresenteerde meetreeks. In het tijdvak 14 juni - 22 augustus zijn er geen metingen van het bodemvocht verricht. Voor 23 augustus tot het eind van de hier beschouwde periode, 31 september, zijn er 3 metingen; gezien het neerslagpatroon mag verwacht worden dat de bodemvochtigheid in dit laatste tijdvak continu toeneemt. De grootheid LE^{EB}/LE^{pot} neemt continu toe.

Opgemerkt moet worden dat gezien het feit dat LE^{pot} niet erg nauwkeurig kon worden bepaald, de in tabel II gepresenteerde waarden van LE^{pot} niet te absoluut moeten worden opgevat.

*De aangeduide neerslaggegevens vóór 16 juli zijn het gemiddelde van de stations Groot Ammers en Benschop; de dagsommen hebben betrekking op het tijdvak 09.00 M.E.T. vorige dag tot 09.00 M.E.T. heden. De neerslaghoeveelheden na 16 juli zijn die gemeten nabij het energiebalansterrein en hebben betrekking op het tijdvak 05.00 M.E.T. heden tot 05.00 M.E.T. volgende dag.

Er is dus in kwalitatief opzicht een verband tussen de verhouding gemeten/potentiële verdamping en het bodemvocht te constateren. Deze relaties zullen in de naaste toekomst meer in detail kunnen worden bestudeerd als verdere metingen gedaan in 1976 zijn uitgewerkt. Een voorbeeld van de dagelijkse gang van de netto straling, bodem-warmtestroom, latente en voelbare warmtestroom is gegeven in fig. 4 voor 26 augustus 1976. De latente warmtestroom neemt 's ochtends snel toe, bereikt al vrij spoedig een soort plafond, en neemt aan het eind van de middag weer snel af. Midden op de dag is de voelbare warmtestroom groter dan de latente. Fig. 5 geeft een ander voorbeeld, nu voor 29 augustus 1975. Hier vertoont de curve voor de verdamping geen plafond, en is de voelbare warmtestroom kleiner dan de latente. De laatste metingen werden niet op het energiebalansterrein verricht, maar op een stukje "natuurlijk" grasland. Het grasdek was van goede kwaliteit; er was geen zichtbaar gebrek aan water.

Uit de 2 voorbeelden blijkt hoe een watertekort ook de dagelijkse gang van de sensibele en latente warmtestroom kan beïnvloeden, naast een effect op de dagtotalen van deze warmtestromen. Deze constatering is van belang voor de tak van de meteorologie die zich met de studie van verschijnselen in de grenslaag bezighoudt.

De experimenten worden de komende jaren voortgezet, waarbij in de eerst komende jaren ernaar gestreefd zal worden de verdamping, alsmede andere grootheden welke voor de modellering van belang zijn, continu gedurende het gehele groeiseizoen te meten.

Tabel I Verhouding f tussen de potentiële verdamping E^{pot}
en de open water verdamping E_o (naar [2]).

Periode	f
mei t/m augustus	0.8
september; oktober; maart en april	0.7
november t/m februari	0.6
jaar	0.75

Tabel II Gemeten componenten van de energiebalans, de potentiële verdamping en de neerslag.

datum	overdagsom R_n (10^4 Jm^{-2})	overdagsom G (10^4 Jm^{-2})	overdagsom LE_{EB} (10^4 Jm^{-2})	LE^{pot} , (10^4 Jm^{-2})	overdagsom $\frac{H_{EB}}{H}$ (10^4 Jm^{-2})	$\frac{H_{EB}}{LE_{EB}}$	$\frac{LE_{EB}}{LE^{pot}}$	neerslag in afgelopen periode (mm)
10-6	1448	100	689	1157	660	0,96	0,60	
21-6	1266	103	790	933	372	0,47	0,85	38,9
10-7	981	52	373	634	556	1,49	0,59	0,0
22-7	1414	36	807	994	571	0,71	0,81	13,6
9-8	1109	97	562	893	450	0,80	0,63	23,0
19-8	1148	92	418	891	638	1,52	0,47	0,1
26-8	863	76	371	757	416	1,12	0,49	0,0
8-9	588	61	301	487	225	0,75	0,62	5,9
22-9	562	40	322	450	199	0,62	0,72	39,0

Toelichting bij de figuren.

Fig. 1. Waarnemingsterrein van het K.N.M.I. te Cabauw.

PS, psychrometermastje voor de bepaling van de Bowen-verhouding; R_n , netto stralingsmeter; G, bodemwarmtestroom; θ , bodemvochtgehalte; T_g , bodemtemperatuur; ff, windsnelheid; rr, regenmeter.

Fig. 2. Relatie tussen de bodemvochtigheid (θ) en de zuigspanning (ψ). x : energiebalansterrein, gemiddelde over de onverzadigde zône (0 - 60 cm); ● : bodemtype no. 19 "basin clay" (klassificatie van Rijtema). Bron: Ref. [6].

Fig. 3. Neerslag, bodemvocht en LE^{EB} / LE^{Pot} .

Het in de figuur gesuggereerde lineaire verloop tussen 2 meetpunten van het bodemvocht geldt slechts bij benadering.

Fig. 4. Dagelijkse gang van de netto straling (R_n), bodemwarmtestroom (G), latente warmtestroom (LE) en de voelbare warmtestroom (H) op 26 augustus 1976. De tijdschaal is in G.M.T.; Middel Europese Tijd = G.M.T. + 1 uur.

Fig. 5. Als fig. 4, nu voor 29 augustus 1975.

Literatuur.

- [1] Penman, H.L. : Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. Roy. Soc. A., 193 (1948) 120-146.
- [2] Penman, H.L. : Evaporation: an introductory survey. Proceedings of the informal meeting on physics in agriculture. Neth. J. Agr. Sc. Vol. 4, No. 1 (1956) 9-29.
- [3] K.N.M.I. : Maandelijks Overzicht der Weersgesteldheid.
- [4] Kramer, C. : Berekening van de gemiddelde grootte van de verdamping voor verschillende delen van Nederland volgens de methode van Penman. K.N.M.I., Med. en Verh. nr. 70 (1957).
- [5] Makkink, G.F. : De verdamping uit vegetaties in verband met de formule van Penman. Com. voor Hydr. Ond. T.N.O., Versl. en Meded. No 4 (1960) 90-115
- [6] Jager, C.J.,
Nakken, T.C. en
Palland, C.L. : Bodemkundig onderzoek van twee graspercelen nabij Cabauw. N.V. Heidemaatschappij Beheer (1976).
- [7] Mannaerts, J.J. : Bepaling van het bodemvochtgehalte op een terrein van het K.N.M.I. te Cabauw met behulp van de nucleaire meetmethode. R.W.S. Dir. Waterh. en Waterbeweging District Zuid-Oost. Nota nr.: 76-3 (1976).

Dankbetuiging.

De schrijvers danken de medewerkers van de instrumentele afdeling van het K.N.M.I. voor de onmisbare bijdragen op instrumenteel terrein. Tevens zijn zij grote dank verschuldigd aan het hoofd van het district Zuidoost van de Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging en zijn medewerkers voor het meten van het bodemvochtgehalte te Cabauw en aan het hoofd van de afdeling Speurwerk van de N.V. Heidemaatschappij Beheer en zijn medewerkers voor hun adviezen en voor het verrichten van het bodemkundig onderzoek.

Verder zijn zij drs. W.H. Slob van het K.N.M.I. zeer erkentelijk voor de verstrekking van de gegevens omtrent de bodemwarmtestroom.

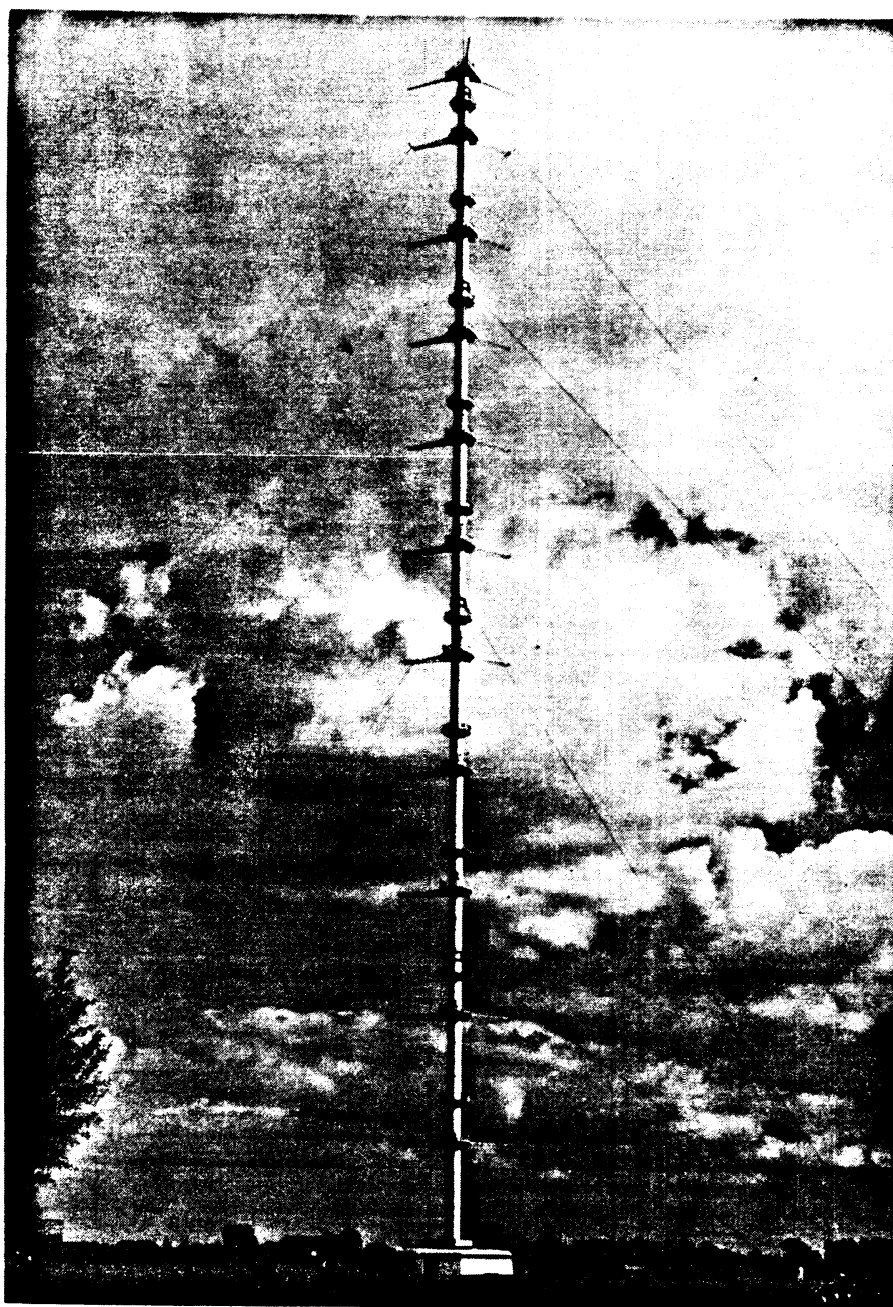


Foto 1

200m. meteorologische mast van het KNMI te
Cabauw

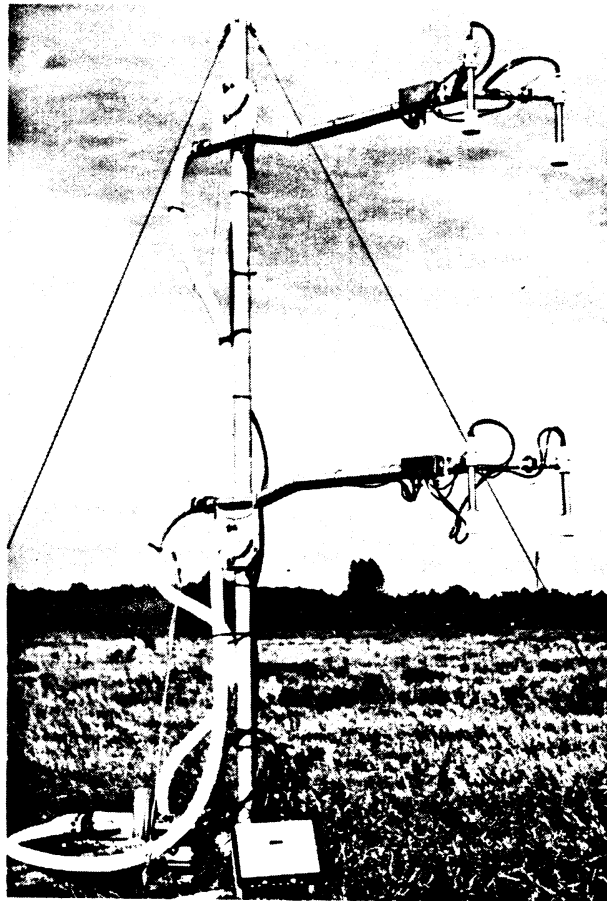
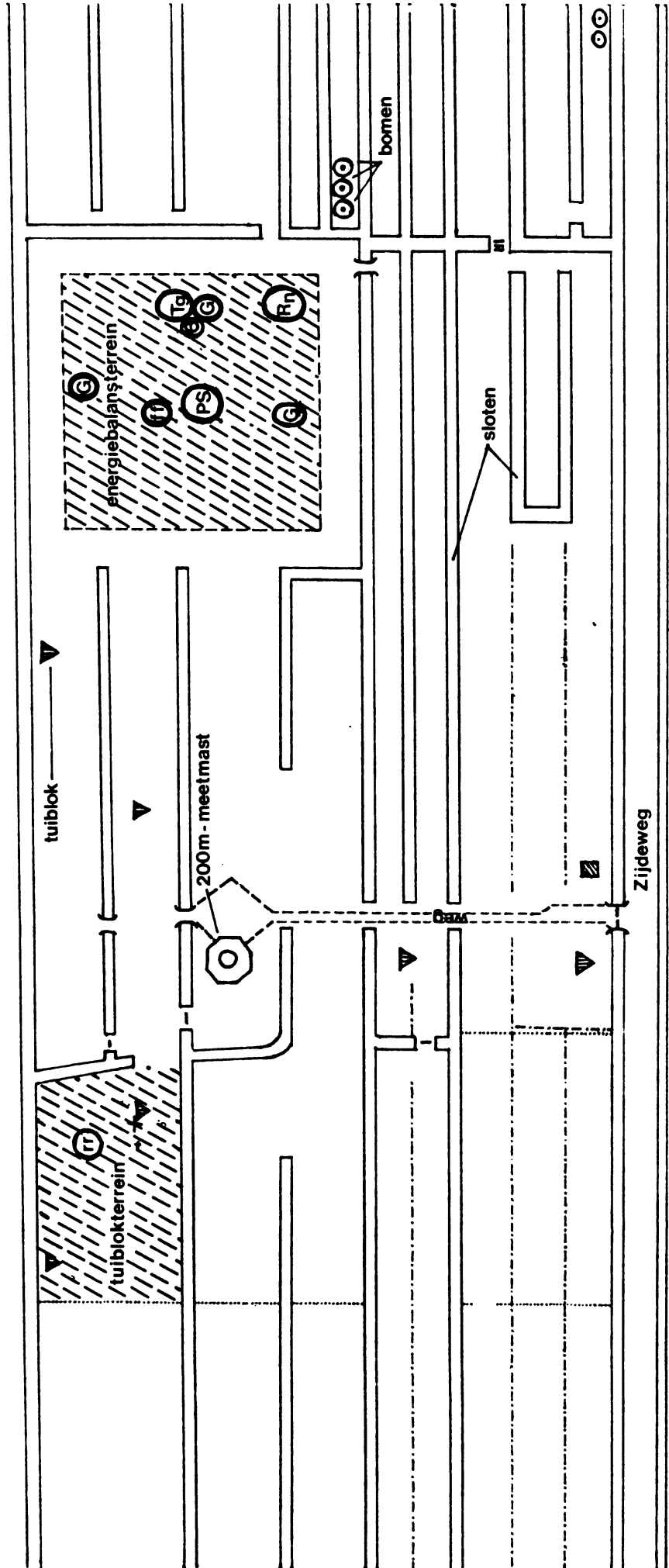
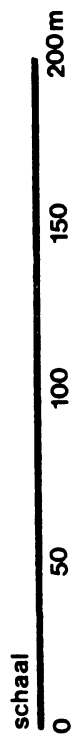


Foto 2

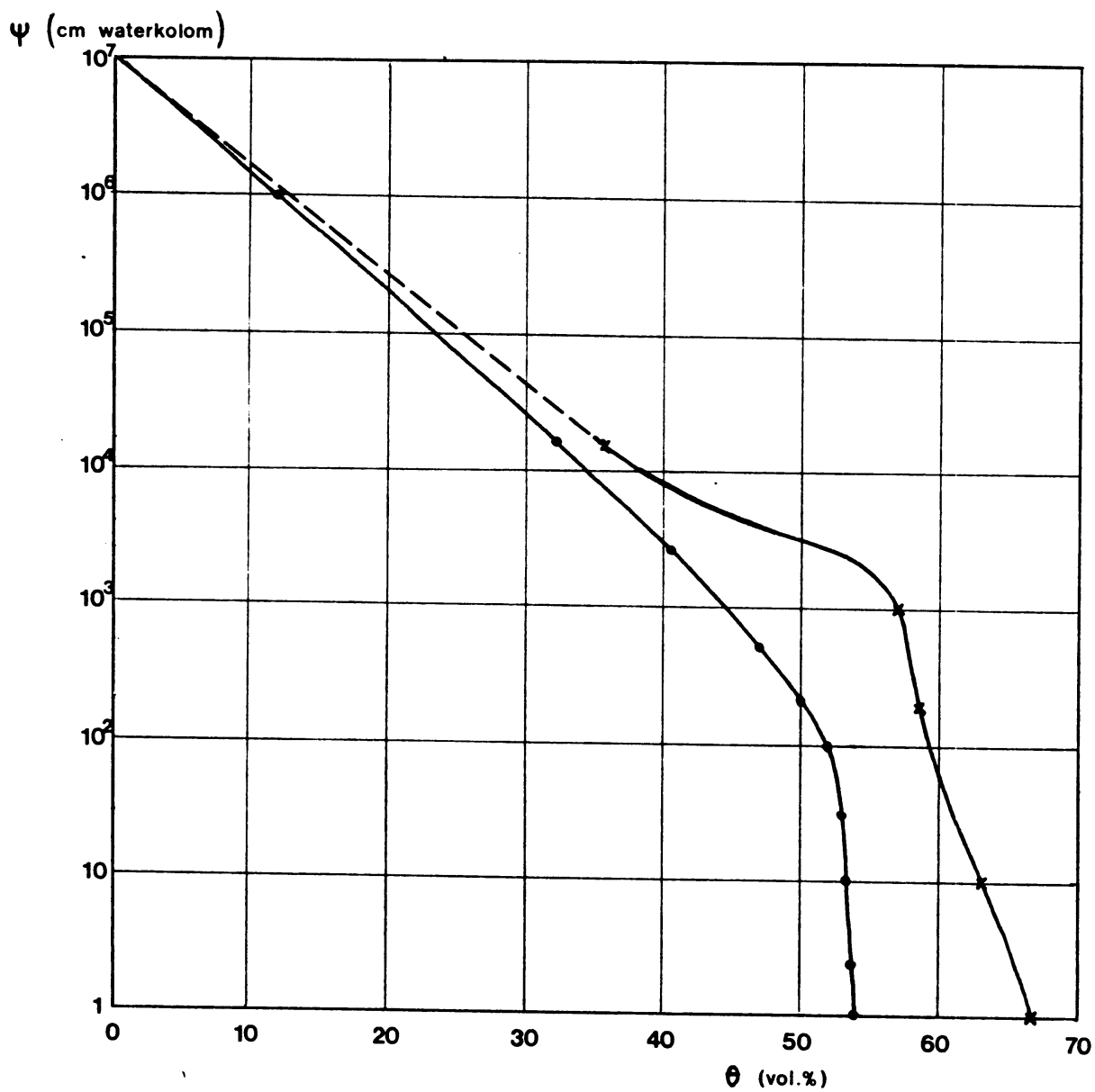
Apparatuur ter bepaling van de Bowen-verhouding
(psychrometermastje)

figuur 1

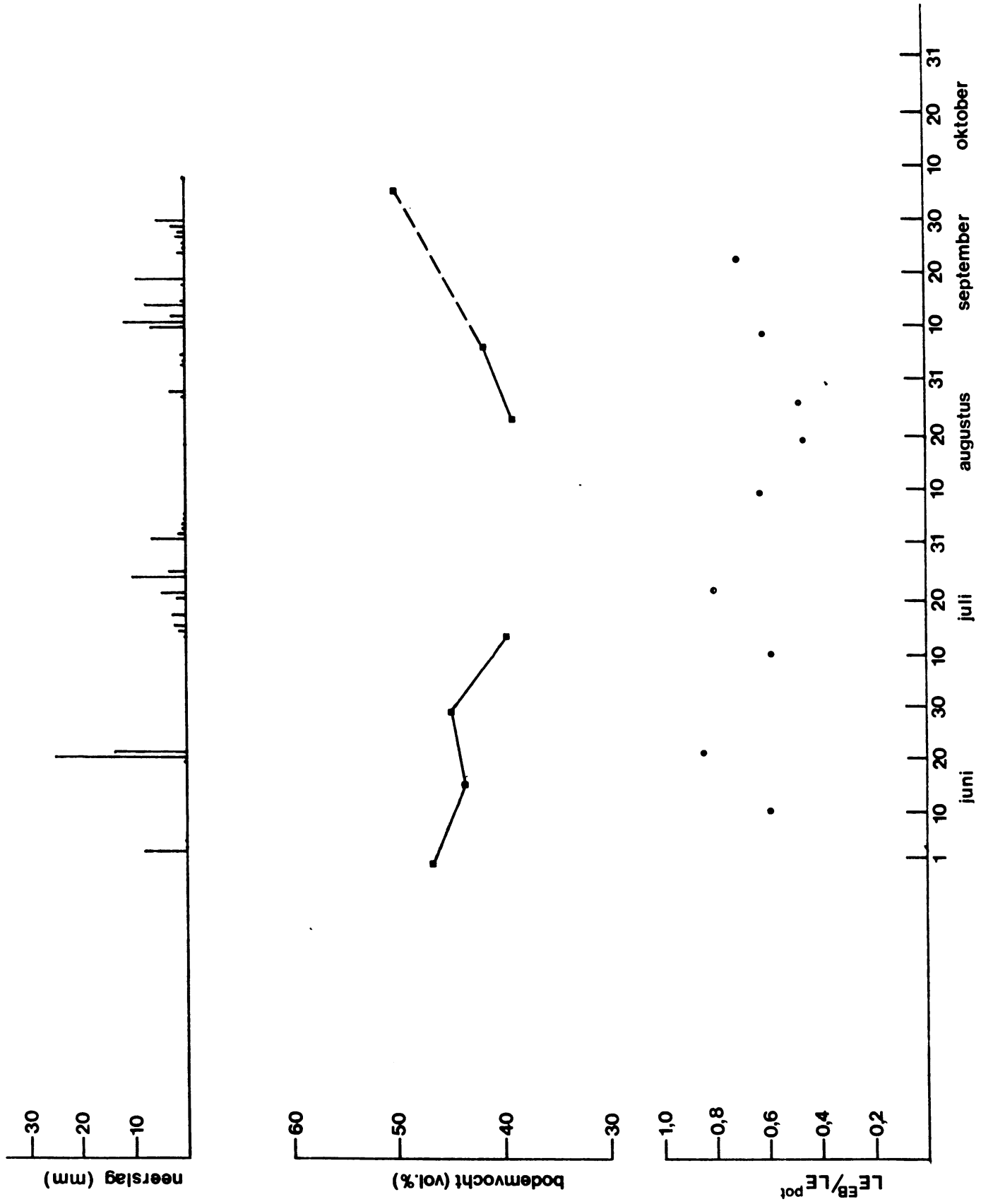


boomgaard

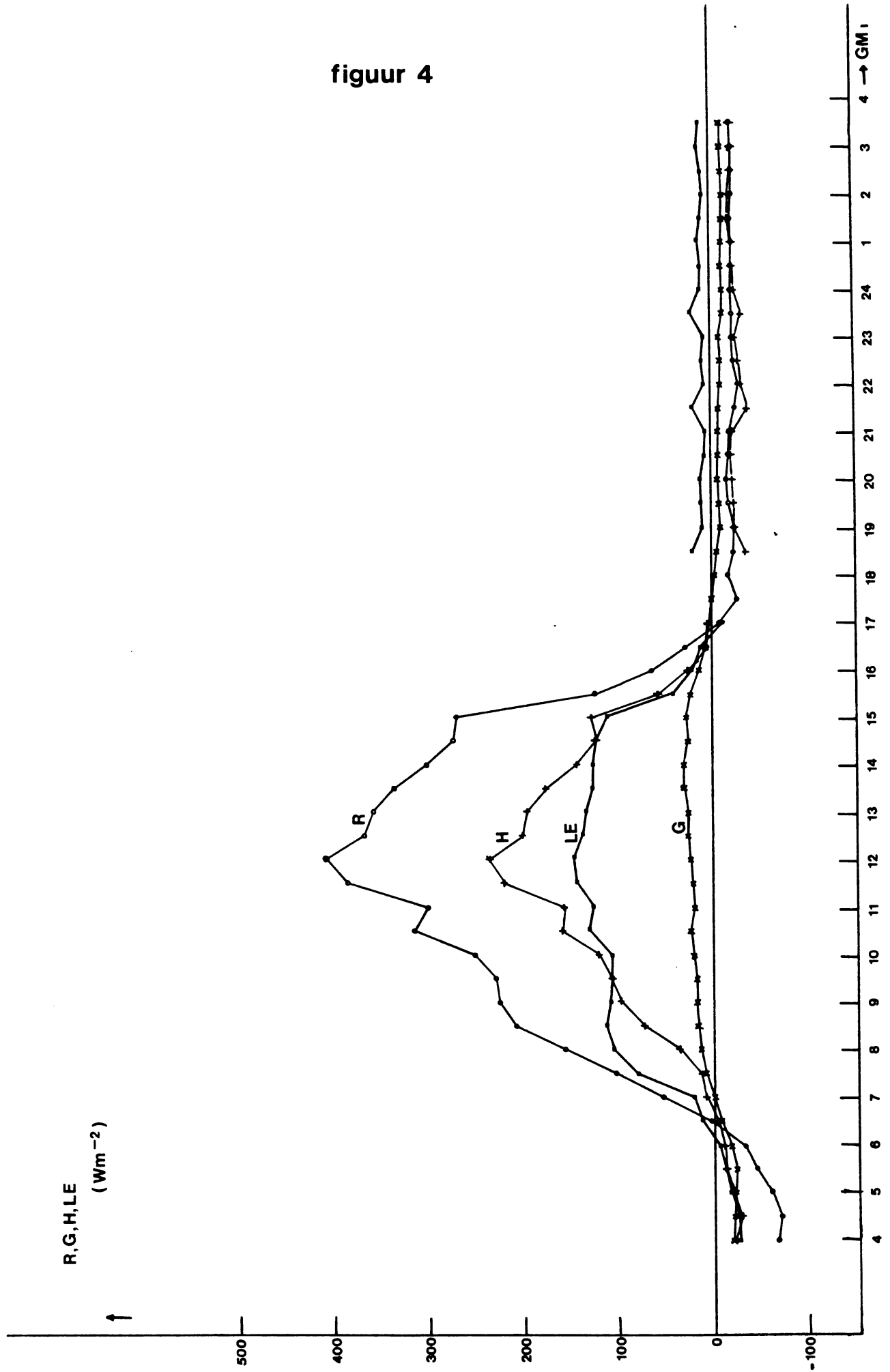
figuur 2



figuur 3



figuur 4



figuur 5

