

W
Repp. V.L.D.

LANGGOLVIGE HEMELSTRALING

TE NIAMEY

pieter van de sanden

theoretische teeltkunde
landbouwhogeschool

Intern rapport no 14

EEN EMPIRISCHE METHODE TER BEPALING VAN DE LANGGOLVIGE HEMELSTRALING TE NIAMEY IN DE SAHEL

Inleiding

In de atmosfeer van de aarde zijn verschillende gassen aanwezig, die langgolvlige straling emitteren. Voornamelijk zijn waterdamp en kooldioxide hiervoor verantwoordelijk. Deze emissie wordt langgolvlige hemelstraling genoemd. Er zijn grofweg drie methoden ter bepaling van deze straling, namelijk met behulp van radiometers; met behulp van zogenaamde 'radiation charts'; of door gebruik te maken van empirische formules, die een relatie leggen tussen de langgolvlige hemelstraling en eenvoudige synoptische parameters.

Er zijn in de loop der tijd verschillende empirische formules beschreven, waarvan de meeste een relatie leggen tussen de langgolvlige hemelstraling en eenvoudige waarnemingen op grondnivo, zoals luchttemperatuur en partiële waterdampdruk. In het algemeen zijn ze te schrijven als

$$L_d = f(T, e)$$

met L_d als langgolvlige hemelstraling in W/m^2 , T als luchttemperatuur in $^{\circ}K$ en e als partiële waterdampdruk in mb. De konstanten in deze empirische funktie zijn totnutoe voornamelijk ontleend aan Engelse, Amerikaanse en Australische waarnemingen. De toepasbaarheid en nauwkeurigheid van de empirische konstanten zal per plaats en seizoen sterk variëren, afhankelijk van onder andere de atmosferische structuur (figuur 1).

Het doel van hieronder beschreven studie is een voor de Sahel-zone geschikte empirische formule ter bepaling van de langgolvlige hemelstraling te vinden ter precisering van de energiebalansen van granen en grassen.

Methode

e m p i r i s c h e f o r m u l e s

Middels regressieberekeningen zijn de empirische konstanten in die formules berekend, die het meest in de literatuur worden aangetroffen, wel of niet aangevuld met een extra konstante (c).

- de formule van Swinbank (1963), $L_d = a T^6$ (Swinb)
die alleen gebruik maakt van $L_d = a T^6 + c$ (Swinbk)
de luchttemperatuur
- de formule van Monteith (1973), $L_d = a T + b$ (Month)
in feite een vereenvoudiging
van de formule van Swinbank
met de luchttemperatuur in $^{\circ}C$
- de formule van Brunt (1934), $L_d = \sigma T^4 (a + b \sqrt{e})$ (Brunt)
waarin naast de luchttemperatuur
ook de waterdampdruk in
rekening wordt gebracht
- de formule van Brutsaert (1975), $L_d = a \sigma T^4 (e/T)$ (Bruts)
 $L_d = a \sigma T^4 (e/T) + c$ (Brutsk)

met a , b en c als empirische konstanten en σ als de konstante van Stefan-Boltzman ($5,668 \cdot 10^{-8} W/m^2$).

l a n g g o l v i g e h e m e l s t r a l i n g

Ten behoeve van bovengenoemde regressieberekening is de langgolvige hemelstraling bepaald met behulp van de zg. Elsasser stralingskaart (Elsasser 1942) (figuur 2). Deze berust op de mogelijkheid de langgolvige hemelstraling te beschrijven als een gesloten integraal van de optische diepte (u , in grammen waterdamp per cm^2) over de luchttemperatuur. De kaart is zo gekonstrueerd dat middels het uitzetten van een u - T relatie over de beschouwde atmosferische laag en middels een oppervlaktebepaling de langgolvige hemelstraling berekend kan worden. Alhoewel verscheidene auteurs verbeteringen op de Elsasser kaart hebben aangebracht, geeft voor bovenbeschreven doel de kaart van 1942 voldoende betrouwbare gegevens. Daar de procedure, zoals onder andere Haltiner & Martin (1957) die beschrijven, veel tijd in beslag neemt, is de berekening verricht met behulp van een komputer-programma, waarin de Elsasser-kaart (benaderd middels regressieberekeningen) is opgenomen (figuur 3). In deze berekening is de extra bijdrage van eventuele bewolking op het totaal van de langgolvige hemelstraling niet opgenomen. Achteraf dient derhalve, middels een korrektie op de empirische formule, hiermee rekening gehouden worden.

g e g e v e n s

De voor de Elsasser kaart benodigde gegevens (ter bepaling van de u - T relatie) zijn afkomstig van radiosonde-metingen, een routine van nagenoeg ieder vliegveld, zo ook die te Niamey. Ze wordt verricht rond 12.00 uur plaatselijke tijd. Deze gegevens zijn ter beschikking gesteld door Dr. Devynck van het Centre Agrhymet te Niamey en afkomstig van de 'Direction de la Météorologie Nationale du Niger'. Het betrof radiosonde-gegevens over het jaar 1976. Daar slechts éénmaal per dag een radiosonde wordt opgelaten, is er bij de berekening van de empirische konstanten in de formules vanuit gegaan, dat deze over het etmaal niet significant veranderen. Deze aanname dient in een vervolgstudie geverifieerd te worden. De gegevens over de variabelen in deze formules, T en e , zijn ook van bovengenoemde instantie afkomstig, inclusief gegevens over zicht, bewolking en regenval te Niamey en hebben betrekking op het moment van radiosonde-waarneming (met uitzondering van de regenval-data, die op het gehele etmaal betrekking hebben). Gegevens van T en e zijn bepalingen op grondnivo in de Stevenson-hut. Figuur 4 geeft een indruk van enkele aspecten van het klimaat te Niamey in 1976.

Resultaten

Tabel 1 geeft het resultaat van de berekeningen. Duidelijk springen de formules, die zowel de luchttemperatuur als de waterdampdruk incorporeren, er als de betere uit, terwijl de T -formules het laten afweten. Een bevestiging van de onontbeerlijkheid van de waterdampdruk in de formule als beschrijvende faktor geeft de korrelatie-matrix (tabel 2), waarin alle bekeken factoren met de langgolvige hemelstraling en met elkaar gekorreleerd zijn. Alle factoren blijken slecht met elkaar gekorreleerd. De hoogste korrelatie is die tussen de straling en de waterdampdruk. Korrelatie tussen de luchttemperatuur en de straling is slecht en totaal afwezig tussen de luchttemperatuur en de waterdampdruk (op

het is niet duidelijk hoe de relatie van de T-formules met de T/e-formules is
dit is een verwachting in de toekomst?
 welke relatie de T-formules gebaseerd zijn). Verbanden tussen de langgolvlige hemelstraling enerzijds en zicht, bewolking en regenval anderszijds zijn zwak en lopen waarschijnlijk via de relatie van deze factoren tot de partiële waterdampdruk. Het is derhalve te verwachten dat uitsplitsen op deze drie factoren geen noemenswaardige verbetering zal geven (tabel 3 t/m 6).

Opsplitsing naar hoogte van de partiële waterdampdruk e (tabel 3) geeft een duidelijke verbetering te zien voor de T-formules, merkwaardigerwijs een verslechtering voor de T/e-formules. Uitsplitsing op bewolking (tabel 4) of regen (tabel 5) geeft nauwelijks verandering voor de T/e-formules, wel een verbetering voor de T-formules. Uitsplitsen op zicht heeft voor de T/e-formules weer nauwelijks invloed, echter wel op de T-formules; slecht zicht geeft een verbetering en goed zicht een verslechtering (tabel 6).

Discussie

De eerste indruk is, dat uitsplitsing op bovengenoemde factoren nauwelijks invloed heeft op de inhoud en juistheid van de T/e-formules, maar die van de T-formules sterk beïnvloedt. Een tweede feit dat in het algemeen opvalt is dat de T/e-formules er beter afkomen, met name geldt dit voor de Brunt-formule en de Brutsaert-formule aangevuld met een konstante, die beide een lage SD vertonen, dat wil zeggen dat de door de formule gegeven langgolvlige hemelstraling weinig afwijkt van de volgens de methode van Elsasser berekende. De eenvoudigste voor Niamey te gebruiken formule is de Brunt-formule in de volgende vorm:

$$L_d = \sigma T^4 (0,616 + 0,0365 \sqrt{e})$$

die over het gehele jaar redelijke uitkomsten zal geven bij gebruik over niet al te korte periodes.

Aparte bespreking vragen echter de resultaten van de regressie-analyse na uitsplitsing op hoogte van de waterdampdruk (natte/droge periode), en wel om twee redenen: 1) tijdens de droge periode fungeren de T-formules, die eenvoudiger zijn, even goed als de T/e-formules. 2) tijdens de natte periode is de variatie in de hoogte van de langgolvlige hemelstraling erg laag; de standaardafwijking is nl. slechts $12,1 \text{ Wm}^{-2}$ op een gemiddelde langgolvlige hemelstraling van 396 Wm^{-2} . De eenvoud dienende, terwijl de betrouwbaarheid geen geweld wordt aangedaan, valt voor de droge periode (neerkomend voor 1976 op 1 november tot 16 april) de keuze dan op de Monteith-formule, terwijl in de natte periode, vanwege de minimale variatie in de hemelstraling, bij gebruik over niet te korte periodes een gemiddelde waarde goed als maatstaf zal fungeren. Daarmee volgt een tweede aanbeveling:

$$\begin{aligned}
 \text{'natte' seizoen: } L_d &= 396 \text{ Wm}^{-2} \\
 \text{droge seizoen } L_d &= 4,64 T + 202 \text{ Wm}^{-2} \\
 &\text{met } T \text{ in } ^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

Figuur 5 vergelijkt het resultaat van deze twee aanbevelingen met het verloop van de volgens de methode van Elsasser berekende langgolvlige hemelstraling.

n a d e r e a n a l y s e v a n d e r e s u l t a t e n

T-formules

Opvallend is het verschil bij goed en bij slecht zicht. Bij goed zicht funktioneren deze formules in het geheel niet, bij slecht zicht redelijk. Het zicht wordt met name beïnvloed door het stofgehalte in de lucht. Dit stof heeft een bepaalde temperatuur en is als zodanig verantwoordelijk voor een ~~mm~~ of meer belangrijk deel van de langgolvige straling, met name vanwege het feit, dat dit stof zich in het onderste gedeelte van de atmosfeer bevindt. De afwezigheid van korrelatie tussen zicht en temperatuur (tabel 2) is hiermee niet in tegenspraak omdat beide verschijnselen slechts in geringe mate kwantitatief gerelateerd zijn.

Dat de T-formules de waterdampdruk ten onrechte buiten beschouwing laten, in het geval Niamey, blijkt uit tabel 1 en uit het feit dat bij uitsplitsing op twee categorieën in e er een verbetering in nauwkeurigheid optreedt. *)

De vereenvoudiging van de Swinbank-formule, die Monteith (1973) voorstelt, blijkt uit bovenstaande gerechtvaardigd.

De berekende waarden voor de Swinbank- en Monteith-formule liggen in dezelfde orde van grootte als welke de auteurs zelf geven.

*) Figuur 6 illustreert dit nog: er is een duidelijke relatie tussen de grootte van e (of u) en het verschil tussen de met een Swinbank-formule berekende langgolvige hemelstraling en de langgolvige hemelstraling volgens de methode van Elsasser.

T/e-formules

Opvallend is dat de inhoud van de T/e-formules vrij ongevoelig is voor de verschillende uitsplitsingen (op misschien die voor de droge periode na). Brutsaert (1975) leidt op niet-experimentele gronden een koëfficiënt af ter grootte van 1,24, redelijk in overeenstemming met ^{als vermeld in tabel 1} bovenstaande experimentele bevindingen. ~~De empirische~~ konstanten in de Brunt-formule wijken af van de gangbare (0,44 en 0,08), maar stemmen overeen met die gevonden door Wartena e.a. (1973) en door Kohsiek (nog niet gepubliceerd) voor Nederlandse omstandigheden!

Nog even terug naar figuur 5, waarin een opmerkelijk verschijnsel, namelijk het feit dat in januari 1976 alle methodes (bij nader onderzoek bleken ook de Swinbank- en Brutsaert-formules hetzelfde te vertonen) de langgolvige hemelstraling onderschatten, terwijl alle methodes in december 1976 deze overschatten. Dit vroeg om een nadere beschouwing van het vochtprofiel in deze maanden, daar waarschijnlijk de aanname die de empirische formule hanteert, namelijk representativiteit van de waarnemingen op grondnivo voor de toestand van de atmosfeer erboven, hier minder goed opgaat.

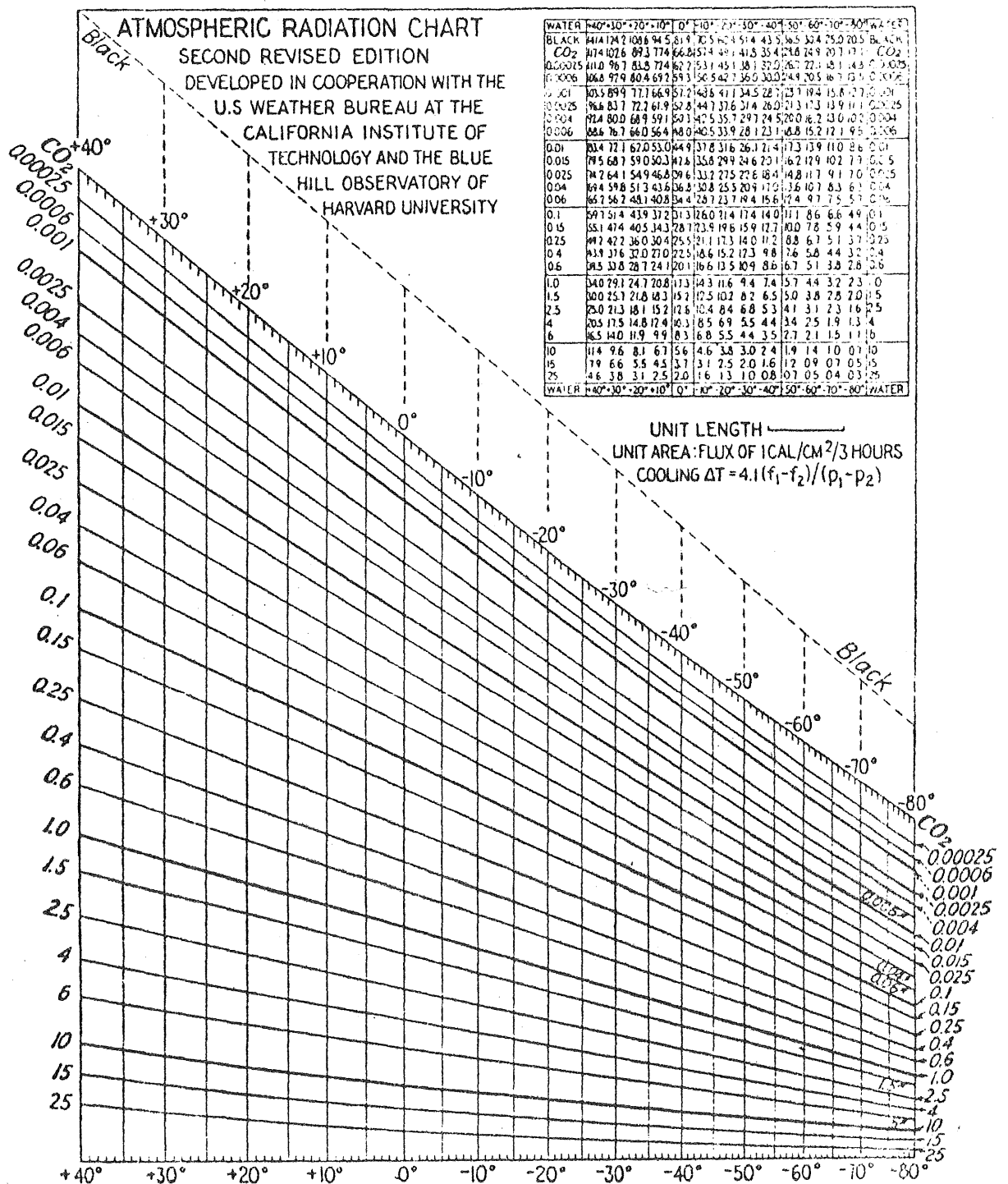
Figuur 7 geeft het beeld van het vochtprofiel (uitgedrukt in de mengverhouding r) in de atmosfeer. Tevens is het verloop van de hemelstraling gegeven volgens de methodes van Elsasser en Brunt. De beide maanden januari en december liggen in het droge seizoen en de mengverhouding stijgt nagenoeg niet uit boven 8g/kg. Beide maanden kenden nauwelijks bewolking (op cirrus na). Duidelijk is dat december nog droger is dan januari, maar, wat belangrijker is, een redelijk regelmatig verlopend vochtprofiel heeft, terwijl januari op bepaalde hoogte in de atmosfeer een relatief aanzienlijke hoeveelheid vocht tijdens de meeste dagen aanwezig is, die verantwoordelijk is voor een extra hoeveelheid langgolvige hemelstraling. In

Waar? →
vermeld!

januari is de onderschatting het geringst of afwezig op die dagen, waarin het profiel relatief het minst verstoord is ten opzichte van het vochtgehalte op grondnivo. In december is de overschatting nagenoeg konsekwent aanwezig. Deze is waarschijnlijk het gevolg van het feit dat de gehanteerde konstanten op jaarbasis zijn berekend, inclusief de maanden met vochtige hogere luchtmassa's, waardoor een andere relatie ontstaat tussen straling en T en e. Het feit dat de onderschatting in januari groter is dan in andere maanden met dezelfde vochtige luchtmassa's tussen 600 en 800 mb ligt in het feit dat de relatieve bijdrage van deze massa's aan de langgolvlige straling in januari groter is dan in de andere maanden, waarin de mengverhouding op grondnivo boven de 20g/kg ligt terwijl het 2e maximum (indien aanwezig) niet veel hoger is dan die in januari. Hierdoor is de bijdrage van deze vochtige luchtmassa's aan de totale langgolvlige hemelstraling geringer.

Literatuur

- Brunt, D (1934) Physical and Dynamical Meteorology.
Cambridge University Press, 136 pp.
- Brutsaert, W (1975) On a derivable formula for long-wave radiation from clear skies. Water Res.Rep. 11: 742-744
- Elsasser, W.M (1942) Heat transfer by infra-red radiation in the atmosphere. Harvard Meteorology Studies 6
- Haltiner, G.D. and F.L.Martin (1957) Dynamical and Physical Meteorology. McGraw-Hill, London.
- Monteith, J.L (1973) Principles of Environmental Physics. Edward Arnold (Publishers) Limited, London.
- Swinbank, W.C (1963) Long-wave radiation from clear skies. Quart.J.R.Met.Soc. 89: 339-348
- Wartena, L., C.L.Palland and G.H.v.d.Vossen (1973) Checking of some formulae for the calculation of long wave radiation from clear skies. Arch.Met.Geoph.Biokl.,Ser.B 21: 335-348



Figuur 2: De Elsasser stralingskaart. Op de horizontale as staat de luchttemperatuur uitgezet in °C, op de vertikale as de optische diepte (u) in g/kg.

Figuur 3: Programma ter berekening van de langgolvlige hemelstraling

C. BEREKENING LANGGOLVLIGE STRALING VOLGENS DE ELSASSER KAART

```

DIMENSION NAAM(6),P(20),TA(20),DELTAT(20),U(20),E(20),R(20)
DIMENSION TD(20),X(20),Y(20)

500 READ(2,699) NAAM,N
699 FORMAT(6A4,6X,12)
IF(NAAM(1).EQ.4HEIND) GO TO 1000
READ(2,700) (P(I),TA(I),DELTAT(I),I=1,N)
700 FORMAT(6F6.0,2F6.1)

X80=193.15**2
SIGMA=5.668E-8
AREA=0.
U(1)=0.
TD(1)=TA(1)-DELTAT(1)
TABS=273.15+TD(1)
E(1)=6.107*(273.15/TABS)**4.767*EXP(24.6065*TD(1)/TABS)
R(1)=0.62197*E(1)/(P(1)-E(1))*1000.
X(1)=(TA(1)+273.15)**2
Y(1)=X(1)*(0.8304+7.85E-4*TA(1))

DO 3 I=2,N
  TD(I)=TA(I)-DELTAT(I)
  TABS=273.15+TD(I)
  E(I)=6.107*(273.15/TABS)**4.767*EXP(24.6065*TD(I)/TABS)
  R(I)=0.62197*E(I)/(P(I)-E(I))*1000.
  DU=0.5*(R(I-1)/(R(I-1)+1.E-3+1.)+R(I)/(R(I)+1.E-3+1.))
  BU=DU*0.001*(P(I-1)-P(I))*SQRT((P(I-1)+P(I))/2000.)
  U(I)=U(I-1)+BU
  X(I)=(TA(I)+273.15)**2
  IF(U(I).GT.0.25) GO TO 4
  Y(I)=X(I)*EXP((13.3E-4*TA(I)-1.7113)*ALOG(1.+U(I))-0.5888+9.5E-4*
1  TA(I))
  GO TO 5
4 Y(I)=X(I)*EXP((5.84E-4*TA(I)-0.6030)*ALOG(1.+U(I))-0.8933+29.5E-4
1  TA(I))
5 CONTINUE
  AREA=AREA+(Y(I)+Y(I-1))*X(I-1)-X(I))
3 CONTINUE

Y80=X80*EXP(-0.6198*ALOG(1.+U(N))-1.2248)
AREA=AREA+(Y(N)+Y80)*X(N)-X80)
AREA=AREA+3.92*(2.376-1.903*ALOG10(U(N)))/SIGMA
AREA=AREA*SIGMA
RGLO=SIGMA*(TA(1)+273.15)**4-AREA

WRITE(6,800) NAAM,RGLO
800 FORMAT(6A4,6X,9H RGLO IS ,F8.2)
WRITE(6,801) (P(I),R(I),I=1,N)
801 FORMAT(2F8.2)

GO TO 500
1000 CONTINUE

END

```

$P(I)$ = luchtdruk in mb
 $TA(I)$ = luchttemperatuur in $^{\circ}C$
 TD = dauwpunttemperatuur in $^{\circ}C$
 $DELTAT(I) = TA(I) - TD(I)$
 $SIGMA$ = konstante van Stephan-Boltzmann
 $U(I)$ = optische diepte in g/cm^2 ; berekend zoals in Maltiner & Martin (1957)
 $DU = U(I) - U(I-1)$
 $E(I)$ = partiële waterdampdruk in mb; berekend is gemaakt van de formule van Soer
 $R(I)$ = menzverhouding in gr/kg ; berekend zoals gegeven in Smithsonian Meteorological Tables
 $RGLO$ = langgolvlige hemelstraling in W/m^2

van de Elsasser stralingskaart:
 X-as: $X(I) = (TA(I) + 273.15)^2$
 Y-as: $Y(I) = f(TA(I), U(I)) \times X(I)$
 voor $U=0$ geldt:
 $f = 0.8304 + 7.85 \times 10^{-4} \times TA$ $r=0.999$
 voor U kleiner dan 0,25:
 $f = \exp((13.3 \times 10^{-4} \times TA - 1.7113) \times \ln(U+1) - 0.5888 + 9.5 \times 10^{-4} \times TA)$ $r=0.988$
 voor U groter dan 0,25:
 $f = \exp((5.84 \times 10^{-4} \times TA - 0.6030) \times \ln(U+1) - 0.8933 + 29.5 \times 10^{-4} \times TA)$ $r=0.998$
 $Y(80^{\circ})$ is nog specifiek beschreven als $X(80^{\circ}) \times \exp(-0.6198 \times \ln(U+1) - 1.2248)$ zijnde het laatste punt op de kaart, waarnaar de T-U curve wordt geëxtrapoleerd.

De tabel van de stralingskaart is voor $0.4 < U < 4$ benaderd volgens:
 $AREA = 3.92 \times (-1.903 \times \log U + 2.376) : SIGMA$
 Het oppervlak onder de T-U curve is onderverdeeld in trapezia, waarvan het oppervlak (=AREA) cumulatief wordt berekend. De langgolvlige hemelstraling wordt vertegenwoordigd door het oppervlak boven de curve en berekend volgens:
 $RGLO = SIGMA \times TA^4 - AREA$

Tabel 1.12

Values of the constants a and b from Brunt's formula for a and b

Location	Position	Altitude (m)	a	b	References
Benson	32° N, 11° W		0.53	0.098	DENIS [1927]
Upsala	60° N, 18° E	200	0.43	0.082	ASKER [1920]
Bassora	37° N, 3° E	1160	0.48	0.088	ANGSTROM [1915]
Montpellier	43° N, 1° W	2850	0.60	0.042	BOUTARD [1920]
Lindenberg	47° N, 9° E	40	0.34	0.070	REIBTSCHE [1925]
Poona	19° N, 74° E	564	0.55	0.062	RAMANATHAN and DESAI [1952]
Washington D.C.	39° N, 77° W	137	0.44	0.091	KIMBALL [1918]
Mt. Weather	37° N, 78° W	540	0.52	0.066	KIMBALL [1918]
Various Loc. in U.S.A.			0.53	0.062	
Mt. Whitney	36° N, 118° W	4420	0.50	0.032	ANGSTROM [1924]
Kanzelhoehe	47° N, 14° E	1500	0.47	0.063	ECKEL [1934]
Kew	52° N, 0° W	5	0.62	0.056	Observatory Staff
Lake Hefner	36° N, 98° W	363	0.34	0.062	ANDERSON [1952]
California	37° N, 120° W		0.66	0.059	Goss and Brooks [1956]

Figuur 1: Waarden van empirische konstanten in de Brunt-formule voor verschillende lokaties. (uit: van Wijk, W.R. (1963) Physics of Plant Environment. North-Holland Publishing Co., Amsterdam)

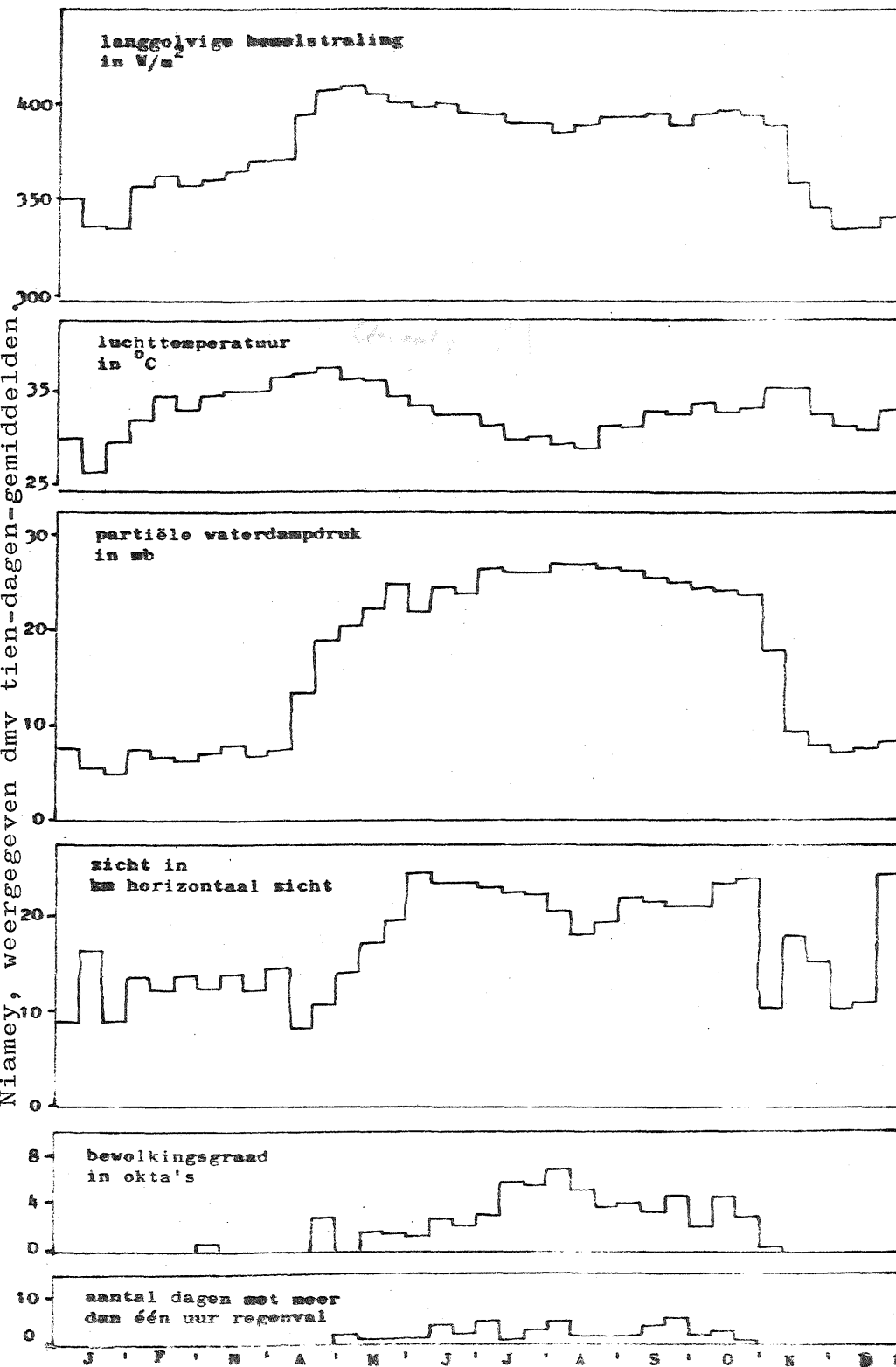
formule-type	empirische konstanten			r	sd
	(a)	(b)	(c)		
Swinb	0.4586×10^{-12}			0.455	27.1
Swinbk	0.2179×10^{-12}		198.73	0.455	23.6
Month	3.4563	264.42		0.454	23.6
Brunt	0.6162	0.0365		0.904	11.7
Bruts	1.1716			0.906	18.0
Brutsk	0.7402		140.00	0.906	11.2
totaal aantal dagen: 361					
gemiddelde langgolvlige hemelstraling: 378 W/m^2					26.4

Tabel 1: Resultaat van de regressieanalyse van de gegevens over het gehele jaar.

r = correlatie-coëfficiënt tussen de langgolvlige hemelstraling enerzijds berekend volgens de methode van Elsasser en anderszijds volgens de betreffende empirische formule

sd = standaardafwijking van de lineaire regressielijn door de punten (L_{dEls} , L_{dform}) en geeft de mate aan waarin geldt dat de langgolvlige hemelstraling volgens de beide methodes berekend gelijk zijn

Figuur 4: Het verloop van verschillende aspecten van het klimaat te Niamey, weergegeven dmv tien-dagen-gemiddelden



	luchttemp	dampdr	zicht	bewolk	regen
langg.hem.straling	0.45	0.77	0.33	0.24	0.18
luchttemperatuur		0.05	0.00	-0.35	-0.26
waterdampdruk			0.47	0.48	0.37
zicht				0.17	0.19
bewolking					0.24

Tabel 2: Korrelatiematrix; geeft de onderlinge correlatie aan tussen alle in het onderzoek betrokken factoren. Langgolvige hemelstraling in W/m^2 ; luchttemperatuur in $^{\circ}C$; partiële waterdampdruk in mb; zicht in km horizontaal zicht; bewolking in okta's bewolkingstraad; regen in wel of niet optreden van meer dan één uur durende regenval.

formule-type	empirische konstanten			r	sd
	(a)	(b)	(c)		
Swinb	0.4299×10^{-12}			0.806	14.7
Swinbk	0.2918×10^{-12}		114.21	0.806	12.4
Month	4.6361	202.00		0.801	12.5
Brunt	0.6811	0.0116		0.814	12.2
Bruts	1.2169			0.734	18.4
Brutsk	0.6912		153.61	0.734	14.2

totaal aantal dagen: 158
gemiddelde langgolvige hemelstraling: $354 W/m^2$ 20.8

Tabel 3a: Resultaat van de regressieanalyse van de gegevens van de dagen, waarop de partiële waterdampdruk om 12.00 uur niet hoger is dan 15 mb (ongeveer overeenkomend met het droge seizoen).

formule-type	empirische konstanten			r	sd
	(a)	(b)	(c)		
Swinb	0.4811×10^{-12}			0.730	18.9
Swinbk	0.1655×10^{-12}		260.17	0.730	8.3
Month	2.6157	310.35		0.729	8.3
Brunt	0.6180	0.0365		0.755	10.2
Bruts	1.1465			0.738	10.1
brutsk	0.6926		156.92	0.738	8.2

totaal aantal dagen: 203
gemiddelde langgolvige hemelstraling: $396 W/m^2$ 12.1

Tabel 3b: Resultaat van de regressieanalyse van de gegevens van de dagen, waarop de partiële waterdampdruk om 12.00 uur hoger is dan 15 mb (ongeveer overeenkomend met het regenseizoen).

formule-type	empirische konstanten			r	sd
	(a)	(b)	(c)		
Swinb	0.4401×10^{-12}			0.732	20.2
Swinbk	0.3752×10^{-12}		54.34	0.732	19.0
Month	0.0087	165.04		0.730	19.0
Brunt	0.6270	0.0320		0.910	12.2
Bruts	1.1876			0.893	19.0
Brutsk	0.7545		134.85	0.893	13.1

totaal aantal dagen: 196
gemiddelde langgolvige hemelstraling: $307 W/m^2$ 20.0

Tabel 4: Resultaat van de regressieanalyse van de gegevens van de dagen, waarop zich geen lage bewolking voordoet.

formule-type	empirische konstanten			r	sd
	(a)	(b)	(c)		
Swinb	0.4537×10^{-12}			0.519	25.4
Swinbk	0.2725×10^{-12}		150.53	0.519	23.0
Month	4.3938	230.28		0.521	23.1
Brunt	0.6188	0.0355		0.910	11.0
Bruts	1.1749			0.904	18.0
Brutsk	0.7456		138.31	0.904	11.0

totaal aantal dagen: 313
gemiddelde langgolvige hemelstraling: $376 W/m^2$ 27.5

Tabel 5: Resultaat van de regressieanalyse van de gegevens van de dagen, waarop geen regen is gevallen of een regenbui, die minder dan één uur duurde.

formule-type	empirische konstanten			r	sd
	(a)	(b)	(c)		
Swinb	0.4420×10^{-12}			0.810	18.0
Swinbk	0.3699×10^{-12}		59.81	0.810	18.2
Month	5.8470	172.24		0.801	18.0
Brunt	0.6290	0.0329		0.923	12.0
Bruts	1.2013			0.914	18.3
Brutsk	0.8213		116.31	0.914	12.0

totaal aantal dagen: 104
gemiddelde langgolvige hemelstraling: $364 W/m^2$ 30.0

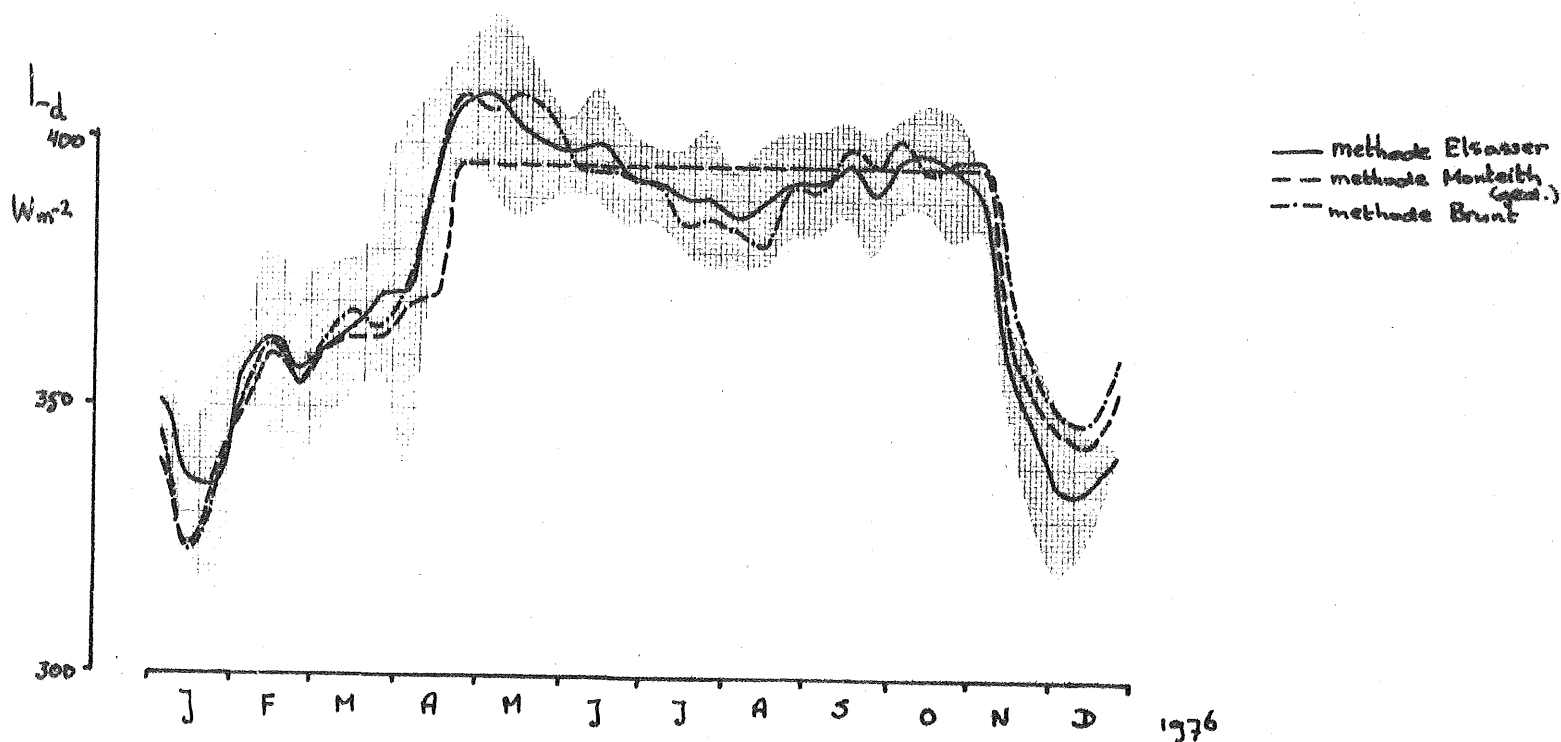
Tabel 6a: Resultaat van de regressieanalyse van de gegevens van de dagen, waarop het zicht slecht is (horizontaal zicht minder dan 15 km).

formule-type	empirische konstanten			r	sd
	(a)	(b)	(c)		
Swinb	0.4654×10^{-12}			0.244	30.0
Swinbk	0.1100×10^{-12}		292.91	0.244	21.7
Month	1.7510	325.82		0.245	21.7
Brunt	0.6094	0.0379		0.874	11.5
Bruts	1.1014			0.884	10.0
Brutsk	0.7026		152.02	0.884	10.4

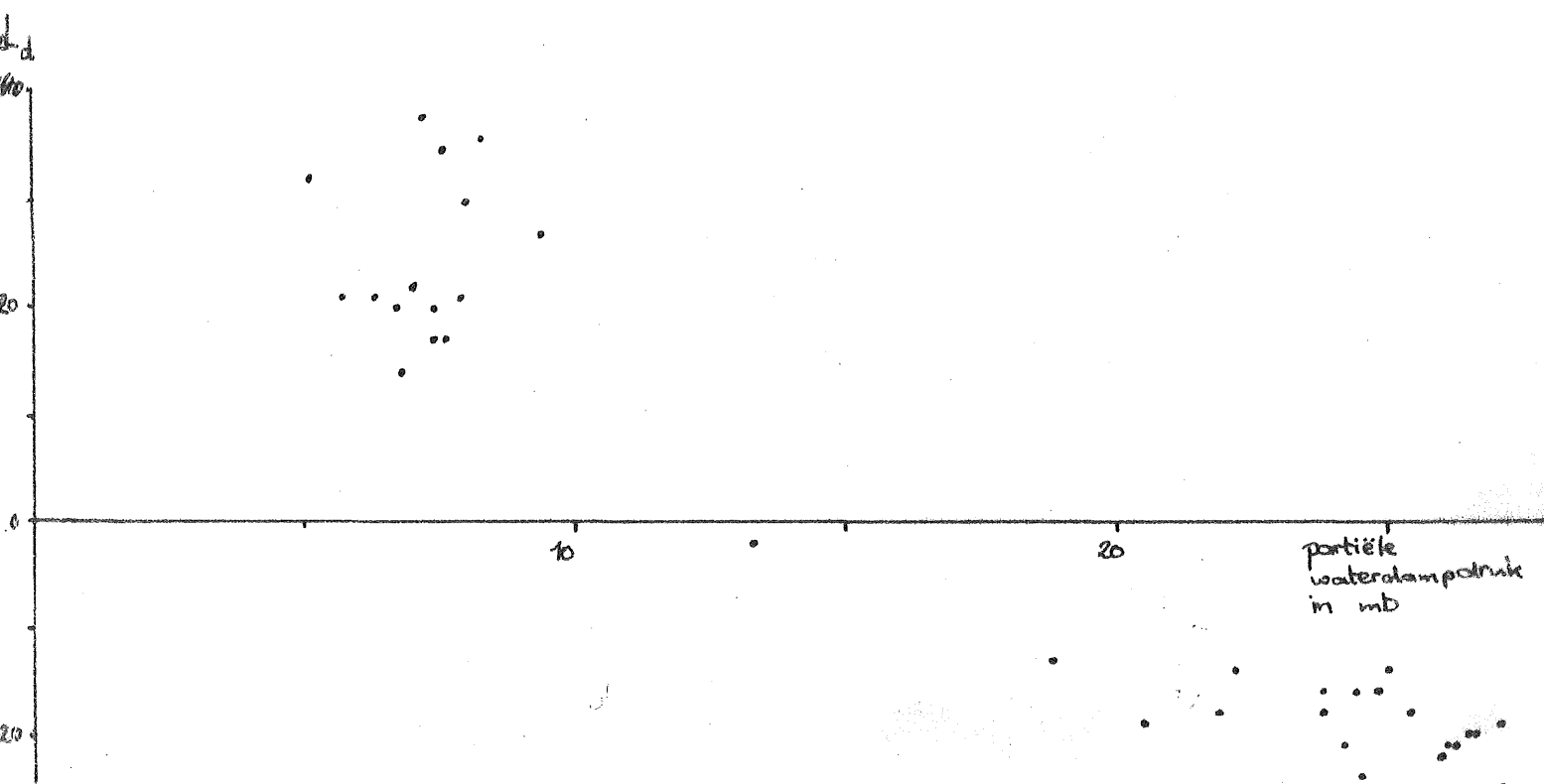
totaal aantal dagen: 257
gemiddelde langgolvige hemelstraling: $383 W/m^2$ 22.3

Tabel 6b: idem als 6a voor dagen met goed zicht (15 tot meer dan 30 km horizontaal zicht)

Br: 3a,b: 0,75 4 : 0,9 ??



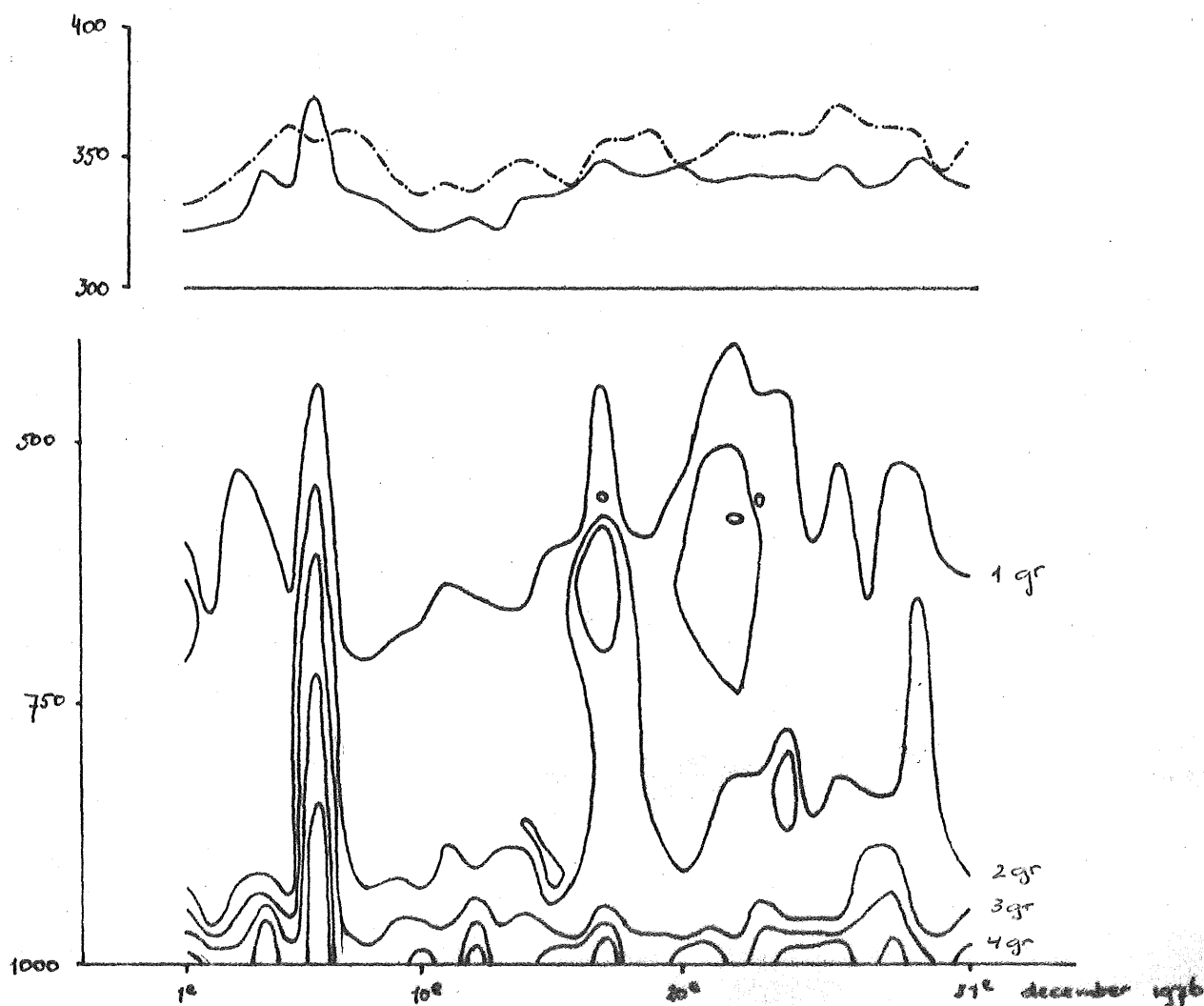
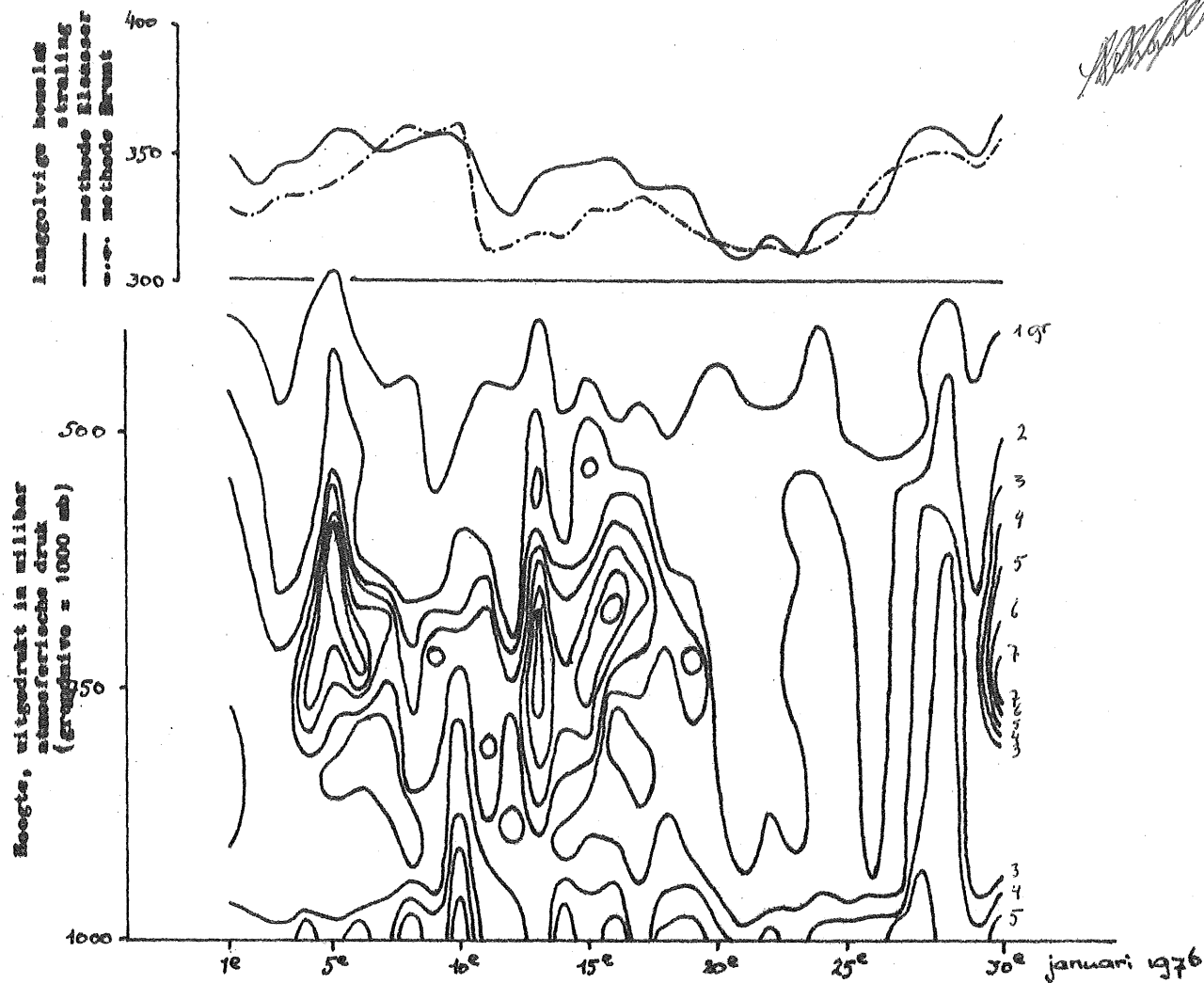
Figuur 5: Het verloop van de langgolvlige hemelstraling in 1976 volgens de methoden van Elsasser, Monteith (gedeeltelijk) en Brunt, weergegeven mbv tien-dagen-gemiddelden. Het geruite gedeelte geeft de spreiding aan in de volgens de methode Elsasser berekende L_d .



Figuur 6: De relatie tussen de partiële waterdampdruk e en het verschil ΔL_d tussen de met de formule van Swinbank berekende langgolvlige hemelstraling en die berekend mbv de Elsasser-kaart.

Swinbank - El. of 34 - Swinbank?

Figuur 7: Het verloop van het vochtprofiel gedurende de maanden januari en december 1976. Tevens is voor deze maanden de langgolvlige hemelstraling gegeven.



List of Internal Reports of Department of Theoretical Production Ecology:

No:

- 1 D. Barél, F. van Egmond, C. de Jonge, M.J.Frissel, M. Leistra, C.T. de Wit. 1969. Simulatie van de diffusie in lineaire, cilindrische en sferische systemen. Werkgroep: Simulatie van transport in grond en plant.
- 2 L. Evangelisti and R. van der Weert. 1971. A simulation model for transpiration of crops.
- 3 J.R. Lambert and F.W.T. Penning de Vries. 1973. Dynamics of water in the soil-plant-atmosphere system: a model named TROIKA.
- 4 M. Tollenaar. 1971. De fotosynthetische capaciteit.
- 4a J.N.M. Stricker. 1971. Berekening van de wortellengte per cm³ grond.
- 5 L Stroosnijder en H. van Keulen. 1972. Waterbeweging naar de plantenwortel.
- 6 Th.J.M. Blom and S.R. Troelstra. 1972. A simulation model of the combined transport of water and heat produced by a thermal gradient in porous media.
- 7a F.W.T. Penning de Vries and H.H. van Laar. 1972. Products and requirements of synthetic processes. Listing of the model and some test runs.
- 7b F.W.T. Penning de Vries and H.H. van Laar. 1973. Products, requirements and efficiency of biosynthesis. Listing of the model and some test runs.
- 8 M. Arbab. 1972. A CSMP-program for computing Thornthwaite's classification of climate.
- 9 P. A. Leffelaar. 1977. A theoretical approach to calculate the anaerobic volume fraction in aerated soil in view of denitrification.
- 10 L. van Loon and H. Wösten. 1979. A model to simulate evaporation of bare soils in arid regions.
- 11 C.J.T. Spitters. 1980. Simulating the vegetation dynamics in Sahelian pastures.
- 12 M. Buil. 1981. Een studie naar de invloed van een aantal diereigenschappen op de primaire en sekundaire productie in de Sahel.
- 13 D.J. Onstad. 1982. Application of dynamic programming techniques to optimize pest and disease control in winter wheat.