

*10/10/77 Mrs. (Mevrouw)*

KONINKLIJK NEDERLANDS  
METEOROLOGISCH INSTITUUT

D e B i l t

Verslagen

V - 294

H.A.R. de Bruin

Een computerprogramma voor het berekenen van de  
inkomende straling aan de rand van de atmosfeer  
per dag door een horizontaal oppervlak

De Bilt, 1977

Publikationsnummer: K.N.M.I. V-294 (M.O.)

U.D.C.: 551.521.11 :  
518.5

Een computerprogramma voor het berekenen van de  
inkomende straling aan de rand van de atmosfeer  
per dag door een horizontaal oppervlak

H.A.R. de Bruin

april 1977

Inleiding

Voor verschillende doeleinden - bijvoorbeeld voor het schatten van de globale straling uit de bewolgingsgraad of uit de relatieve zonneshijnduur, en voor klimaatstudies - wil men per dag de inkomende straling op een horizontaal oppervlak aan de rand van de atmosfeer kennen als functie van de plaats op aarde (breedte) en het dagnummer. Deze grootte zullen we in het navolgende  $R_a$  noemen. Van  $R_a$  bestaan tabellen, doch in de tijd van "X8-en" en "Burroughs B6700-en" is het werken met tabellen onhandig, te meer daar  $R_a$  van twee variabelen afhankelijk is. Enkele jaren geleden heb ik, in verband met het berekenen van de "openwaterverdamping volgens Penman", waarvoor de globale straling moet worden geschat, een computerprogramma voor het bepalen van  $R_a$  geschreven. Aangezien mij is gebleken dat ook anderen belangstelling voor dit programma hebben en het toch enig speurwerk vergt een dergelijk programma samen te stellen, leek het mij zinnig het in een memorandum vast te leggen.

Het programma levert als bijprodukten de declinatie en de lengte van de zon, alsmede de daglengte en de afstand aarde-zon als functie van de breedte en het dagnummer (1 januari = 1, etc.) voor een "gemiddeld jaar".

Het programma is voor meteorologische toepassingen geschreven. Daarom is geen grotere nauwkeurigheid voor  $R_a$  nagestreefd dan enkele procenten. Het programma is niet bruikbaar voor nauwkeurige astronomische berekeningen.

Gebruikte formules (zonder afleiding)

De zon wordt opgevat als een puntvormige lichtbron, die op gemiddelde afstand  $\bar{d}$  door een vlak loodrecht op de as aarde-zon een energieflex van  $S_0$  teweegbrengt. Voor  $S_0$  is de waarde  $1353 \text{ W/m}^2$ , d.i.  $1.94 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{min}$  aangehouden (zie Schuurmans [1]).

Op een zekere dag  $i$ , een zeker tijdstip  $t$  en op een zekere breedte  $\varphi$  geldt dat:

$$Q = S_0 \left( \frac{\bar{d}}{d} \right)^2 \cos Z \quad (1)$$

waarin  $Z$  de zenith-hoek is,  $d$  de afstand aarde-zon op dag  $i$  en  $Q$  de stralingsflux door een horizontaal oppervlak aan de rand van de atmosfeer.

Voor  $\cos Z$  kan worden geschreven:

$$\cos Z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos h \quad (2)$$

(zie bijv. Sellers [2]); hierin is  $\delta$  de declinatie van de zon en  $h$  de uurhoek.

Substitutie van (2) in (1) en integratie over 24 uur, rekening houdende met het feit dat  $Q = 0$  als de zon onder de horizon is, levert:

$$R_a = \frac{S_0}{\pi} \left( \frac{\bar{d}}{d} \right)^2 (H \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin H) \text{ W/m}^2 \quad (3)$$

$H$  is de halve daglengte (rad).

$R_a$  is uitgedrukt in  $\text{W/m}^2$ , m.a.w.  $R_a$  is de gemiddelde stralingsflux over 24 uur. Wil men de totale hoeveelheid inkomende straling op een bepaalde dag weten per  $\text{m}^2$ , dan moet  $R_a$  van die dag worden vermenigvuldigd met 86400, zijnde het aantal seconden in 24 uur.

Voor  $H$  geldt:

$$\cos H = - \text{tg } \varphi \text{ tg } \delta \quad (4)$$

Bij de toepassing van (4) moet rekening worden gehouden met het feit dat  $|\text{tg } \varphi \text{ tg } \delta| > 1$  kan worden. In die gevallen moet (4) worden vervangen door:

$$\begin{aligned} H = 0 & \quad \text{als} \quad - \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta > 1 & \quad (\text{dit is de poolnacht}) \\ \text{en } H = \pi & \quad \text{als} \quad - \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta < -1 & \quad (\text{dit is de pooldag}) \end{aligned}$$

De zon voert in de loop van het jaar een Kepler-beweging uit door de ecliptica. Het vlak van de ecliptica maakt een hoek  $\epsilon$  met het equatorvlak. Uit de boldriehoeksmeting volgt:

$$\sin \delta = \sin \epsilon \sin \iota \quad (5)$$

$\iota$  is de ware lengte van de zon gemeten vanaf het lengtepunt. (Zie Figuur 1).

Het is gebruikelijk de beweging van de aarde in haar ellipsvormige baan te beschrijven in termen van  $\nu$ , de ware anomalie,  $m$ , de gemiddelde anomalie,  $E$  de excentrische anomalie en  $e$  de excentriciteit van de aardbaan. (Zie Figuur 2).

De gemiddelde anomalie  $m$  is de hoek, die de aarde heeft afgelegd, indien men veronderstelt dat de baan cirkelvormig is en eenparig wordt doorlopen in de tijd van een volle periode  $T$  ( $= 365.24$  dagen).  $m$  wordt gemeten vanaf het perihelium, het punt waar de afstand aarde-zon minimaal is (d.i. op 3 januari). Per definitie geldt dus:

$$m = \frac{2\pi}{T} (t - t_0) \quad (6)$$

$t_0$  is het tijdstip waarop de zon in het perihelium staat.

De ware anomalie  $\nu$  is gedefinieerd met:

$$\nu = \iota - \iota_0 \quad (7)$$

waarbij  $\iota_0$  de lengte is van het lengtepunt gerekend vanaf het perihelium.

$\nu$  kan in de vorm van een reeksontwikkeling als functie van  $m$  worden geschreven als volgt:

$$\begin{aligned} \nu = m + & \left[ 4 \left( \frac{e}{2} \right) - 2 \left( \frac{e}{2} \right)^3 + \dots \right] \sin m + \\ & \left[ 5 \left( \frac{e}{2} \right)^2 - \frac{22}{3} \left( \frac{e}{2} \right)^4 + \dots \right] \sin 2 m + \\ + & \left[ \frac{26}{3} \left( \frac{e}{2} \right)^3 - \dots \right] \sin 3 m + \\ & \left[ \frac{103}{6} \left( \frac{e}{2} \right)^4 - \dots \right] \sin 4 m + \dots \end{aligned} \quad (8)$$

(zie bijv. D.H. Menzel [3] of Angot [4]).

Onder verwaarlozing van de derde en hogere machten van  $e$  geeft dit met (7):

$$l = m + l_0 + 2e \sin m + \frac{5}{4} e^2 \sin 2 m \quad (9)$$

Ten slotte is nog gebruik gemaakt van de relatie:

$$d = \bar{d} \frac{1-e^2}{1+e \cos \nu} \quad (10)$$

(zie bijv. [4]).

Voor de constanten  $l_0$ ,  $T$ ,  $\varepsilon$ ,  $t_0$  en  $e$  werden de volgende waarden gebruikt (strikt genomen zijn ze niet geheel constant):

$$\begin{aligned} l_0 &= -77^\circ 38' 34'' = -1.3551 \text{ rad} \\ T &= 365.24 \text{ dagen} \\ \varepsilon &= 23^\circ 27' \\ t_0 &= 2.5 \text{ dagen} \\ e &= 0.01675 \text{ rad} \end{aligned}$$

Op deze manier worden  $R_a$  en andere astronomische grootheden verkregen voor een "gemiddeld jaar". Geen rekening is gehouden met een schrikkeljaar, evenmin met factoren als nutatie van de aardas en de invloed van de maan op de beweging van de aarde om de zon.

Voor de berekening van de daglengte werd gecorrigeerd voor het niet puntvormig zijn van de zon en voor de horizontale refractie van het zonlicht door de atmosfeer. Voor de halve diameter van de zon werd 16' genomen, terwijl voor het effect van horizontale refractie een correctie van 34' werd ingevoerd. (Zie [8]).

H volgt dan uit (2) door te stellen dat  $h = H$  als  $Z = 90^{\circ}50'$ .

Deze correctie werd toegepast omdat anders op hoge breedten de daglengte in de zomer te veel werd onderschat.

Opgemerkt moet worden dat deze "gecorrigeerde" daglengte uiteraard niet is gebruikt bij de berekening van  $R_a$ , hiervoor is (4) toegepast.

### Het programma

Het programma is in bijlage I gegeven in de vorm van een procedure, die de lyrische naam ASTRO meekreeg. Buiten de procedure moeten worden gedeclareerd: RA, DELTA, LENGTE, AFSTAND en DAGLENGTE.

Aan deze "REAL's" worden voor gegeven breedte,  $\phi$ , en dagnummer,  $i$ , respectievelijk de waarde van  $R_a$  ( $W/m^2$ ), de declinatie en de lengte van de zon (graden), de afstand aarde-zon (AE) en de daglengte (uren) toegekend.

### Enige voorbeelden

In tabel Ia is  $R_a$  berekend met procedure ASTRO, gegeven voor een aantal dagen verspreid over het jaar en voor een aantal breedten op aarde. Ter vergelijking zijn in tabel Ib de waarden van  $R_a$  voor dezelfde dagen en breedten opgenomen, zoals die werden berekend door Milankovitch [5], omgerekend voor  $S_0 = 1353 W/m^2$ . Deze laatste tabel wordt veel toegepast, omdat deze is opgenomen in de Smithsonian Meteorological Tables [6]. Te zien is dat de verschillen tussen de tabellen Ia en Ib klein zijn.

In de tabellen IIa, IIb en IIc zijn de berekende waarden van  $R_a$  voor alle dagen van het jaar gegeven voor de voor Nederland van belang zijnde breedten 51, 52 en  $53^{\circ}$  NB. Opgemerkt moet worden, dat  $R_a$  voor 29 februari niet is opgenomen. In de voorkomende gevallen kan  $R_a$  voor deze dag het best worden geschat met het

gemiddelde van  $R_a$  voor 28 februari en 1 maart. Uit de tabellen II blijkt, dat de verschillen binnen Nederland alleen in de winter niet te verwaarlozen zijn.

In tabel III zijn de waarden van  $R_a$  gemiddeld per decade gegeven: a) berekend met de procedure ASTRO, en b) ontleend aan het nomogram van Rijkooft [7] (dat voor het berekenen van de openwaterverdamping volgens Penman is vervaardigd). Ook hier zijn de verschillen niet groot, hoewel ze soms toch tot 10% oplopen.

In tabel IV zijn de met ASTRO berekende waarden van de declinatie van de zon (in graden) voor steeds de eerste dag van elke kalendermaand vergeleken met die van de jaren 1950, 1974, 1975, 1976 en 1977, zoals die door de Nautische Jaarboeken [8] worden gegeven. De overeenstemming is goed te noemen.

In tabel V worden de berekende waarden van respectievelijk de lengte van de zon (in graden) en de afstand aarde-zon (AE) berekend met ASTRO, vergeleken met die gegeven door [5]. Ook nu is de overeenstemming goed.

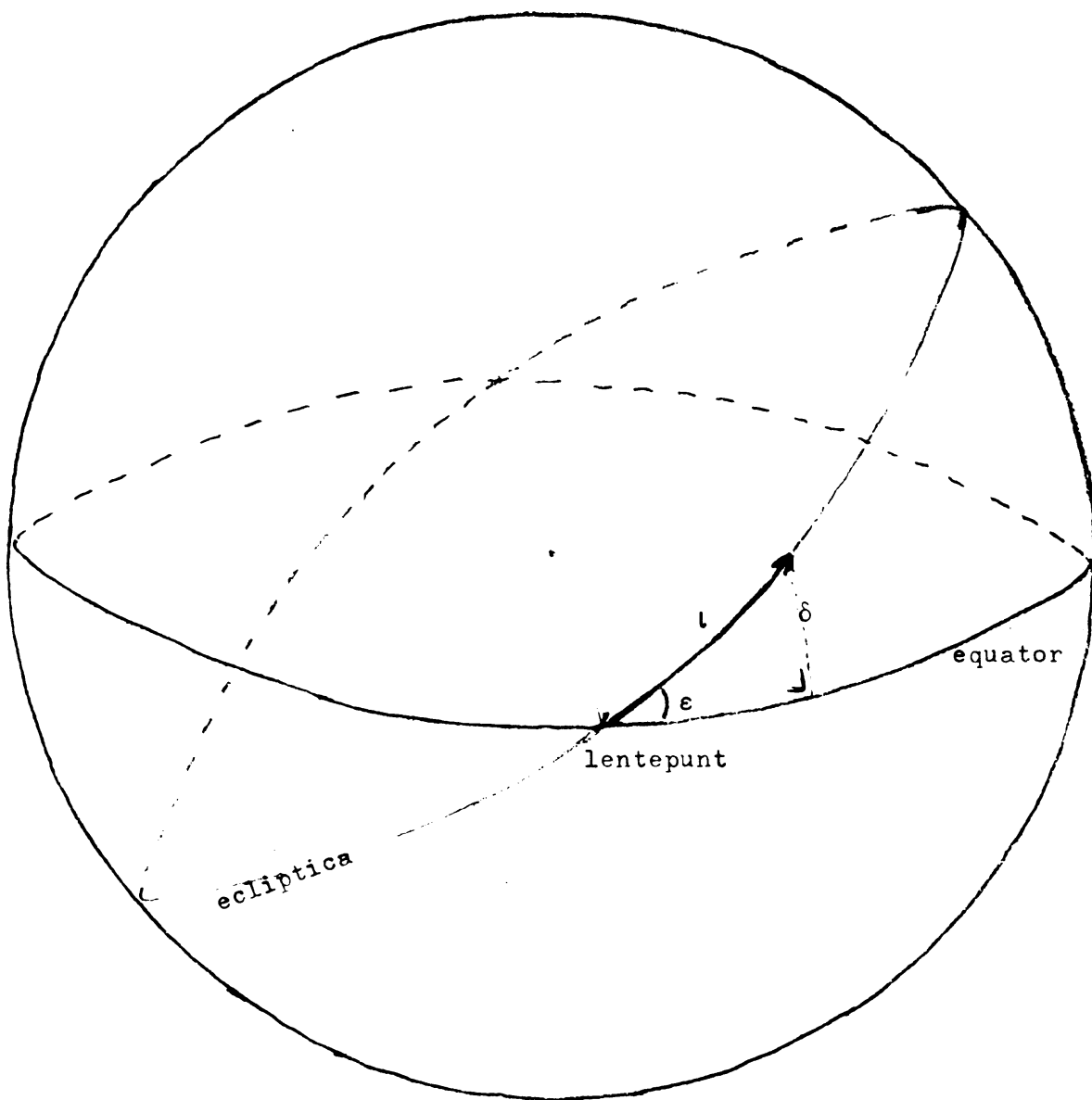
In tabel VI is de daglengte gegeven van een aantal dagen, regelmatig over het jaar verspreid, berekend met de procedure ASTRO voor  $52^\circ$  NB, tezamen met de bijbehorende waarden, zoals die door de nautische almanak worden vermeld voor 1977. De overeenstemming is zeer goed.

Tot slot is in tabel VII een dagnummer-kalender gegeven.

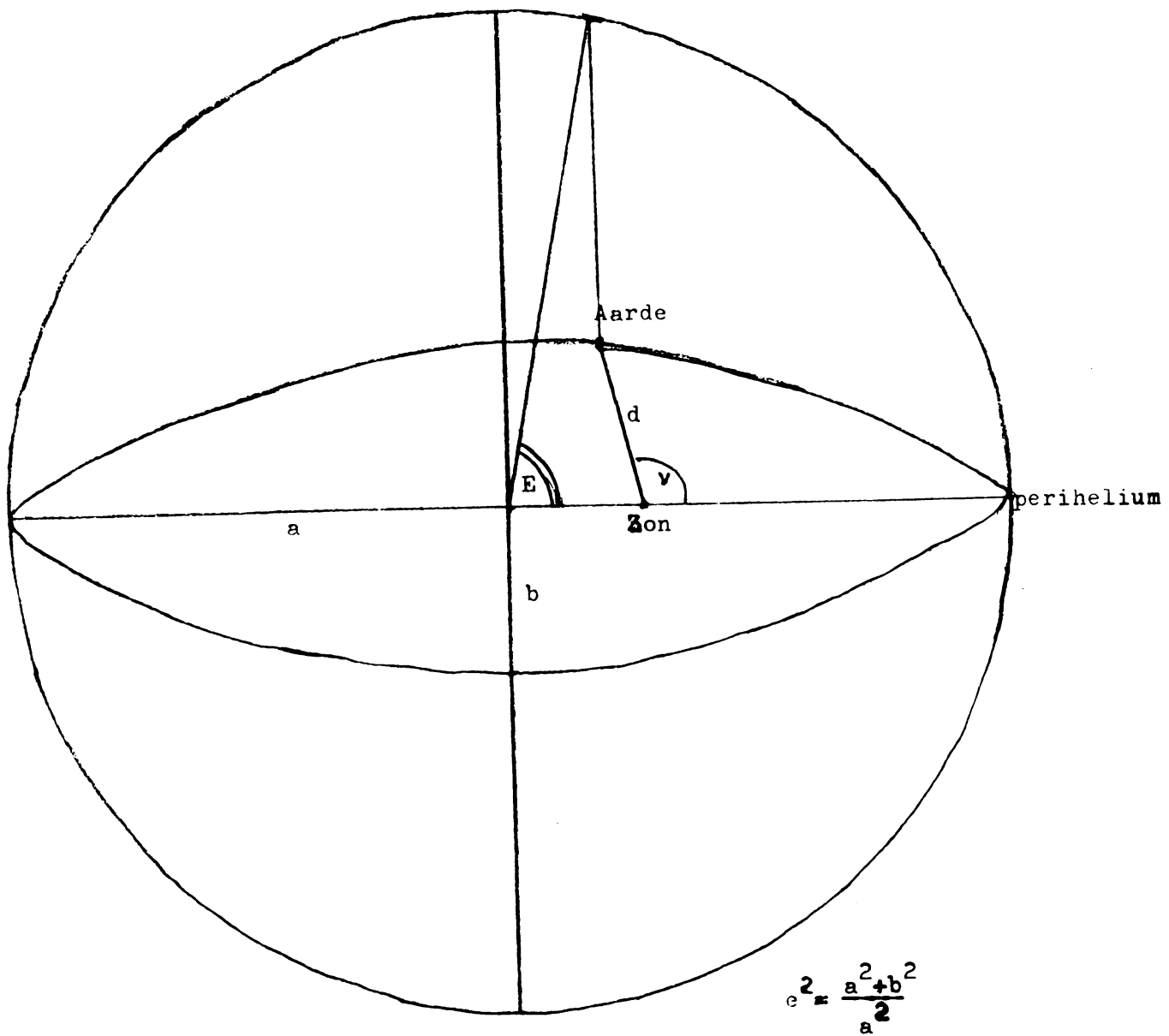


Literatuur

- [1] C.J.E. Schuurmans "De meteoroloog en de zonneconstante".  
Zenith 3, No. 11 (1976), pp. 358-363.
- [2] W.D. Sellers "Physical Climatology".  
Univ. of Chicago Press (1969), pp. 271.
- [3] D.H. Menzel "Fundamental Formulas of Physics",  
Vol. II, "Celestial Mechanics",  
Dover New York (1960), pp. 680-695.
- [4] M.A. Angot "Recherches Théorétiques sur la distribution  
de la chaleur à la surface du globe".  
Ann. Bur. Cent. Mét. Paris (1883),  
1<sup>ère</sup> partie, pp. B. 136-161.
- [5] M. Milankovitch "Mathematische Klimalehre", Berlin (1930),  
Handbuch der Klimatologie, Band I, Teil A.
- [6] R.J. List (ed.) "Smithsonian Meteorological Tables" (1958),  
Smithsonian Institution, Washington.
- [7] P.J. Rijkooort "Een nomogram voor de bepaling van de  
potentiële evapotranspiratie volgens de  
formule van Penman" (1954).  
KNMI Rapport III-143.
- [8] The Nautical Almanac Deze wordt ieder jaar uitgegeven door:  
Her Majesty's Stationary Office, London.



Figuur 1



Figuur 2

| Breedte | jan. feb. |     | feb. |     | mrt apr. |     | mei mei |     | juni juli |     | aug. sept. |     | okt. nov. |     | nov. dec. |     |     |
|---------|-----------|-----|------|-----|----------|-----|---------|-----|-----------|-----|------------|-----|-----------|-----|-----------|-----|-----|
|         | 13        | 4   | 26   | 4   | 21       | 13  | 6       | 29  | 22        | 15  | 8          | 31  | 23        | 16  | 8         | 30  | 22  |
| 90      | 0         | 0   | 0    | 0   | 1        | 208 | 375     | 484 | 521       | 482 | 369        | 204 | 3         | 0   | 0         | 0   | 0   |
| 80      | 0         | 0   | 3    | 3   | 76       | 207 | 370     | 476 | 513       | 475 | 363        | 203 | 76        | 3   | 0         | 0   | 0   |
| 70      | 0         | 12  | 62   | 62  | 149      | 256 | 364     | 453 | 490       | 433 | 358        | 252 | 149       | 63  | 11        | 0   | 0   |
| 60      | 55        | 71  | 133  | 133 | 217      | 339 | 393     | 452 | 474       | 430 | 337        | 305 | 215       | 133 | 70        | 35  | 24  |
| 50      | 99        | 140 | 202  | 202 | 279      | 356 | 421     | 464 | 479       | 462 | 416        | 351 | 276       | 201 | 138       | 99  | 83  |
| 40      | 170       | 210 | 257  | 257 | 333      | 394 | 441     | 471 | 480       | 458 | 436        | 389 | 329       | 265 | 207       | 169 | 155 |
| 30      | 239       | 275 | 324  | 324 | 376      | 420 | 450     | 457 | 472       | 465 | 445        | 414 | 371       | 321 | 272       | 239 | 226 |
| 20      | 305       | 335 | 372  | 372 | 408      | 434 | 448     | 453 | 453       | 450 | 443        | 428 | 402       | 368 | 331       | 304 | 293 |
| 10      | 364       | 385 | 409  | 409 | 427      | 435 | 433     | 427 | 423       | 424 | 429        | 429 | 421       | 404 | 331       | 362 | 355 |
| 0       | 414       | 425 | 434  | 434 | 434      | 423 | 406     | 390 | 382       | 389 | 402        | 418 | 428       | 428 | 421       | 412 | 408 |
| -10     | 453       | 453 | 445  | 445 | 427      | 399 | 368     | 343 | 333       | 341 | 364        | 394 | 421       | 440 | 449       | 451 | 452 |
| -20     | 481       | 469 | 445  | 445 | 408      | 383 | 319     | 237 | 275       | 235 | 317        | 359 | 401       | 438 | 464       | 478 | 484 |
| -30     | 496       | 472 | 431  | 431 | 375      | 315 | 263     | 225 | 211       | 224 | 261        | 312 | 370       | 424 | 457       | 494 | 504 |
| -40     | 500       | 462 | 404  | 404 | 332      | 260 | 200     | 160 | 145       | 159 | 199        | 257 | 327       | 397 | 458       | 497 | 513 |
| -50     | 493       | 441 | 366  | 366 | 279      | 197 | 133     | 94  | 80        | 93  | 133        | 195 | 274       | 359 | 437       | 491 | 512 |
| -60     | 460       | 411 | 317  | 317 | 216      | 129 | 67      | 33  | 23        | 33  | 68         | 128 | 213       | 311 | 407       | 479 | 506 |
| -70     | 453       | 399 | 253  | 253 | 148      | 61  | 11      | 0   | 0         | 0   | 11         | 60  | 145       | 257 | 378       | 481 | 523 |
| -80     | 506       | 396 | 213  | 213 | 75       | 3   | 0       | 0   | 0         | 0   | 0          | 3   | 73        | 206 | 394       | 504 | 549 |
| -90     | 514       | 392 | 213  | 213 | 0        | 1   | 0       | 1   | 0         | 0   | 0          | 0   | 0         | 206 | 390       | 512 | 556 |

Tabel Ia  $R_a$  ( $W/m^2$ ) berekend met procedure ASTRO.

| breedte | jan.<br>13 | feb.<br>4 | feb.<br>26 | mr̄t<br>21 | apr.<br>13 | mei<br>6 | mei<br>29 | juni<br>22 | juli<br>15 | aug.<br>8 | aug.<br>31 | sept.<br>23 | okt.<br>16 | nov.<br>8 | nov.<br>30 | dec.<br>22 |
|---------|------------|-----------|------------|------------|------------|----------|-----------|------------|------------|-----------|------------|-------------|------------|-----------|------------|------------|
| 90°     | -          | -         | -          | -          | 205        | 374      | 484       | 522        | 482        | 371       | 203        | -           | -          | -         | -          | -          |
| 80      | -          | -         | 3          | 75         | 205        | 368      | 477       | 514        | 475        | 365       | 203        | 74          | 3          | -         | -          | -          |
| 70      | -          | 12        | 63         | 149        | 254        | 363      | 455       | 490        | 453        | 359       | 251        | 147         | 62         | 12        | -          | -          |
| 60      | 35         | 71        | 134        | 217        | 308        | 392      | 453       | 474        | 450        | 388       | 305        | 214         | 132        | 71        | 35         | 24         |
| 50      | 99         | 140       | 203        | 279        | 355        | 420      | 464       | 479        | 462        | 416       | 351        | 275         | 201        | 139       | 99         | 85         |
| 40      | 170        | 210       | 268        | 332        | 391        | 441      | 471       | 480        | 469        | 437       | 387        | 328         | 264        | 208       | 169        | 154        |
| 30      | 239        | 275       | 325        | 375        | 419        | 450      | 469       | 472        | 465        | 446       | 415        | 371         | 321        | 273       | 238        | 226        |
| 20      | 305        | 335       | 373        | 407        | 433        | 447      | 453       | 453        | 451        | 444       | 428        | 403         | 368        | 332       | 304        | 293        |
| 10      | 364        | 385       | 409        | 427        | 435        | 433      | 427       | 423        | 425        | 429       | 430        | 422         | 405        | 382       | 362        | 355        |
| 0       | 414        | 425       | 434        | 434        | 423        | 406      | 390       | 383        | 388        | 402       | 418        | 429         | 429        | 422       | 412        | 408        |
| -10     | 453        | 453       | 446        | 427        | 399        | 368      | 343       | 333        | 341        | 365       | 394        | 422         | 441        | 449       | 451        | 452        |
| -20     | 481        | 469       | 445        | 407        | 363        | 320      | 287       | 275        | 286        | 317       | 359        | 403         | 439        | 465       | 479        | 484        |
| -30     | 497        | 471       | 430        | 375        | 317        | 263      | 225       | 211        | 224        | 261       | 313        | 371         | 425        | 467       | 494        | 504        |
| -40     | 500        | 462       | 401        | 332        | 261        | 200      | 159       | 144        | 159        | 198       | 258        | 328         | 397        | 457       | 498        | 513        |
| -50     | 493        | 440       | 364        | 279        | 198        | 134      | 94        | 80         | 93         | 133       | 196        | 275         | 360        | 437       | 491        | 512        |
| -60     | 481        | 410       | 316        | 217        | 130        | 68       | 33        | 23         | 33         | 67        | 129        | 214         | 312        | 407       | 478        | 507        |
| -70     | 484        | 380       | 261        | 149        | 62         | 11       | -         | -          | -          | 11        | 61         | 147         | 258        | 377       | 481        | 524        |
| -80     | 507        | 386       | 210        | 75         | 3          | -        | -         | -          | -          | -         | 3          | 74          | 208        | 383       | 504        | 548        |
| -90     | 515        | 392       | 210        | -          | -          | -        | -         | -          | -          | -         | -          | -           | 208        | 388       | 512        | 557        |

Tabel Ib  $R_a$  ( $w/m^2$ ) ontleend aan Milankovich [5].

|    | jan. | feb. | mrt | apr. | mei | juni | juli | aug. | sept. | okt. | nov. | dec. |
|----|------|------|-----|------|-----|------|------|------|-------|------|------|------|
| 1  | 82   | 126  | 205 | 312  | 405 | 467  | 475  | 439  | 344   | 243  | 148  | 91   |
| 2  | 82   | 128  | 208 | 315  | 408 | 468  | 475  | 427  | 340   | 240  | 146  | 90   |
| 3  | 83   | 131  | 212 | 319  | 411 | 469  | 474  | 425  | 337   | 236  | 143  | 89   |
| 4  | 84   | 133  | 215 | 322  | 413 | 471  | 473  | 423  | 334   | 233  | 141  | 88   |
| 5  | 84   | 135  | 219 | 325  | 415 | 471  | 473  | 420  | 331   | 230  | 138  | 87   |
| 6  | 85   | 138  | 222 | 329  | 419 | 472  | 472  | 418  | 327   | 227  | 136  | 86   |
| 7  | 86   | 140  | 225 | 332  | 421 | 473  | 471  | 416  | 324   | 223  | 133  | 85   |
| 8  | 87   | 143  | 228 | 335  | 425 | 474  | 470  | 413  | 321   | 220  | 131  | 84   |
| 9  | 88   | 145  | 232 | 339  | 426 | 475  | 469  | 411  | 318   | 217  | 129  | 83   |
| 10 | 89   | 148  | 235 | 342  | 428 | 475  | 468  | 408  | 314   | 213  | 127  | 83   |
| 11 | 90   | 151  | 239 | 345  | 430 | 476  | 466  | 405  | 311   | 210  | 124  | 82   |
| 12 | 91   | 154  | 242 | 349  | 433 | 476  | 465  | 403  | 308   | 207  | 122  | 81   |
| 13 | 93   | 156  | 246 | 352  | 435 | 477  | 464  | 400  | 304   | 204  | 120  | 81   |
| 14 | 94   | 159  | 249 | 355  | 437 | 477  | 462  | 397  | 301   | 201  | 118  | 80   |
| 15 | 95   | 162  | 253 | 358  | 439 | 478  | 461  | 395  | 297   | 197  | 116  | 80   |
| 16 | 97   | 165  | 256 | 362  | 441 | 478  | 460  | 392  | 294   | 194  | 114  | 80   |
| 17 | 98   | 168  | 261 | 365  | 443 | 478  | 458  | 389  | 291   | 191  | 112  | 79   |
| 18 | 99   | 171  | 263 | 368  | 445 | 478  | 457  | 386  | 287   | 188  | 110  | 79   |
| 19 | 101  | 174  | 267 | 371  | 447 | 479  | 455  | 383  | 284   | 185  | 108  | 79   |
| 20 | 103  | 177  | 270 | 374  | 449 | 479  | 453  | 380  | 280   | 182  | 107  | 79   |
| 21 | 104  | 180  | 274 | 377  | 451 | 479  | 452  | 377  | 277   | 179  | 105  | 79   |
| 22 | 106  | 183  | 277 | 381  | 452 | 479  | 450  | 375  | 274   | 176  | 103  | 79   |
| 23 | 108  | 186  | 281 | 383  | 454 | 479  | 448  | 372  | 270   | 173  | 102  | 79   |
| 24 | 110  | 189  | 284 | 386  | 456 | 478  | 446  | 369  | 267   | 170  | 100  | 79   |
| 25 | 111  | 192  | 288 | 389  | 457 | 478  | 444  | 366  | 263   | 167  | 99   | 79   |
| 26 | 113  | 195  | 291 | 392  | 459 | 478  | 442  | 362  | 260   | 165  | 97   | 79   |
| 27 | 115  | 199  | 295 | 394  | 460 | 478  | 440  | 359  | 257   | 162  | 96   | 79   |
| 28 | 117  | 202  | 298 | 397  | 462 | 477  | 438  | 356  | 253   | 159  | 94   | 80   |
| 29 | 119  |      | 301 | 400  | 463 | 477  | 436  | 353  | 250   | 156  | 93   | 80   |
| 30 | 122  |      | 305 | 403  | 464 | 476  | 434  | 350  | 247   | 154  | 92   | 80   |
| 31 | 124  |      | 308 | 465  | 465 | 432  | 432  | 347  | 151   | 151  | 91   | 81   |

Tabel IIA  $R_a$  ( $W/m^2$ ,  $51^\circ$  NB).

|    | jan. | feb. | mrt | apr. | mei | juni | juli | aug. | sept. | okt. | nov. | dec. |
|----|------|------|-----|------|-----|------|------|------|-------|------|------|------|
| 1  | 75   | 119  | 193 | 307  | 403 | 466  | 475  | 428  | 339   | 237  | 141  | 84   |
| 2  | 76   | 121  | 202 | 310  | 405 | 467  | 474  | 425  | 336   | 234  | 139  | 83   |
| 3  | 76   | 124  | 205 | 314  | 408 | 468  | 473  | 423  | 333   | 230  | 136  | 82   |
| 4  | 77   | 126  | 203 | 317  | 411 | 469  | 473  | 421  | 329   | 227  | 134  | 81   |
| 5  | 78   | 128  | 212 | 320  | 413 | 470  | 472  | 419  | 326   | 223  | 131  | 80   |
| 6  | 78   | 131  | 215 | 324  | 415 | 471  | 471  | 416  | 323   | 220  | 129  | 79   |
| 7  | 79   | 133  | 219 | 327  | 418 | 472  | 470  | 413  | 319   | 217  | 126  | 78   |
| 8  | 80   | 136  | 222 | 331  | 421 | 473  | 469  | 410  | 316   | 213  | 124  | 77   |
| 9  | 81   | 139  | 225 | 334  | 423 | 474  | 458  | 408  | 313   | 210  | 122  | 77   |
| 10 | 82   | 141  | 229 | 338  | 426 | 475  | 467  | 405  | 309   | 207  | 120  | 76   |
| 11 | 83   | 144  | 232 | 341  | 428 | 475  | 465  | 403  | 306   | 204  | 117  | 75   |
| 12 | 85   | 146  | 236 | 344  | 430 | 476  | 464  | 400  | 302   | 200  | 115  | 75   |
| 13 | 86   | 149  | 239 | 348  | 433 | 476  | 463  | 397  | 299   | 197  | 113  | 74   |
| 14 | 87   | 152  | 243 | 351  | 435 | 477  | 461  | 394  | 295   | 194  | 111  | 74   |
| 15 | 88   | 155  | 246 | 354  | 437 | 477  | 460  | 391  | 292   | 191  | 109  | 73   |
| 16 | 90   | 158  | 250 | 357  | 439 | 477  | 458  | 389  | 289   | 188  | 107  | 73   |
| 17 | 91   | 161  | 253 | 361  | 441 | 478  | 457  | 386  | 285   | 184  | 105  | 73   |
| 18 | 93   | 164  | 257 | 364  | 443 | 478  | 455  | 383  | 282   | 181  | 103  | 72   |
| 19 | 94   | 167  | 261 | 367  | 445 | 478  | 454  | 380  | 278   | 178  | 102  | 72   |
| 20 | 96   | 170  | 264 | 370  | 447 | 478  | 452  | 377  | 275   | 175  | 100  | 72   |
| 21 | 97   | 173  | 269 | 373  | 449 | 478  | 450  | 374  | 271   | 172  | 98   | 72   |
| 22 | 99   | 176  | 271 | 376  | 451 | 478  | 448  | 371  | 268   | 169  | 96   | 72   |
| 23 | 101  | 179  | 273 | 379  | 453 | 478  | 447  | 368  | 264   | 166  | 95   | 72   |
| 24 | 103  | 182  | 275 | 382  | 454 | 478  | 445  | 365  | 261   | 163  | 93   | 72   |
| 25 | 105  | 185  | 282 | 385  | 456 | 478  | 443  | 362  | 258   | 161  | 92   | 72   |
| 26 | 106  | 189  | 285 | 388  | 458 | 477  | 441  | 358  | 254   | 158  | 90   | 72   |
| 27 | 108  | 192  | 289 | 391  | 459 | 477  | 439  | 355  | 251   | 155  | 89   | 73   |
| 28 | 110  | 195  | 292 | 394  | 461 | 477  | 436  | 352  | 247   | 152  | 88   | 73   |
| 29 | 112  |      | 296 | 397  | 462 | 476  | 434  | 349  | 244   | 149  | 86   | 73   |
| 30 | 115  |      | 300 | 400  | 463 | 476  | 432  | 346  | 240   | 147  | 85   | 74   |
| 31 | 117  |      | 303 |      | 465 | 480  | 430  | 342  |       | 144  |      | 74   |

Tabel IIb  $R_a$  ( $W/m^2$ ),  $52^\circ NB.$

|    | jan. | feb. | mrt | apr. | mei | juni | juli | aug. | sept. | okt. | nov. | dec. |
|----|------|------|-----|------|-----|------|------|------|-------|------|------|------|
| 1  | 68   | 112  | 192 | 301  | 399 | 455  | 474  | 425  | 335   | 231  | 134  | 77   |
| 2  | 59   | 114  | 195 | 305  | 402 | 466  | 474  | 423  | 331   | 227  | 132  | 76   |
| 3  | 70   | 117  | 193 | 308  | 405 | 467  | 473  | 421  | 328   | 224  | 129  | 75   |
| 4  | 70   | 119  | 202 | 312  | 408 | 468  | 472  | 418  | 325   | 220  | 127  | 74   |
| 5  | 71   | 121  | 205 | 315  | 410 | 470  | 471  | 416  | 321   | 217  | 124  | 73   |
| 6  | 72   | 124  | 206 | 319  | 413 | 470  | 470  | 413  | 318   | 214  | 122  | 72   |
| 7  | 73   | 125  | 212 | 322  | 416 | 471  | 469  | 410  | 314   | 210  | 120  | 72   |
| 8  | 74   | 129  | 215 | 326  | 418 | 472  | 468  | 408  | 311   | 207  | 117  | 71   |
| 9  | 75   | 131  | 219 | 329  | 421 | 473  | 467  | 405  | 307   | 204  | 115  | 70   |
| 10 | 76   | 134  | 222 | 333  | 423 | 474  | 466  | 402  | 304   | 200  | 113  | 69   |
| 11 | 77   | 137  | 225 | 336  | 426 | 475  | 464  | 400  | 301   | 197  | 110  | 69   |
| 12 | 78   | 139  | 229 | 340  | 428 | 475  | 463  | 397  | 297   | 194  | 108  | 68   |
| 13 | 79   | 142  | 233 | 343  | 430 | 475  | 462  | 394  | 294   | 190  | 106  | 68   |
| 14 | 80   | 145  | 237 | 346  | 433 | 476  | 460  | 391  | 290   | 187  | 104  | 67   |
| 15 | 82   | 148  | 240 | 350  | 435 | 477  | 459  | 388  | 287   | 184  | 102  | 67   |
| 16 | 83   | 151  | 244 | 353  | 437 | 477  | 457  | 385  | 283   | 181  | 100  | 66   |
| 17 | 84   | 154  | 247 | 356  | 439 | 477  | 456  | 382  | 280   | 178  | 98   | 66   |
| 18 | 86   | 157  | 251 | 359  | 441 | 477  | 454  | 379  | 276   | 175  | 97   | 66   |
| 19 | 87   | 159  | 254 | 363  | 443 | 478  | 452  | 376  | 273   | 171  | 95   | 66   |
| 20 | 89   | 163  | 258 | 366  | 445 | 478  | 451  | 373  | 269   | 168  | 93   | 66   |
| 21 | 91   | 156  | 262 | 369  | 447 | 478  | 449  | 370  | 266   | 165  | 91   | 66   |
| 22 | 92   | 162  | 265 | 372  | 449 | 478  | 447  | 367  | 262   | 162  | 90   | 65   |
| 23 | 94   | 172  | 269 | 376  | 451 | 478  | 445  | 364  | 259   | 159  | 88   | 66   |
| 24 | 96   | 175  | 272 | 379  | 453 | 477  | 443  | 361  | 255   | 157  | 87   | 66   |
| 25 | 93   | 178  | 275 | 382  | 455 | 477  | 441  | 358  | 252   | 154  | 85   | 66   |
| 26 | 100  | 182  | 280 | 385  | 456 | 477  | 439  | 354  | 248   | 151  | 84   | 66   |
| 27 | 101  | 185  | 283 | 388  | 458 | 476  | 437  | 351  | 245   | 148  | 82   | 66   |
| 28 | 103  | 188  | 287 | 391  | 459 | 476  | 435  | 348  | 241   | 145  | 81   | 67   |
| 29 | 106  |      | 290 | 394  | 461 | 475  | 432  | 345  | 238   | 142  | 80   | 67   |
| 30 | 108  |      | 294 | 397  | 462 | 475  | 430  | 341  | 234   | 140  | 79   | 67   |
| 31 | 110  |      | 298 | 404  | 464 |      | 428  | 339  |       | 137  |      | 68   |

Tabel IIC  $R_a$  ( $W/m^2$ ), 53° NB.



|      |     | ASTRO | Nomogram<br>RIJKOORT |       |     | ASTRO | Nomogram<br>RIJKOORT |
|------|-----|-------|----------------------|-------|-----|-------|----------------------|
| jan. | I   | 78    | 75                   | juli  | I   | 471   | 462                  |
|      | II  | 89    | 82                   |       | II  | 459   | 452                  |
|      | III | 107   | 96                   |       | III | 441   | 432                  |
| feb. | I   | 130   | 132                  | aug.  | I   | 417   | 398                  |
|      | II  | 157   | 170                  |       | II  | 390   | 370                  |
|      | III | 184   | 192                  |       | III | 358   | 350                  |
| mrt  | I   | 214   | 238                  | sept. | I   | 324   | 309                  |
|      | II  | 248   | 264                  |       | II  | 290   | 290                  |
|      | III | 285   | 295                  |       | III | 256   | 262                  |
| apr. | I   | 332   | 334                  | okt.  | I   | 222   | 213                  |
|      | II  | 356   | 363                  |       | II  | 189   | 184                  |
|      | III | 387   | 386                  |       | III | 158   | 160                  |
| mei  | I   | 414   | 426                  | nov.  | I   | 130   | 126                  |
|      | II  | 438   | 442                  |       | II  | 108   | 104                  |
|      | III | 457   | 459                  |       | III | 91    | 92                   |
| juni | I   | 471   | 478                  | dec.  | I   | 80    | 78                   |
|      | II  | 477   | 484                  |       | II  | 73    | 73                   |
|      | III | 477   | 484                  |       | III | 73    | 73                   |

Tabel III Decadegemiddelde waarde van  $R_a$  ( $W/m^2$ ).

|             | 1950    | 1974    | 1975    | 1976    | 1977    | ASTRO   |
|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1 januari   | -23°04' | -23°01' | -23°02' | -23°03' | -22°59' | -23°03' |
| 1 februari  | -17°19' | -17°08' | -17°12' | -17°16' | -17°03' | -17°14' |
| 1 maart     | -7°53'  | -7°37'  | -7°43'  | -7°26'  | -7°31'  | -7°46'  |
| 1 april     | 4°14'   | 4°30'   | 4°24'   | 4°42'   | 4°36'   | 4°22'   |
| 1 mei       | 14°50'  | 15°03'  | 14°58'  | 15°12'  | 15°08'  | 14°56'  |
| 1 juni      | 21°57'  | 22°03'  | 22°00'  | 22°07'  | 22°05'  | 22°00'  |
| 1 juli      | 23°10'  | 23°07'  | 23°08'  | 23°05'  | 23°06'  | 23°09'  |
| 1 augustus  | 18°14'  | 18°03'  | 18°06'  | 17°55'  | 17°59'  | 18°09'  |
| 1 september | 8°35'   | 8°19'   | 8°25'   | 8°08'   | 8°13'   | 8°28'   |
| 1 oktober   | -2°53'  | -3°09'  | -3°03'  | -3°21'  | -3°15'  | -3°00'  |
| 1 november  | -14°11' | -14°24' | -14°19' | -14°34' | -14°29' | -14°17' |
| 1 december  | -21°41' | -21°47' | -21°45' | -21°52' | -21°50' | -21°44' |

Tabel IV Declinatie van de zon 12 GMT (graden).

| Datum       | Lengte van de zon |            | Afstand zon-aarde (AE) |            |
|-------------|-------------------|------------|------------------------|------------|
|             | ASTRO             | Sm. tables | ASTRO                  | Sm. tables |
| 1 januari   | 280°19'           | 280°01'    | 0.98326                | 0.98324    |
| 1 februari  | 311°53'           | 311°34'    | 0.98536                | 0.98533    |
| 1 maart     | 340°09'           | 339°51'    | 0.99087                | 0.99084    |
| 1 april     | 11°01'            | 10°42'     | 0.99933                | 0.99928    |
| 1 mei       | 40°22'            | 40°04'     | 1.00765                | 1.00759    |
| 1 juni      | 70°15'            | 69°56'     | 1.01411                | 1.01405    |
| 1 juli      | 98°55'            | 98°36'     | 1.01672                | 1.01667    |
| 1 augustus  | 128°29'           | 128°11'    | 1.01498                | 1.01494    |
| 1 september | 158°18'           | 157°59'    | 1.00919                | 1.00917    |
| 1 oktober   | 187°33'           | 187°14'    | 1.00112                | 1.00114    |
| 1 november  | 218°19'           | 217°59'    | 0.99245                | 0.99249    |
| 1 december  | 248°32'           | 248°13'    | 0.98604                | 0.98600    |

Tabel V

| Datum       | ASTRO | Nautische Almanak<br>1977 |
|-------------|-------|---------------------------|
| 2 januari   | 7.9   | 7.9                       |
| 1 februari  | 9.1   | 9.1                       |
| 3 maart     | 11.0  | 11.0                      |
| 2 april     | 13.0  | 13.0                      |
| 2 mei       | 14.9  | 14.9                      |
| 1 juni      | 16.4  | 16.4                      |
| 1 juli      | 16.7  | 16.7                      |
| 3 augustus  | 15.4  | 15.4                      |
| 2 september | 13.6  | 13.6                      |
| 2 oktober   | 11.6  | 11.6                      |
| 1 november  | 9.7   | 9.7                       |
| 1 december  | 8.1   | 8.1                       |

Tabel VI      Daglengte (uren) voor 52° NB.

| jan. | febr. | maart | april | mei | juni | juli | aug. | sept. | okt. | nov. | dec. |
|------|-------|-------|-------|-----|------|------|------|-------|------|------|------|
| 1    | 32    | 60    | 91    | 121 | 152  | 182  | 213  | 244   | 274  | 305  | 335  |
| 2    | 33    | 61    | 92    | 122 | 153  | 183  | 214  | 245   | 275  | 306  | 336  |
| 3    | 34    | 62    | 93    | 123 | 154  | 184  | 215  | 246   | 276  | 307  | 337  |
| 4    | 35    | 63    | 94    | 124 | 155  | 185  | 216  | 247   | 277  | 308  | 338  |
| 5    | 36    | 64    | 95    | 125 | 156  | 186  | 217  | 248   | 278  | 309  | 339  |
| 6    | 37    | 65    | 96    | 126 | 157  | 187  | 218  | 249   | 279  | 310  | 340  |
| 7    | 38    | 66    | 97    | 127 | 158  | 188  | 219  | 250   | 280  | 311  | 341  |
| 8    | 39    | 67    | 98    | 128 | 159  | 189  | 220  | 251   | 281  | 312  | 342  |
| 9    | 40    | 68    | 99    | 129 | 160  | 190  | 221  | 252   | 282  | 313  | 343  |
| 10   | 41    | 69    | 100   | 130 | 161  | 191  | 222  | 253   | 283  | 314  | 344  |
| 11   | 42    | 70    | 101   | 131 | 162  | 192  | 223  | 254   | 284  | 315  | 345  |
| 12   | 43    | 71    | 102   | 132 | 163  | 193  | 224  | 255   | 285  | 316  | 346  |
| 13   | 44    | 72    | 103   | 133 | 164  | 194  | 225  | 256   | 286  | 317  | 347  |
| 14   | 45    | 73    | 104   | 134 | 165  | 195  | 226  | 257   | 287  | 318  | 348  |
| 15   | 46    | 74    | 105   | 135 | 166  | 196  | 227  | 258   | 288  | 319  | 349  |
| 16   | 47    | 75    | 106   | 136 | 167  | 197  | 228  | 259   | 289  | 320  | 350  |
| 17   | 48    | 76    | 107   | 137 | 168  | 198  | 229  | 260   | 290  | 321  | 351  |
| 18   | 49    | 77    | 108   | 138 | 169  | 199  | 230  | 261   | 291  | 322  | 352  |
| 19   | 50    | 78    | 109   | 139 | 170  | 200  | 231  | 262   | 292  | 323  | 353  |
| 20   | 51    | 79    | 110   | 140 | 171  | 201  | 232  | 263   | 293  | 324  | 354  |
| 21   | 52    | 80    | 111   | 141 | 172  | 202  | 233  | 264   | 294  | 325  | 355  |
| 22   | 53    | 81    | 112   | 142 | 173  | 203  | 234  | 265   | 295  | 326  | 356  |
| 23   | 54    | 82    | 113   | 143 | 174  | 204  | 235  | 266   | 296  | 327  | 357  |
| 24   | 55    | 83    | 114   | 144 | 175  | 205  | 236  | 267   | 297  | 328  | 358  |
| 25   | 56    | 84    | 115   | 145 | 176  | 206  | 237  | 268   | 298  | 329  | 359  |
| 26   | 57    | 85    | 116   | 146 | 177  | 207  | 238  | 269   | 299  | 330  | 360  |
| 27   | 58    | 86    | 117   | 147 | 178  | 208  | 239  | 270   | 300  | 331  | 361  |
| 28   | 59    | 87    | 118   | 148 | 179  | 209  | 240  | 271   | 301  | 332  | 362  |
| 29   |       | 88    | 119   | 149 | 180  | 210  | 241  | 272   | 302  | 333  | 363  |
| 30   |       | 89    | 120   | 150 | 181  | 211  | 242  | 273   | 303  | 334  | 364  |
| 31   |       | 90    |       | 151 | 181  | 212  | 243  |       | 304  |      | 365  |

Tabel VII Dagnummer-kalender (alleen voor gewone jaren).

```

PROCEDURE ASTRO(DAGNO,BREEDTE);
VALLE DAGNO,BREEDTE;
INTEGER DAGNO; REAL BREEDTE;
COMMENT BREEDTE IN GRADEN;
BEGIN
REAL PHI,PI,L,M,LO,TQ,DECL,H,E,T,E,A;

REAL I;
LABEL WEG;
PI:=3.14159;
PHI:=BREEDTE/360*2*PI;
I:=DAGNO-0.5;
LO:=-1.355122133;
TQ:=2.5;
E:=0.01675;
T:=365.24;
M:=(I-2.5)/T*2*PI;
L:=M+LO+2*E*SIN(M)+1.25*E**2*SIN(2*M);
DECL:=ARCSIN(0.397949*SIN(L));
B:=-TAN(PHI)*TAN(DECL);
IF B>1 THEN H:=0 ELSE IF B<-1 THEN H:=PI ELSE H:=ARCCOS(B);
IF H<0 THEN H:=*+PI;
A:=(1-E**2)/(1+E*COS(L-LQ));
RA:=1353*(SIN(PHI)*SIN(DECL)*H+SIN(H)*COS(PHI)*COS(DECL))/PI/A**2;
IF ABS(BREEDTE)=90 THEN GO WEG;
B:=(-0.01454390)/(COS(PHI)*COS(DECL))-TAN(PHI)*TAN(DECL);
WEG:
H:=IF B>1 THEN 0 ELSE IF B<-1 THEN PI ELSE ARCCOS(B);
IF H<0 THEN H:=*+PI;
LENGTE:=L*180/PI; AFSTAND:=A; DAGLENGTE:=24*H/PI;
DELTA:=DECL*360/(2*PI);
END ASTRO;

```

Bijlage I