

Natuurkunde met satellietfoto's

De opnamen van weersatellieten vormen tegenwoordig een belangrijk hulpmiddel bij het opstellen van weersverwachtingen. De meeste foto's zijn een lust voor het oog en blijven dat wanneer we ze met een „natuurkundige bril” bekijken.

In dit en een aantal volgende artikelen worden satellietfoto's vanuit een natuurkundige invalshoek besproken.

Twee typen weersatellieten

De foto's die op het KNMI en bij andere weerkundige diensten gebruikt worden zijn afkomstig van twee typen weersatellieten. De indeling berust op de baan die de satellieten volgen. De zogenaamde geostationaire satellieten bevinden zich boven een vast punt op de evenaar; zij volgen dus een baan in het vlak van de evenaar met een omloopsnelheid die gelijk is aan die van de aarde. Figuur 1 geeft een voorbeeld van een opname die gemaakt is door een geostationaire satelliet, in dit geval de Europese weersatelliet Meteosat 2. Het gezichtsveld van de satelliet is iets minder dan een halfrond.

Het tweede type satelliet wordt aangeduid als (quasi-)polair of zonsynchroon. Deze satellieten volgen een baan die over de poolstreken loopt en passeren een bepaald referentiepunt aan de evenaar elke dag op dezelfde zonnetijd. Daardoor komt de satelliet dagelijks om ongeveer dezelfde tijd over en worden aardoppervlak en bewolking op eenvolgende dagen op vergelijkbare wijze door de zon belicht. Polaire satellieten leveren foto's zoals die van figuur 2. Het opnamebereik is kleiner dan dat van geostationaire satellieten.

Baanhoogte

De hoogte van de satelliet boven het aardoppervlak kan berekend worden als de omlooptijd bekend is. We gaan er daarbij van uit dat de satelliet een cirkelbaan volgt. In het geval van weersatellieten is deze veronderstelling zeer reëel: bij een

cirkelbaan is de afstand satelliet-aardoppervlak constant, zodat de schaal van alle foto's gelijk is; daarom zal men steeds proberen de satelliet in een baan te krijgen die de cirkelvorm zo goed mogelijk benadert.

De middelpuntzoekende kracht die de satelliet in zijn cirkelbaan houdt wordt geleverd door de aantrekkingskracht van de aarde:

$$m\omega^2 r = \gamma \frac{mM}{r^2} \quad (1)$$

(symbolen: zie tabel 1).

Aan het aardoppervlak geldt:

$$\frac{\gamma M}{R^2} = g,$$

zodat (1) herschreven kan worden als

$$\omega^2 r = \frac{g R^2}{r^2}.$$

Hieruit volgt voor de afstand satelliet-middelpunt aarde:

$$r = \left(\frac{g R^2}{\Omega^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Voor geostationaire satellieten is de hoeksnelheid ω gelijk aan de omwentelingsnelheid Ω van de aarde; invullen in (2)

$$\text{geeft met } \Omega = \frac{2\pi}{T_a}$$

$$\text{voor } r = \left(\frac{g R^2}{\Omega^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

= 42342 km (= 6,64 aardstralen), zodat de hoogte van de satelliet boven het aardoppervlak $h = r - R = 35964$ km bedraagt.

Voor polaire satellieten kan de hoeksnelheid ω worden bepaald uit de door de satellietbeherende instantie opgegeven omlooptijd van 101 minuten volgens



$$\Omega = \frac{2\pi}{T_p}$$

We vinden dan $r = 1,13 R = 7187$ km, zodat $h = 809$ km.

De hoogte van de satelliet is voor het operationele gebruik een belangrijk gegeven. Zo is de levensduur van de satelliet groter naarmate hij hoger boven het aardoppervlak staat ten gevolge van een verminderde luchtweerstand. Tabel 2 geeft een aantal voorbeelden. Vanaf ca. 500 km is de technische levensduur gewoonlijk kleiner dan de in de tabel gegeven waarde, zodat dan andere overwegingen bij de keuze van de hoogte de doorslag geven. Op geringe hoogte verkrijgt men met dezelfde apparatuur een beter scheidend vermogen dan op grote hoogte. Verder is de hoogte van belang in verband met het gezichtsveld van de camera's of andere apparatuur in de satelliet; dit gezichtsveld is tevens het gebied waarin grondstations de door de satelliet uitgezonden gegevens kunnen ontvangen, een gevolg van de omkeerbaarheid van de stralengang van licht en andere elektromagnetische straling.

Gezichtsveld en ontvangstgebied

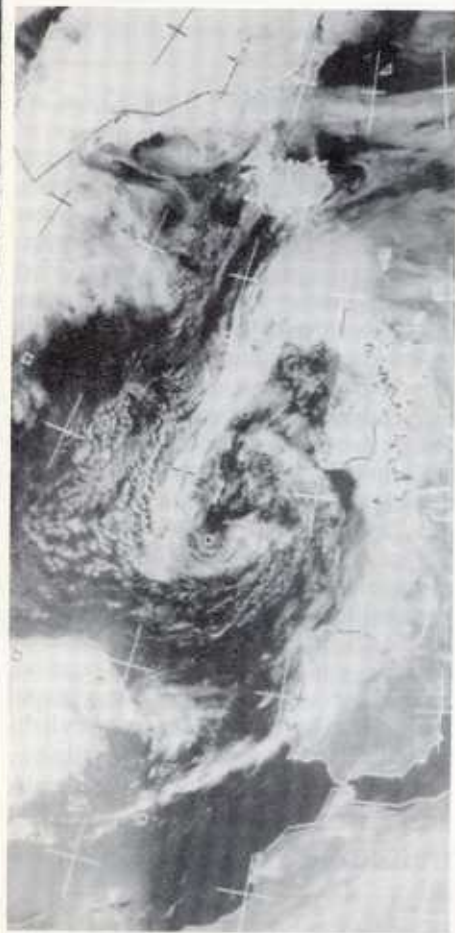
Het gezichtsveld van de satelliet kan bepaald worden met behulp van figuur 3. Voor een geostationaire satelliet boven de evenaar is φ de maximale breedte die kan worden waargenomen (atmosferische straalromming wordt buiten beschouwing gelaten.) Er geldt:

$$\cos \varphi = \frac{R}{R+h}$$

zodat $\varphi = 81^\circ$. De straal van de cirkel die het gezichtsveld begrenst is $b = R \sin \varphi = 6308$ km. Over het aardoppervlak gemeten bedraagt de diameter AB door het gezichtsveld echter

$$2 \left(\frac{\varphi 180}{\pi} \right) R$$

= 18106 km. De beeldhoek waaronder de camera van de satelliet moet waarnemen bedraagt $2\alpha = 18^\circ$ (zie figuur 3). Ter vergelijking: wanneer we vanuit de satelliet met een kleinbeeldcamera de aarde „full



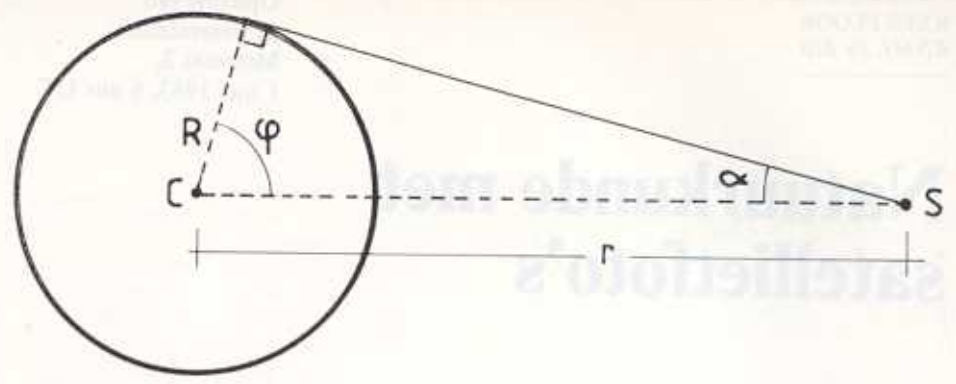
Figuur 1. Opname van de weersatelliet NOAA7, 5 mei 1983, 15.33 uur UT

disc" zouden willen fotograferen, kan de brandpuntafstand, die vereist is om de aarde beeldvullend op de dia of het negatief te krijgen, gevonden worden uit

$$\text{tg } \alpha = \frac{\frac{1}{2} a}{f}$$

waarbij $a = 24$ mm de kortste zijde van het filmformaat is. De vereiste brandpuntafstand bedraagt 79 mm, zodat een standaardlens of een lens voor portretfotografie geschikt zou zijn.

Het gezichtsveld van een polaire satelliet is veel kleiner: de straal van het gezichtsveld b bedraagt nu 2940 km en de afstand AB tussen de uiteinden van het beeld 6110 km. De satelliet ziet zijn gezichtsveld onder een hoek $2\alpha = 126^\circ$



Figuur 3. S: satelliet; C: middelpunt van de aarde; r, R, φ en α; zie Tabel 1

(uit: $\sin \alpha = \frac{R}{R+h}$; vergelijk figuur 3).

Een kleinbeeldcamera in de satelliet zou een brandpuntafstand van 6 mm moeten hebben, zodat een fish-eye lens vereist is. Het grote gezichtsveld en ontvangstgebied van de geostationaire satelliet maakt hem geschikt als hulpmiddel bij de meteorologische communicatie. Van deze toepassingsmogelijkheid wordt dan ook veel gebruik gemaakt. De polaire satellieten maken geen cirkelvormige plaatjes, maar tasten het aardoppervlak af langs

een lijn loodrecht op de projectie van de baan op het aardoppervlak, zodat het gezichtsveld min of meer rechthoekig wordt. De lijnen die afgetast worden als de satelliet boven de horizon van het ontvangststation staat komen op de uiteindelijke opname terecht.

De vertekening van het beeld aan de randen van de foto van de geostationaire satelliet (figuur 1), die wordt veroorzaakt doordat de satelliet die plaatsen aan het aardoppervlak onder een zeer schuine hoek waarneemt zouden we, uitgaande van figuur 3, ook kunnen verwachten bij de opname van figuur 2. Door elektronische bewerking van het beeld in de satelliet en/of in de ontvangstapparatuur wordt het beeld „vervormd” tot een projectie, die geschikt is voor gebruik in de weerkamer.

TABEL 1 SYMBOLEN

a	kortste zijde van een kleinbeeldnegatief
AB	diameter van het gezichtsveld van de satelliet, gemeten over het aardoppervlak
α	helft van de beeldhoek waaronder de satelliet het aardoppervlak ziet
b	straal van de cirkel die het beeldveld van de satelliet begrenst
γ	gravitatieconstante
f	brandpuntafstand van het objectief van een kleinbeeldcamera
φ	geografische breedte
g	versnelling van de zwaartekracht aan het aardoppervlak; $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$
h	hoogte van de satelliet boven het aardoppervlak
m	massa van de satelliet
M	massa van de aarde
ω	hoeksnelheid van de satelliet
Ω	hoeksnelheid van de aarde
$r = R + h$	afstand tussen de satelliet en het middelpunt van de aarde
R	straal van de aarde; $R = \frac{1}{2} \cdot 12,757 \cdot 10^6 \text{ m}$
T_a	omlooptijd van de aarde = omlooptijd van een geostationaire satelliet; $T_a = 1,00293$ dagen
T_p	omlooptijd van een polaire satelliet

Waar nodig zijn getalswaarden gegeven, ontleend aan *Binas*, Informatieboek VWO/HAVO voor het onderwijs in de natuurwetenschappen; Wolters-Noordhoff 1977, tabel 31.

TABEL 2 Levensduur van satellieten bij de opgegeven hoogte in km

200	enkele dagen	1000	enkele eeuwen
300	enkele weken	1500	ca 10 000 jaar
500	enkele jaren	36000	ca 1 000 000 jaar
800	ca 100 jaar		