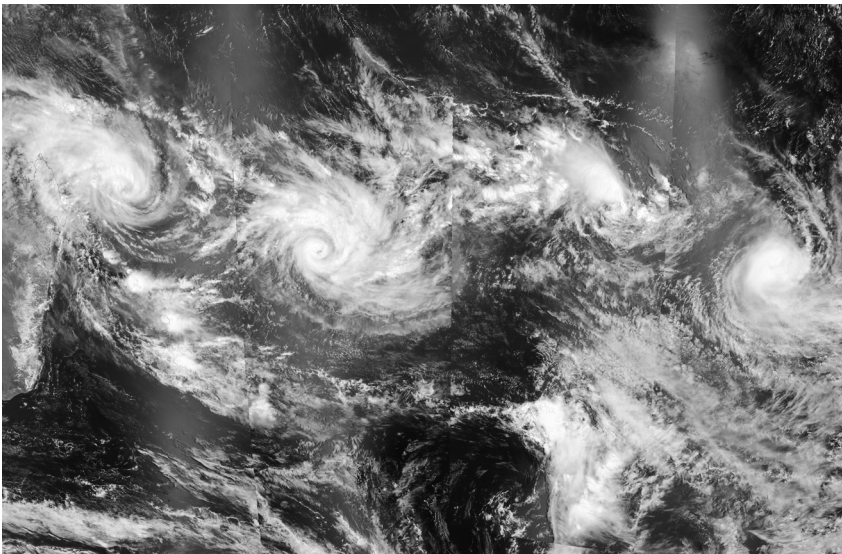


Tropische cyclonen

Tropische stormen zijn kleinschalige depressies die vergezeld gaan van veel wind, overvloedige regenval, hoge zeegolven en vloedgolven. Bereikt de wind orkaankracht (windkracht 12), dan spreekt men van een tropische cycloon.



Figuur 1: Tropische storm en drie cyclonen boven de Indische Oceaan, 11 februari 2003. Geheel links de kust van Madagaskar. Het beeld is opgebouwd uit gegevens van de MODIS (moderate resolution imaging spectroradiometer) op de Amerikaanse satellieten Terra en Aqua van het Earth Observing System (EOS) van de ruimtevaartorganisatie NASA.

Tropische cyclonen komen voor in de zeegebieden rond de equator die zijn aangegeven in figuur 2. Ze staan bekend onder verschillende namen, zoals hurricane in de Verenigde Staten, tyfoon of eenvoudigweg cycloon in Azië en willy-willie in Australië. De Amerikanen meten de wind door te middelen over 1 minuut; de standaard volgens de normen van de Wereld Meteorologische Organisatie is 10 minuten.

In het Caribische gebied treden de hurricanes op in de maanden augustus, september en

oktober. Het seizoen wordt ingeperkt door één van de voorwaarden voor het ontstaan van tropische cyclonen: een zeewatertemperatuur van ten minste 26 graden. Ook voor delen van de Stille Oceaan en voor het noorden van de Indische Oceaan geldt dit orkaanseizoen, maar er zijn ook gebieden waar cyclonen het hele jaar door kunnen voorkomen.

De meeste schade veroorzaken tropische cyclonen op het moment dat ze de kust bereiken. De slachtoffers vallen vooral door vloedgolven, die tot 6 m. hoog kunnen worden.

Inhammen kunnen het vloedgolfeffect nog versterken: de Bathurst Bay Hurricane veroorzaakte in 1899 in de gelijknamige baai in Australië een opzet van maar liefst 13 m.

Als record voor het aantal slachtoffers gold lange tijd de cycloon van 7 oktober 1737 in de Golf van Bengalen, waarbij meer dan een kwart miljoen slachtoffers te betreuren waren. Inmiddels is men van mening dat een vloedgolf in Bangladesh uit 1970 daar niet voor onderdeel; sommige bronnen schatten het aantal doden bij die catastrofe zelfs op 300.000.

Ook als de schade in het kustgebied gering is, kan overvloedige neerslag meer landinwaarts plotseling opkomende overstromingen teweeg brengen. Soms komen neerslaghoeveelheden voor van 750 mm, dat is evenveel als er in Nederland in een heel jaar valt. De neerslag vormt bij alle tropische stormen die het land optrekken, een even grote bedreiging; het criterium van windkracht 12, zoals dat geldt voor de cycloon- of hurricanestatus, is daarbij niet van belang. Boven zee treden extreem hoge golven op, bijvoorbeeld 30 m. bij de hurricane Luis uit 1995.

In de laatste decennia eisen de tropische cyclonen vooral een hoge tol in bijvoorbeeld Bangladesh, waar vloedgolven makkelijk ver het land kunnen binnendringen en de infrastructuur ontbreekt om de bevolking te beschermen of tijdig te evacueren. In de Verenigde Staten viel het aantal slachtoffers het laatste decennia mee. Deels komt dit door een tijdige signalering dankzij weersatellieten en nauwkeuriger verwachtingen. Daarnaast is er een effectievere berichtgeving, zijn er



Figuur 2: Gebieden waar tropische cyclonen optreden:

1. Noord-Atlantische Oceaan, Golf van Mexico en Caribische Zee, 2. Noordoostelijke Stille Oceaan (van Mexico tot de datumgrens), 3. Noordwestelijke Stille Oceaan (van de datumgrens tot Azië, inclusief de Zuid-Chinese Zee), 4. Noordelijke Indische Oceaan met de Golf van Bengalen en de Arabische Zee, 5. Zuidwestelijke Indische Oceaan van Afrika tot 100 graden oosterlengte, 6. Zuidoostelijke Indische Oceaan/omgeving Australië van 100 tot 142 graden oosterlengte, 7. Zuidwestelijke Stille Oceaan tot Australië, van 142 graden oosterlengte tot 120 graden westerlengte.

vroegtijdige evacuaties, is er een beter voorbereid publiek en een professioneler 'calamiteitenmanagement' door de Amerikaanse overheid. Daarnaast is er sprake van toeval of, zo men wil, geluk: naar verhouding trokken weinig belangrijke orkanen in dichtbevolkte streken het land op. Door de sterke groei van de bevolking langs de Amerikaanse oostkust en de complexiteit van een evacuatie, is ook in de Verenigde Staten een ramp in de toekomst niet uit te sluiten.

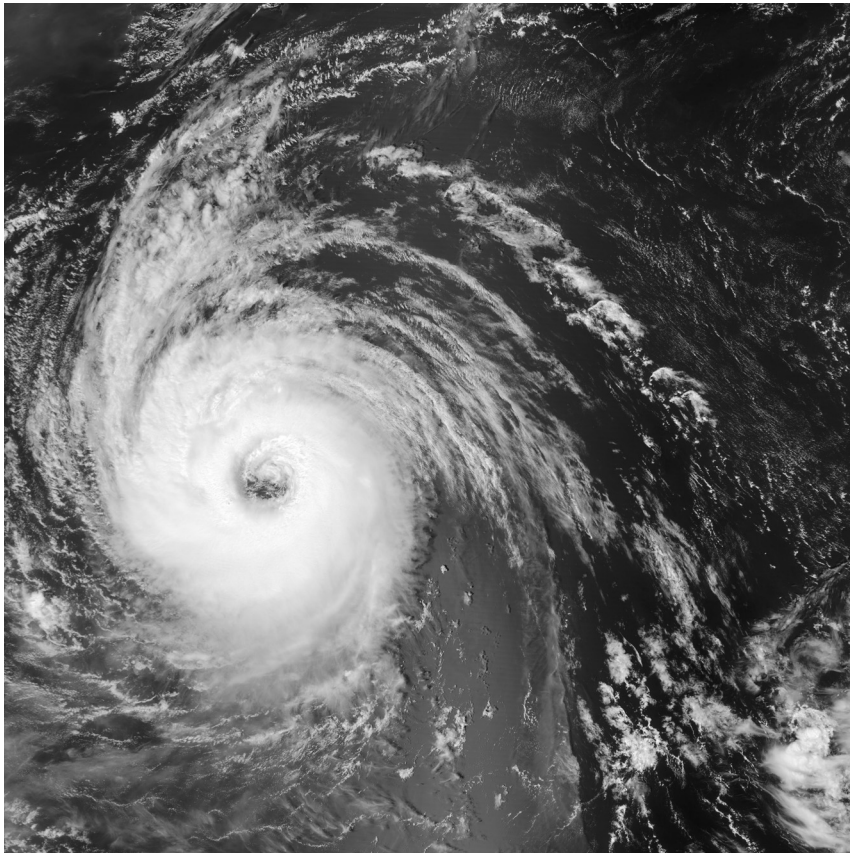
Warm zeewater

Tropische cyclonen zijn kleinschaliger dan 'gewone' hoge- en lagedrukgebieden van de gematigde breedten; ze hebben een doorsnede van 500-1500 km. De orkaanwinden doen zich uitsluitend voor in de kern, die slechts 1-4% beslaat van de totale omvang. De levensduur bedraagt gewoonlijk 5-10 dagen, maar is soms veel langer. In 2002 had Kyle een levensduur van 22 dagen; Ginger hield het in 1971 28 dagen vol.

Gerekend over de gehele aardbol zijn er elk jaar 80-90 tropische stormen. Ongeveer 2 op de 3 stormen ontwikkelen zich tot een orkaan. Op de Noord-Atlantische Oceaan loopt het aantal tropische stormen per jaar uiteen van 4 (1983) tot 21 (1933), gemiddeld zijn het er ongeveer 10.

De meeste tropische cyclonen komen tot ontwikkeling in een gebied tussen 5 en 20 graden noorder- of zuiderbreedte. Verder van de evenaar weg is het zeewater te koud; we concludeerden al dat dit bij voorkeur 26 graden moet zijn of warmer. Verdampend zeewater is namelijk een belangrijke bron van energie voor een cycloon; daarnaast levert de achtergrondstroming een bijdrage, evenals de condensatiewarmte die vrij komt in de zware buien in de buurt van het centrum van de cycloon. Overigens wordt slechts 2,5 % van die energie gebruikt voor het aandrijven van de orkaanwinden. Het gaat natuurlijk wel om grote hoeveelheden energie: een 'gemiddelde' orkaan bevat een hoeveelheid energie die gelijk is aan vijf maal het totale energiegebruik van de hele mensheid in 1990.

Doordat de afwijkende kracht van de aardrotatie, ook wel corioliskracht genoemd, eveneens een belangrijke rol speelt, houden de cyclonen wat afstand tot de evenaar; in de buurt van de evenaar is de corioliskracht namelijk nul. Om tropische cyclonen tot ontwikkeling te laten komen moet verder de atmosfeer boven de tropische oceaan voldoende onstabiel zijn, zonder dat de wind er weer te veel verandert met de hoogte. Ze ontstaan niet 'uit het niets'; er moeten in de buurt van het aardoppervlak al storingen aanwezig zijn (zogenoemde 'easterly waves'), die onder de hierboven genoemde voorwaarden uit kunnen (niet noodzakelijkerwijs moeten) groeien tot een tropische storm.



Figuur 3: Typhoon Sinlaku ten zuiden van Japan, 3 september 2003. Beeld van het MODIS-instrument op de Amerikaanse Aqua satelliet.

Voor de hurricanes in het Caribische gebied geldt dat die storingen meestal afkomstig zijn uit Afrika; ze drijven al ontwikkelend met de noordoostpassaat - ten zuiden van het subtropisch hogedrukgebied bij de Azoren langs de Atlantische Oceaan over. Deze stroming drijft ze naar het Caribische gebied, waar ze over de eilanden kunnen razen, aan land kunnen gaan of naar het noorden afbuigen. Boven land neemt de windsnelheid door wrijving enigszins af, maar de vlagerigheid neemt toe. Doordat juist de windstoten de meeste schade veroorzaken, raakt men zo van de regen in de drup. Pas na enkele uren boven land begint de orkaan in kracht af te nemen; hij raakt dan namelijk afgesneden van zijn belangrijkste energiebron: het warme zeewater.

Sommige, naar het noorden afgebogen, tropische cyclonen komen terecht in de westelijke stroming van de gematigde breedten. Ze gaan dan over in een 'normale' depressie en worden in de richting van Europa gevoerd. Voor zover bekend maakte een tropische cycloon slechts éénmaal de oceaanoversteek af en kwam terecht aan de Ierse westkust, waar hij veel schade aanrichtte. Dat was Debbie in 1961. In onze omgeving wordt gemiddeld eens per jaar een ex-cycloon gesignaleerd; vaak gaat het dan om actieve depressies die veel regen en wind met zich meebrengen.

Oog

De tropische cyclonen verschijnen niet met

vaste regelmaat. Nu eens vormen zich verscheidene orkanen min of meer gelijktijdig, zoals in het geval van figuur 1, dan weer is er 2 tot 3 weken weinig of geen activiteit. Het meest opvallende kenmerk van een tropische cycloon is het wolkenrijke oog (bijvoorbeeld figuur 3), waar dalende luchtbewegingen optreden.

Het oog heeft een diameter van 30-50 km en is op satellietbeelden gewoonlijk goed te zien. De luchtdruk is in (of vanuit de satelliet gezien, onder) het oog het laagst. Rondom het oog bevindt zich een 'muur' van actieve bewolking; daar gaat de lucht met snelheden van 100-150 km per uur omhoog. Aan het aardoppervlak direct onder de 'muur' treden de hoogste windsnelheden op. Aan de bovenzijde op zo'n 18 km hoogte, stroomt de lucht met bewolking weer spiraalsgewijs naar buiten. Daardoor vormt er zich aan de bovenkant van de cycloon een kap van ijswolken, die eveneens op satellietbeelden markant zichtbaar is. Direct buiten de 'muur' bevinden zich regenbanden die evenwijdig aan de wind naar het centrum toe lijken te spiralisieren. Deze banden zijn 5-50 km breed en 100-300 km lang. Ze veroorzaken neerslagintensiteiten van 25 mm per uur of meer over een klein oppervlak, ongeveer 10% van het totale gebied waar de cycloon het laat regenen.

Naamgeving

De naam 'hurricane' is afgeleid van 'Hurakan', een van de scheppende goden van de Maya's, die met zijn adem over de chaotische wateren blies en zo droog land creëerde. Op hun beurt hebben tropische cyclonen eveneens namen. Het bekendst zijn de jongens- en meisjesnamen, maar in landen als Korea, Thailand, Vietnam, China en Japan worden historische namen van goden gebruikt, zoals Prapiroon (Regengod), Wukong (Apenkoning) of Dianmu (Moeder van de Bliksem).

Hurricanes in het Caribische gebied werden een aantal eeuwen lang aangeduid met de naam van de heilige van de dag waarop de hurricane optrad. Zo werd Puerto Rico op 26 juli 1825 aan het begin van een vroeg seizoen getroffen door de verwoestende orkaan Santa Ana en op 13 september 1876 door hurricane San Felipe. Toen er in 1928 op dezelfde dag opnieuw een orkaan toesloeg, werd dat San Felipe 2. Overigens paste men in een ver verleden in Nederland eenzelfde principe toe. Zo herinnert De Biesbosch thans nog steeds aan de St Elisabethsvloed van 18 november 1421 en de vloed op 'St Felix Quade Saterdach', 5 november 1530, gaf de aanzet tot de ondergang van Reimerswaal op Zuid-Beveland.

Na de heiligenamen kwamen de geografische coördinaten in gebruik, maar deze praktijk vertraagde de communicatie en gaf aanleiding tot veel fouten in de berichtgeving.

De Australische meteoroloog Clement Wragge komt de eer toe aan het eind van de 19e eeuw als eerste meisjesnamen te hebben gebruikt voor tropische stormen. In de Tweede Wereldoorlog werd dat gebruik van meisjesnamen in alfabetische volgorde ook de normale praktijk in het Caribische gebied. Elke tropische depressie van ten minste wind-

kracht 8 krijgt een eigen naam. In 1978 deden voor het eerst jongensnamen hun intrede, aanvankelijk alleen in het gebied van de Stille Oceaan voor de Amerikaanse westkust. Een jaar later ook op de Atlantische Oceaan en in de Golf van Mexico. Er zijn zes namenlijsten opgesteld; om de zes jaar komen dezelfde namen dus weer terug. Een uitzondering wordt gemaakt voor de namen van verwoestende orkanen die weergeschiedenis hebben geschreven en die men zich nog generaties lang kan heugen; deze worden van de lijst afgevoerd en vervangen door nieuwe. Sinds 1954 is dat 40 keer gebeurd. De meest recente voorbeelden zijn Allison, Iris en Michelle uit 2001, Keith uit 2000 en Floyd en Lenny uit 1999. Namen met Q, U, X, Y en Z worden niet gebruikt.

Schaal

Alle tropische cyclonen zijn gevaarlijk, maar sommige zijn gevaarlijker dan andere. Daarom is er een classificatie ontwikkeld om onderscheid te kunnen maken tussen bijvoorbeeld krachtige en verwoestende hurricanes en om zich beter op de te verwachten schade te kunnen voorbereiden. De schaal werd opgesteld in 1969 door consultant Herbert Saffir, gespecialiseerd in stormschade aan gebouwen, en Bob Simpson, directeur van het National Hurricane Centre (zie tabel). De schaal wordt gebruikt om een inschatting te maken van mogelijke schade wanneer de hurricane de kust bereikt. Een hurricane van klassen 2, 3, 4 en 5 is respectievelijk 10, 50, 100 en 250 maal zo verwoestend als een zwakke hurricane van klasse 1. Overigens hangt de schade op een bepaalde plaats af van verschillende factoren, zoals de afstand tot het gebied met de hoogste windsnelheden, open of beschutte ligging, de bouwvoorschriften

ter plekke, begroeiing van het landschap en of er al dan niet overstromingen optreden.

Er is geen verband tussen de omvang van een tropische cycloon en het verwoestend potentieel. Zo was de zeer krachtige orkaan Andrew uit 1992, klasse 4 op de Saffir-Simpson-schaal, betrekkelijk klein.

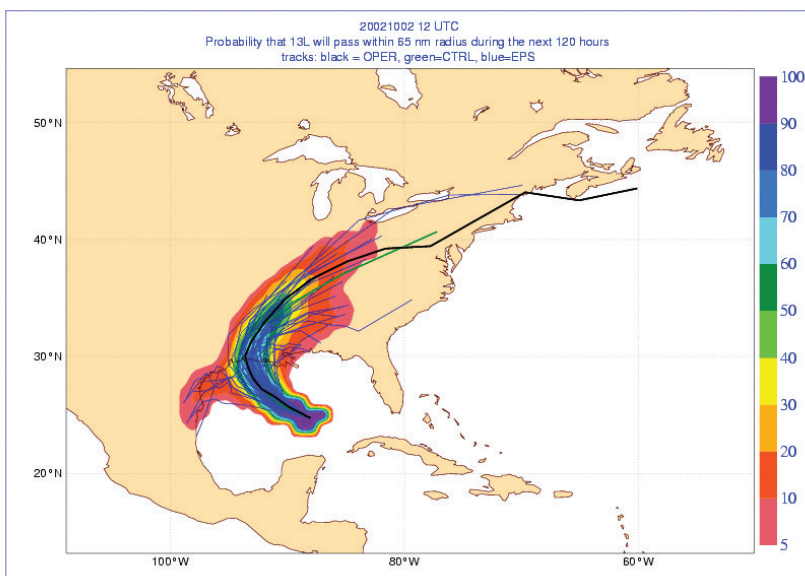
Verwachtingen

De meteoroloog die verwachtingen moet opstellen voor hurricanes moet vier vragen beantwoorden: waar raakt hij de kust, wanneer gaat dat gebeuren, hoe krachtig is hij op dat moment en welke bedreigingen gaan ervan uit (extreme wind, stormvloed, overvloedige neerslag en/of zware buien).

Gewoonlijk probeert hij deze vragen te beantwoorden door nauwkeurig de baan van de tropische cycloon te volgen; dat is sowieso nodig om scheepvaart en luchtvaart uit de buurt van het stormgeweld te kunnen houden. De posities van de tropische cycloon worden bepaald uit satellietbeelden en met verkenningvluchten; aangenomen wordt dat de hurricane in eerste instantie niet verandert van richting en snelheid. Daarnaast heeft de meteoroloog statistische modellen en atmosfeermodellen tot zijn beschikken bij het verder preciseren van zijn verwachtingen. Als de achtergrondstroming waarin de tropische cycloon wordt meegevoerd, relatief krachtig is, gaat het voorspellen beter dan bij een zwakke achtergrondstroming. In het laatste geval leidt de wisselwerking tussen de tropische cycloon en de stroming soms tot een grillige baan.

Gemiddeld zit een Amerikaanse verwachting voor 24 uur vooruit er 170 km naast; in 5% van de gevallen in de laatste tien jaar bedroeg voor die verwachtingstermijn de fout meer dan 370 km. Het gebied waarvoor alarm wordt geslagen is de laatste tijd alleen maar toegenomen en bedraagt nu gemiddeld 730 km; het gemiddelde over de laatste 30 jaar bedraagt ruim 550 km. Niet dat de kwaliteit van de verwachtingen afneemt, maar de autoriteiten willen tegenwoordig eerder waarschuwingen doen uitgaan dan in het verleden. Er wordt een alarm uitgegeven voor dat gedeelte van de kustlijn waar windkracht 8 of meer wordt verwacht. De lengte daarvan hangt dus zowel af van onzekerheden in de baan van de hurricane als onzekerheden in de exacte omvang van het gebied waar de windsnelheidsdrempel wordt overschreden.

Het derde element van de verwachting is de intensiteit van de orkaan. Voor een zeer krachtige hurricane zijn uiteraard ingrijpendere maatregelen nodig dan voor een orkaan die kan worden omschreven als matig. De hoogste windsnelheden treden op aan de rechterkant van de tropische cycloon, gezien met de verplaatsing mee. Aan de rechterkant versterkt de achtergrondstroming de windsnel-



Figuur 4: Grafische weergave van een kansverwachting van het ensemblevoorspelsysteem van het Europees Weercentrum voor de baan van tropische cycloon Lili uit oktober 2002.

heden in het linksom ronddraaiende systeem; aan de linkerkant werken hurricane en achtergrondstroming elkaar tegen. Tot slot wil men natuurlijk weten uit welke hoek het grootste gevaar dreigt: wind, stormvloed, overvloedige neerslag of zware buien. Op dit moment is daarop nog niet altijd een gedetailleerd antwoord mogelijk. Door de kracht volgens de schaal van Saffir & Simpson goed te voorspellen en het type dreiging beter in kaart te brengen, hoopt men in de toekomst levens te redden en/of kosten te besparen.

Nieuwe methodieken

Sinds ongeveer anderhalf jaar zijn ook kansverwachtingen beschikbaar voor de baan van tropische cyclonen, gebaseerd op ensembleverwachtingen van het Europees weercentrum. Figuur 4 geeft een voorbeeld hoe de informatie uit zo'n kansverwachting kan worden samengevat.

Het probleem waarvoor de meteoroloog in dit geval stond is of de orkaan Lili van oktober 2002 aan land zou gaan en waar dat dan zou gebeuren. De lijnen in de figuur laten de 5-daagse baan van de hurricane zien volgens elk van de 52 berekeningen van het ensemblevoorspelsysteem. De kleur of de tint van een gebied geeft de kans aan dat Lili gedurende die 5 dagen op een afstand van hooguit 100 km een bepaalde locatie zal passeren. Andere verwachtingsmethodieken maken gebruik van verschillende atmosfermodellen om de baan van een tropische cycloon te voorspellen; men noemt dat een superensemble. Via statistische methoden wordt eerst afgeleid welk atmosfermodel op welke punten goed scoort; de verwachting die vervolgens

wordt opgesteld, profiteert van de sterke kanten van de gebruikte modellen en onderdrukt eventuele zwakke kanten. Voordat de methode kan worden gebruikt, moet ze eerst 'leren' hoe die atmosfermodellen op dat moment presteren; pas in de loop van een orkanseizoen kan de door de methodiek vergaarde kennis worden ingezet voor de voorspelling van de baan van een volgende hurricane. Sommige voorspellingen gaan nog verder vooruit in de tijd; via statistische methoden of met behulp van een klimaatmodel probeert men dan een uitspraak te doen of het een 'goed' of een 'slecht' orkanenjaar zal worden. Deze methoden staan overigens nog in de kinderschoenen.

Satellietbeelden

Satellietbeelden spelen uiteraard een belangrijke rol bij het lokaliseren en volgen van tropische cyclonen. Hierbij een aantal indrukwekkende voorbeelden. Het satellietbeeld van figuur 1 dateert van 11 februari 2003. We zien boven de Indische Oceaan drie tropische cyclonen en een tropische storm in verschillende stadia van ontwikkeling. Alle vier verplaatsen ze zich in oostelijke of zuidoostelijke richting. Geheel links ligt de kustlijn van Madagaskar, die overigens door de bewolking van de tropische cycloon Gerry grotendeels aan het zicht wordt onttrokken. Iets meer naar het oosten bevindt zich de tropische cycloon Hape. Beide cyclonen hebben een 'oog', een onbewolkt gebied in het midden van het weersysteem. Rechts van Hape ligt 18S, een 'naamloze' tropische storm omdat het er niet hard genoeg waait. De tropische cycloon Fiona sluit de rij.

Figuur 1 toont de cyclonen van een hoogte

van 705 km. De gegevens waaruit het beeld is opgebouwd, zijn afkomstig van de MODIS (moderate resolution imaging spectroradiometer) op de Amerikaanse satellieten Terra en Aqua van het Earth Observing System (EOS) van de ruimtevaartorganisatie NASA. De satellieten bewegen van oost naar west en dragen elk twee stroken bij aan het samengestelde beeld. De Terra trok in de ochtend van 11 februari 2003 over de regio en leverde (van links af) de eerste en derde strook. De andere stroken zijn afkomstig van de Aqua, die in de middag overkwam.

De Aqua leverde ook het satelliebeeld van figuur 3. We zien de tyfoon Sinlaku ten zuiden van Japan op weg naar Taiwan, 3 september 2003.

Het oog van de cycloon, de spiraalstructuur en de boven in de atmosfeer uitwaaiende cirrusbewolking zijn goed te zien, mede door schaduwwerking.

K. Floor is wetenschappelijk medewerker van het KNMI

Literatuur:

Marks, F.D., 2003, Hurricanes; Holton, J.R., Curry, J.A. & Pyle, J.A., Encyclopedia of Atmospheric Sciences, Vol 3, 942-966, Amsterdam, Academic Press.

Landsea, C., FAQ: Hurricanes, tyfoons and tropical cyclones;

<http://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/tcfaqHED.html>

Oldenborgh, G.J. van & Haarsma, R., 2000, Orkaanvoorspellingen op langere termijn, Meteorologica 9 (3) 20-23.

Vogelezang, D., 1993, Tropische cyclonen, Meteorologica 2 (1), 28-32.

Schaal voor hurricanes volgens Saffir & Simpson

	Klasse	Omschrijving	Windsnelheid (km/h)	Stormvloed (meters boven normaal)	Schade	Minimum luchtdruk in de kern
tropische depressie	TD		Minder dan 62			
tropische storm	TS		62-117			
hurricane	1	Zwak	118-152	1,2-1,6	Lichte schade	981 hPa of meer
hurricane	2	Matig	153-176	1,7-2,5	Dak- en vensterschade en belangrijke schade aan bomen en gewassen	965-980 hPa
hurricane	3	Krachtig	177-208	2,6-3,7	Grote schade met uitgebreide vernielingen aan gebouwen	964-945 hPa
hurricane	4	Zeer krachtig	209-248	3,8-5,4	Zeer groot: daken weggeblazen, veel waterschade op de begane grond van gebouwen aan de kust	944-920 hPa
tropische cycloon	5	Verwoestend	Groter dan 248	Groter dan 5,4	Catastrofaal: vrijwel alle daken weggeblazen, evenals kleine lichtere bouwsels en grote schade aan gebouwen	minder dan 920 hPa