

De meteorologische aspecten van sprites

Oscar van der Velde (CNRM en Université Paul Sabatier, Toulouse)

Tot 1989 werden meldingen van opwaartse bliksems en merkwaardige lichtflitsen boven de toppen van onweersbuien bij gebrek aan bewijs beschouwd als curiositeiten, wellicht ontsprongen aan het inbeeldingsvermogen van de waarnemer (zelfs van piloten!). Maar in dat jaar werd door onderzoekers van de University of Minnesota bij toeval een 'opwaartse bliksem' vastgelegd tijdens het testen van hun nieuwe camera met beeldversterker voor onderzoek naar poollicht. De interesse van de wetenschap was gewekt. De NASA begon een onderzoek om uit te vinden of deze nieuwe variant van bliksem een gevaar kan vormen voor hun missies. Men vond in de archieven van de beelden van de Space Shuttle inderdaad een aantal kortdurende lichtschijnsels boven onweersbuien. Sindsdien zijn er tijdens waarnemings-campagnes vanuit Colorado sinds 1993 al meer dan tienduizend 'red sprites' vastgelegd. Ze blijken dus lang niet zo zeldzaam te zijn als men dacht. Bovendien werden er nog een paar nieuwe soorten ontdekt: de 'blue jets' en 'elves'. Het is nog onduidelijk onder welke voorwaarden precies sprites ontstaan, hoe groot de rol is die sprites spelen in het aardelektrische systeem, en wat hun bijdrage is aan de chemie van de hogere atmosfeer. In Europa heeft een samenwerkend team van verschillende onderzoeksgroepen enkele waarnemingscampagnes verricht om hier helderheid over te krijgen. In dit artikel wordt ingegaan op de ontstaanswijze van deze speciale elektrische ontladingen in de hogere atmosfeer, de sprites.

Een nieuw verschijnsel

In 1994 verzorgde Dr. Sentman van de University of Alaska, geïnspireerd door Shakespeare, de naam 'sprite' (elf, geest) voor het nieuwe fenomeen. Behalve de vluchtigheid (levensduur < 0.05 seconde) en de aparte vormen was er op dat moment nog niet veel duidelijk over de aard van het verschijnsel en een eenduidige, neutrale benaming ontbrak nog. In de literatuur sprak men simpelweg van opwaartse bliksemontladingen, wolk-stratosfeer (of wolk-ionosfeer) ontladingen. Maar is het wel een bliksem en is er eigenlijk wel een verbinding met de wolk? De term sprite werd zo al snel populair.

Vanaf het begin was duidelijk dat sprites samenhangen met onweersbuien, en dat er een zekere relatie is met de elektrische activiteit daarin. De vazige beelden lieten nog niet veel structuur zien, maar met betere apparatuur zijn tegenwoordig gedetailleerde opnamen verkregen. Sprites bestaan uit 'streamers', dit zijn kanalen van aangeslagen ionen die licht uitzenden. Onder invloed van een elektrisch veld versnellen vrije elektronen zodanig dat ze voldoende energie krijgen om andere elektronen vrij te maken bij een botsing met een atoom. Deze elektronen zullen ook versnellen en er ontstaat een kettingreactie met als gevolg een lichtend spoor. Het verschil met de 'leaders' van bliksem is dat door de lagere luchtdruk (die de concentratie van ionen en elektronen bepaalt) en het kleinere elektrische veld er geen geleidend plasma ontstaat door thermische effecten. Er blijven dus geen elektronen door een kanaal stromen. Er zijn varianten van sprites met gladde, rechte elementen, de zogenaamde columniforme (kolomvormige) sprites, en varianten met een wirwar van streamers die naar onderen en naar boven groeien vanuit een heldere kern van onregelmatige bollen, de zogenaamde 'carrot sprites' wegens hun wortelvormige uiterlijk. De eerste kleurenbeelden vanuit een onderzoeksvliegtuig lieten zien dat sprites rood zijn, met uitlopers die op lagere hoogten blauw zijn. De helderheid komt ongeveer overeen met die van noorderlicht. Dit is nog door het blote oog waarneembaar mits er geen

stoorlicht is, maar is nog altijd veel minder opvallend dan het weerlicht van de onweersbui zelf. Samen met de korte duur is het daarom niet verwonderlijk dat het verschijnsel niet veel vaker is opgemerkt. Bovendien is het noodzakelijk een heldere lucht tussen de waarnemer en de ruimte boven het aambeeld van de onweersbui te hebben.

Een sprite beslaat een enorm volume, doorgaans tussen de 40 en 95 kilometer boven het aardoppervlak, reikend tot de basis van de ionosfeer. Het helderste deel bevindt zich op 70-80 km hoogte. De horizontale afmetingen van sprites bedragen soms meer dan 50 kilometer. De schatting van de hoeveelheid energie is dan ook fors, 10-100 MJ per keer. Sprites kunnen in losse elementen of in clusters voorkomen. In sommige gevallen treedt er een opeenvolging op van enkele sprites op verschillende plaatsen boven het onweer, dit wordt wel 'dancing sprites' genoemd. Een typisch groot onweerssysteem kan in een zeker stadium (hierover straks meer) elke paar minuten een sprite produceren. Het is nog onbekend of de streamers van sommige sprites inderdaad in contact staan met de onweersbui. Meestal neemt de lichtsterkte van de streamers af op lagere hoogten, daarom lijkt het dat de meeste sprites niet in direct contact staan met het aambeeld. Maar deze indruk kan voor een deel veroorzaakt worden door het feit dat blauw licht sterk verstrooid wordt door de atmosfeer en zo alleen van dichterbij of op grotere hoogten goed waar te nemen is.

Sprites zijn vooral vanuit de ruimte al over bijna de hele wereld waargenomen. Uitzonderingen zijn de poolstreken en midden in woestijnen waar geen onweersbuien voorkomen. De eerst gedocumenteerde sprites boven Europa werden gezien in de Balkan door waarnemers van de Leoniden meteorenzwerm in november 1999. In de zomer van 2000 heeft het Deense instituut voor ruimteonderzoek een lichtgevoelige videocamera geplaatst op het astronomische observatorium op de 2877 meter hoge Pic du Midi in de Franse Pyreneeën. Hiermee legde men de eerste sprites vast in Europa. Sindsdien zijn er in 2003 en 2005 EuroSprite campagnes geweest met een via internet bestuurbaar camerasysteem dat automatisch beelden selecteert waarin pixels voorkomen boven een drempel van een gegeven lichtsterkte. Dit leverde in 2003 meer dan 100 sprites op en enkele elves, en 65 sprites in 2005. De maximale waarnemingsafstand blijkt ongeveer 1000 kilometer te zijn. Ook meteorwaarnemers leggen soms bij toeval sprites vast met dergelijke camera's, zoals op 2 mei 2005 vanuit Hamburg, en op 30 mei en op 6/7 september 2005 vanuit Zwitserland. In het laatste geval werden zelfs meer dan tachtig sprites waargenomen. Sprites worden niet alleen boven zomerse onweders gezien. In Japan en in Israël zijn met succes sprites waargenomen boven winterse geclusterde convectie boven zee.

Overige verschijnselen

Blue Jets

Tijdens onderzoeksvluchten werden boven Arkansas voor het eerst blue jets vastgelegd, wel 56 in 22 minuten (Wescott et al, 1995). Dit zijn duidelijk ontladingen die groeien vanaf de top van een onweersbui, tot een hoogte van 30-50 kilometer. Het verschijnsel bestaat uit een diffuse blauwe uitwaaiierende kegel waarvan het onderste deel lichter is. Het verschijnsel duurt langer dan een sprite: 0.2 seconde. Blue jets blijken zeer zeldzaam, want in 10 jaar waarnemingen vanuit Colorado is er nog nooit een blue jet vastgelegd.

Een spectaculaire, grotere variant van de blue jet is in 1999 in Puerto Rico en iets later ook in Taiwan vastgelegd. De 'giant blue jet' schiet uit de hoge top van een (tropische) onweersbui door tot in de mesosfeer en vertakt zich daar. Dit heeft zich in het geval van Taiwan zelfs vijf keer in twintig minuten voorgedaan.

Elves

'Elves' zijn emissies van licht door ionen in de ionosfeer als ze aangeslagen worden

door de elektromagnetische puls van een sterke blikseminslag, meestal sterker dan 100 kA. Deze blikseminslag kan positief of negatief zijn. Het is een zeer snel uitbreidende ring van licht boven het inslagpunt, maar met een zo korte duur (1/1000ste seconde) dat het menselijk oog dit niet kan waarnemen.

Ontstaan van sprites

Zoals het losstaande uiterlijk en het bestaan uit streamers doen vermoeden, is een sprite dus geen 'opwaartse bliksem' uit de onweersbui. Enkele theorieën zijn voorgesteld die het ontstaan van sprites in de mesosfeer kunnen verklaren. De best passende bij de waarnemingen is die van C. T. R. Wilson uit 1925 (!), twee jaar voordat hij de Nobelprijs voor natuurkunde kreeg (hij is bekend van het Wilson vat, wat sporen van alpha/beta deeltjes kan weergeven door condensatie). De dichtheid van de atmosfeer bepaalt de geleidbaarheid van lucht voor ionen en elektronen. Deze geleidbaarheid neemt toe met de hoogte. Daarmee samenhangend neemt de tijd die nodig is om te herstellen van een verandering in ionisatie af met de hoogte. Het gevolg is dat de sterkte van het elektrische veld dat nodig is voor ontwikkeling van streamers afneemt met de hoogte, volgens een relatie $E/N > 123 \text{ Townsends} (=10^{-21} \text{ Vm}^2)$, waarbij N het aantal luchtmoleculen is per kubieke meter en E de sterkte van het elektrische veld is in Volt per meter. De ionosfeer is zeer geleidend doordat ultraviolette straling van de zon en kosmische straling continu elektronen vrijmaken van de stikstof- en zuurstofatomen. Door de globale activiteit van onweersbuien wordt de ionosfeer een positieve pool en de aarde gemiddeld een negatieve pool. Daartussen staat een elektrisch veld dat bij de grond 100 V/m bedraagt. Een (ideale) onweersbui kent een gestapelde opbouw van lading, meestal positief boven negatief, soms ook andersom. Daartussen, en tussen de onderste pool en de grond is het elektrische veld hoog en kunnen ten gevolge daarvan bliksems ontstaan. Tussen de top van de onweersbui en de ionosfeer staat er een normaal veld aangezien de twee ladingscentra elkaar ongeveer opheffen. Echter, als er zich een grote hoeveelheid lading bevindt in de dipool van de onweersbui, en één daarvan wordt ontladen door een bliksem naar de grond, dan blijft het netto effect van de niet-ontladen pool over: het elektrische veld tussen de onweersbui en de ionosfeer neemt dan sterk toe. Hoewel het elektrische veld vlak boven de onweersbui het grootst is, is daar ook de weerstand tegen het ontwikkelen van streamers het grootst. Het blijkt dat met de grote ladingsoverdracht (doorgaans $> 30 \text{ C}$) van sommige bliksems het elektrische veld op een hoogte van 70-90 kilometer de grens kan overschrijden waarbij streamers (sprites!) ontstaan. Ook dit had Wilson al voorspeld, maar helaas kon hij het moment van de ontdekking van sprites niet meer meemaken.

Vanaf het ontstaanspunt ontwikkelt een sprite zich omhoog en naar beneden. Aangezien een streamer niets anders is dan een ionisatiegolf van elektronen gevolgd door positieve ionen, die zich voortbeweegt in de richting van de positieve pool (de ionosfeer), zou je in eerste instantie verwachten dat de streamers alleen naar boven kunnen groeien. Maar ook uitbreiding naar beneden is mogelijk: het lokale elektrische veld aan de achterzijde van een ontwikkelende streamer lokt series van opwaartse negatieve streamers uit die op de positieve ionen afkomen. De streamers groeien totdat het elektrische veld (en zo de elektronenenergie) afgenomen is en er geen nieuwe elektronen meer kunnen worden vrijgemaakt.

Ladingsoverdracht van blikseminslagen

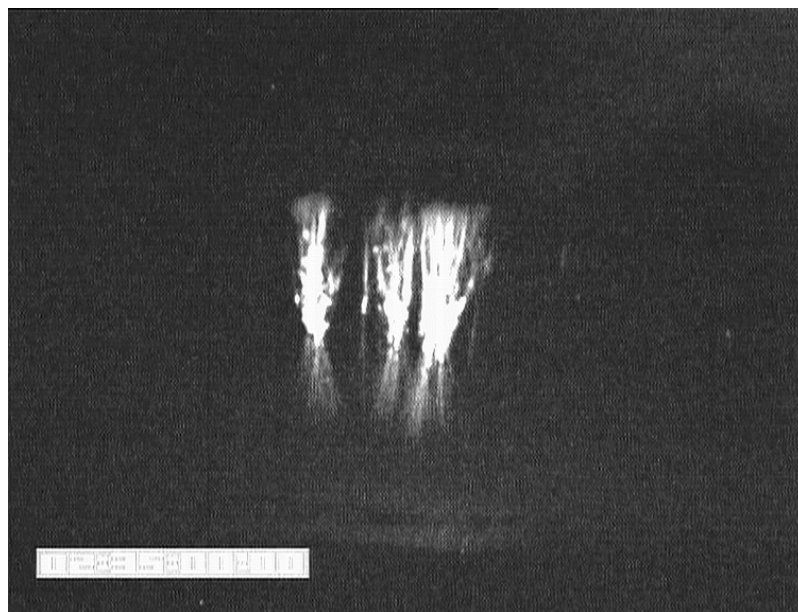
Bovenstaande theorie is de laatste jaren goed gesteund door waarnemingen. Op grote afstand van een blikseminslag kan men met extra lage frequentie (ELF) radio-ontvangers een schatting maken van de ladingsoverdracht tussen de wolk en de grond. De enige andere manier is het rechtstreeks meten van de hoeveelheid overgedragen lading op het punt van de inslag door het integreren van de

stroomsterkte over de tijd. De zogenaamde "charge moment change" van een ontlading is de maat die samenhangt met het resulterende elektrisch veld boven de onweersbui. Het is simpel de hoeveelheid lading vermenigvuldigd met de hoogte waarvandaan de lading verwijderd wordt, uitgedrukt in de eenheid Coulomb kilometer (C km). Cummer en Lyons (2005) onderzochten alle inslagen van drie verschillende nachten met sprites. Ze vonden een duidelijke minimale waarde van 650 C km voor twee nachten en 350 C km voor de andere nacht. Het verschil is te verwachten door de wisselende staat van de ionosfeer. Waarden als deze zijn wel een orde van grootte hoger dan bij normale blikseminslagen.

Tot nu toe is met bliksemdetectiesystemen vastgesteld dat bijna alle sprite-veroorzakende blikseminslagen positief zijn, dat wil zeggen dat er positieve lading uit de wolk naar de aarde verdwijnt. Er is slechts één geval bekend met een paar 'negatieve' sprites. Maar niet elke positieve ontlading (+CG, van cloud-to-ground) is voldoende sterk. Dit roept de vraag op welke processen er dan in de onweersbui gaande zijn die de grote lading kunnen genereren die afgetapt kan worden door een bliksem.

Voorbeeld van een sprite en zijn veroorzakende ontlading

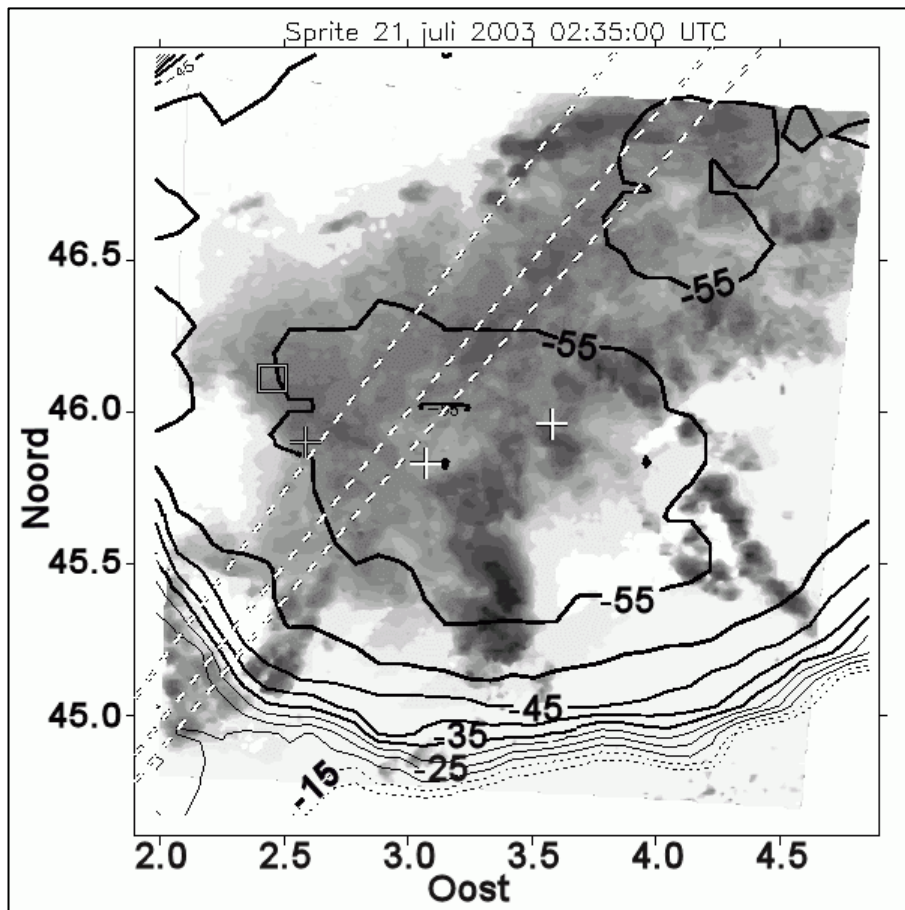
Laten we eens dicht bij huis kijken naar de aspecten van enkele zomerse onweders in Frankrijk in 2003 waarboven sprites zijn waargenomen door de camera in de Pyreneeën. In de nacht van 20-21 juli 2003 organiseerden convectieve cellen zich in een lijn, waarachter een zone van matige neerslag uit het aambeeld ontstond: de stratiforme zone. Een mesoschaal convectief systeem (MCS) was daarmee geboren boven het midden van Frankrijk. Tussen 2:05 UTC en 3:13 UTC werden maar liefst 27 sprites geregistreerd. Daarna werd de ochtendschemering te helder om nog sprites te kunnen zien.



Figuur 1. De wortelvormige sprite om 2:35:00 UTC op 21 juli 2003. Dit was de 16^{de} sprite sinds 2:05 UTC. De lichte vlek is het weerlicht van de bliksem die de sprite veroorzaakte.

Een waargenomen sprite om 2:35:00 UTC op 21 juli 2003 is afgebeeld in figuur 1. Een radarbeeld van dit systeem met de richting van deze sprite vanuit Pic du Midi (bepaald uit de positie ten opzichte van sterren met astronomische software) en zijn veroorzakende bliksem is weergegeven in figuur 2. In figuur 1 is goed te zien dat de

sprite boven het weerlicht midden in het stratiforme gedeelte ontstond. In het kaartje is te zien dat de richting niet samenvalt met de veroorzakende +CG (de linker witte +), maar ergens tussen deze +CG en ontladingen die kort na de sprite erop volgden (de grijze + en vierkant). Het lijkt er duidelijk op dat het proces wat belangrijk was voor deze sprite niet samenviel met de locatie van de voorafgaande +CG. De indruk wordt gewekt dat een uitgestrekte horizontale ontlading vanuit de convectieve zone naar de stratiforme zone wel eens een rol gespeeld zou kunnen hebben. Helaas was er geen detectiesysteem beschikbaar dat dat kan vaststellen. Dit hoeft echter niet typisch te zijn. In dezelfde onweersbui komen ook sprites voor die wel precies overeenkomen met de richting van de veroorzakende +CG.



Figuur 2. De richtingen van de drie sprites in figuur X vanuit Pic du Midi geplotted over het radarbeeld van de onweersbui. Zwarte lijnen geven de infrarood wolkentoptemperatuur weer ($^{\circ}\text{C}$) van Meteosat. Een + markeert de positie van een +CG, wit indien die binnen een seconde voor de sprite optrad, in dit geval ruim 800 ms (de noordoostelijke) en 5 ms voor de begintijd van het 20 ms durende videobeeld (nauwkeurigheid ± 12 ms). Een vierkant is een -CG. Grijs betekent dat de bliksem binnen 1 seconde na de sprite optrad.

Statistische analyse van +CG ontladingen

Een statistische analyse is uitgevoerd op de meteorologische karakteristieken rond +CG ontladingen in dit onweerscomplex (zie Tabel 1). De stroomsterkte blijkt gemiddeld voor een sprite-producerende +CG inslag het hoogst: 53.7 kA (kiloAmpères). De stroomsterkte van de groep van +CG inslagen die niet met sprites verbonden zijn is duidelijk minder sterk: 32.6 kA. Er is wel een vrij grote

standaarddeviatie in de waarnemingen. De latere inslagen van een heel flash event hebben gemiddeld een wat lagere stroomsterkte dan de eerste inslag. Uit eerder onderzoek was al gebleken dat niet de stroomsterkte maar de ladingsoverdracht de bepalende factor is, aangezien dit ook afhangt van de duur van de inslag ('continuïng current').

Ontlading	Gemiddelde stroomsterkte (kA)	Standaard deviatie (kA)
+	32.6	24.5
S+	38.4	30.0
ST+	53.7	35.7
S1+	50.8	40.7
S2+	40.8	25.4

Tabel 1. Overzicht van gemiddelde stroomsterkte van de +CG (gemeten door het Météorage detectienetwerk) voor het systeem van 21 juli 2003 tussen 00:30 en 03:15 UTC. Legenda: +: zonder sprite; S+: niet triggerend maar wel in sprite-producerende flash; ST+: triggerend, S1+: eerste CG in een sprite-producerende flash; S2+: een latere CG in een sprite-producerende flash. S1+ en S2+ zijn dezelfde inslagen als in S+ en ST+ gerangschikt op hun volgorde in een flash event.

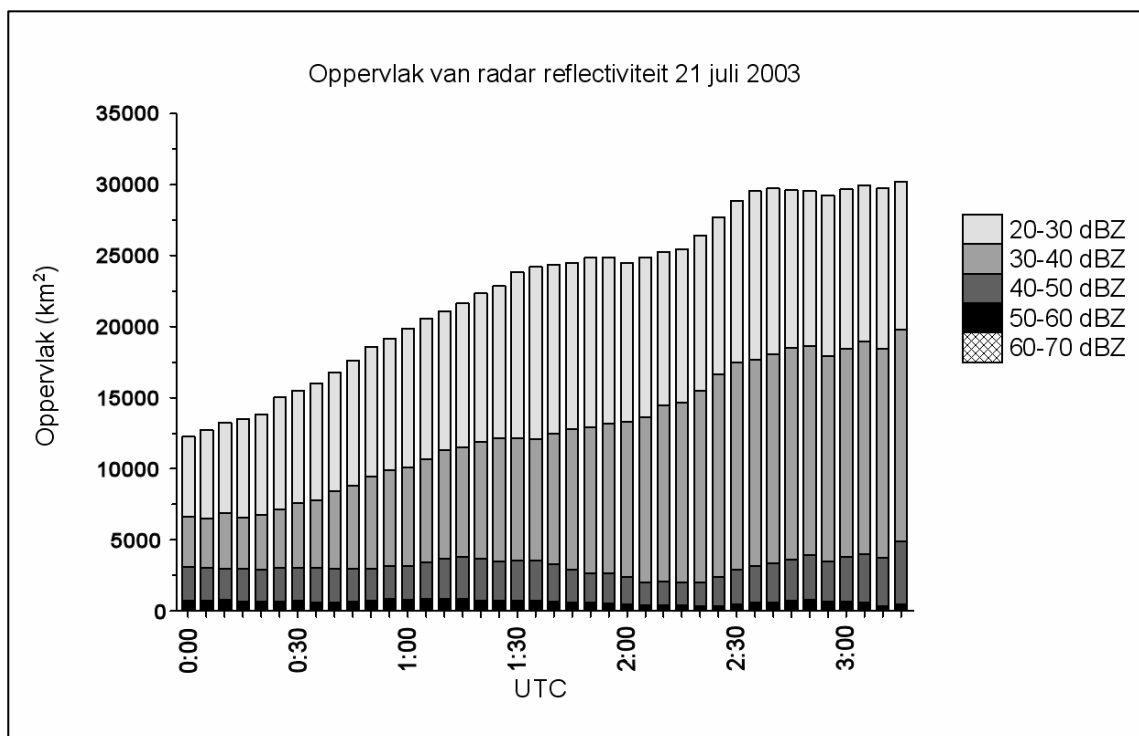
Ontlading	Gemiddelde reflectiviteit (dBZ)			Pixels > 40 dBZ (%)	Geïntegreerde neerslag (kg/min)
	Hoogste	Gemiddeld	Laagste		
+	51.2	34.9	20.1	27.2	7.9×10^7
S+	44.0	34.1	24.3	8.8	4.7×10^7
ST+	44.6	34.0	24.6	11.5	4.3×10^7
S1+	48.0	35.0	23.9	23.9	5.7×10^7
S2+	41.1	33.3	24.9	4.9	3.6×10^7

Tabel 2. Overzicht van de gemiddelde reflectiviteitswaarden binnen een straal van 10 km rond de +CG voor het systeem van 21 juli 2003 tussen 0:30 en 3:15 UTC. Legenda als in Tabel 1.

Als we voor elke +CG binnen een straal van 10 km naar de reflectiviteit van de radar kijken, blijkt uit Tabel 2 het volgende: de groep +CG's zonder sprites komt duidelijk het meest voor in de convectieve zone van het complex, met hogere maxima en lagere minima in dBZ dan die met sprites geassocieerd zijn, een hoger percentage waarden boven 40 dBZ (een arbitraire reflectiviteitsgrens tussen convectief en stratiform). De productie van neerslag is gemiddeld twee keer zo hoog voor normale +CG inslagen als voor de sprite-triggerende +CG inslag. Het valt op dat de inslagen van een sprite-producerende flash zich voordoen nabij de convectieve zone (23.9% convectief), en latere inslagen zich verder van de convectieve zone voordoen (4.9% convectief). Het lijkt er dus waarschijnlijk op dat een belangrijk deel van sprite-producerende ontladingen verband houdt met een kettingreactie van +CG's van de voorzijde naar de achterzijde van het MCS. Dit kan inhouden dat uitgestrekte horizontale ontladingen, 'spider lightning,' de +CG inslagen met elkaar verbinden. Uit eerder onderzoek (van der Velde et al., 2006) lieten VLF-radiosignalen van sprite-producerende positieve ontladingen zien dat er een grotere rol voor wolkontladingen is in verbinding met wortelvormige sprites dan met kolomvormige sprites.

Ontwikkeling van de neerslagzones

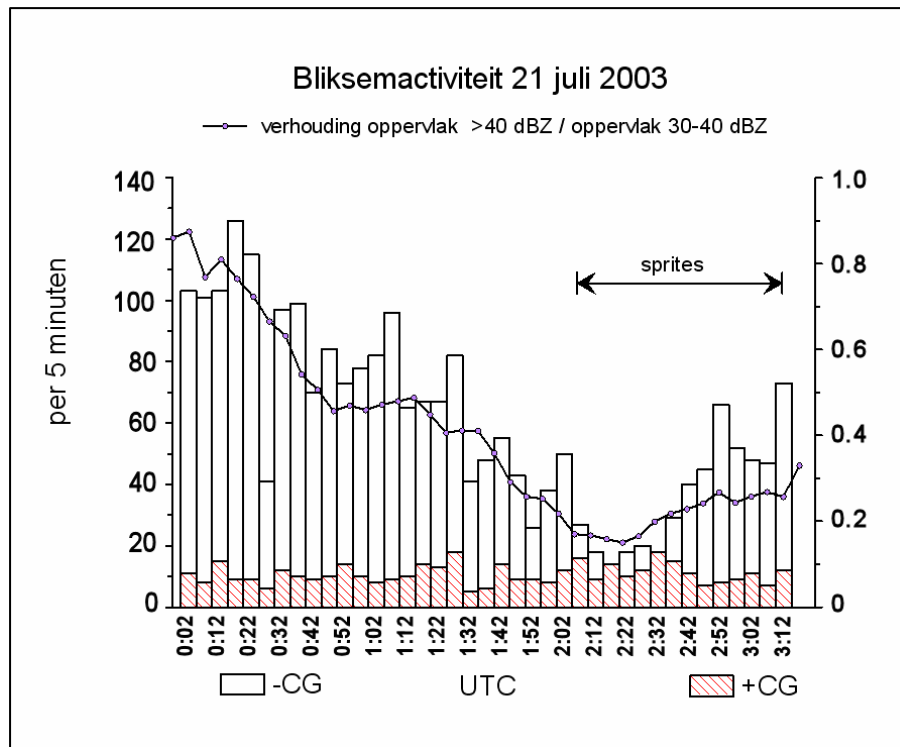
Een onweerssysteem is meestal al enkele uren actief voordat er sprites boven optreden. Hoe draagt de ontwikkeling van het MCS bij aan de productie ontladingen die sprites veroorzaken? We zagen al dat er een belangrijke hint het voorkomen van stratiforme neerslag is. Dit wordt ook bevestigd door het verloop van de oppervlakte van radar reflectiviteitszones met de tijd (figuur 3). Het systeem groeit van 12500 km² om 0:00 UTC tot ongeveer 30000 km² om 2:40 UTC. De groei is het sterkst in de klasse 30-40 dBZ, terwijl de convectieve neerslagzone van het systeem ongeveer gelijk blijft rond 3000 km². De groei van het gebied met 30-40 dBZ is het sterkst vanaf 1:40 UTC, en gaat samen met een verkleining (bijna een halvering) van de zone met reflectiviteiten boven 40 dBZ: een deel van de convectieve zone takelt sterk af. Dit geeft kennelijk aanleiding tot het optreden van sprites een half uur later (vanaf 2:05 UTC), wanneer de grootte van de convectieve zone een minimum heeft bereikt. Daarna neemt deze weer toe, door groei van nieuwe convectieve cellen aan de oostzijde en noordzijde, zonder dat de grootte van het stratiforme gebied van matige neerslag afneemt. Een stabiele convectieve zone is in evenwicht: nieuwe cellen ontstaan aan de voorzijde terwijl oude cellen verdwijnen aan de achterzijde en opgaan in de stratiforme neerslagzone, die daardoor groeit. Een snelle afname van de grootte van de convectieve zone betekent dat de voedende warme, vochtige lucht voor nieuwe cellen (tijdelijk) is afgesneden of uitgeput raakt en leidt tot snelle groei van de stratiforme neerslagzone.



Figuur 3. De evolutie van de grootte van het MCS van 21 juli 2003, verdeeld over verschillende reflectiviteitsklassen.

Ontwikkeling van +CG ontladingen

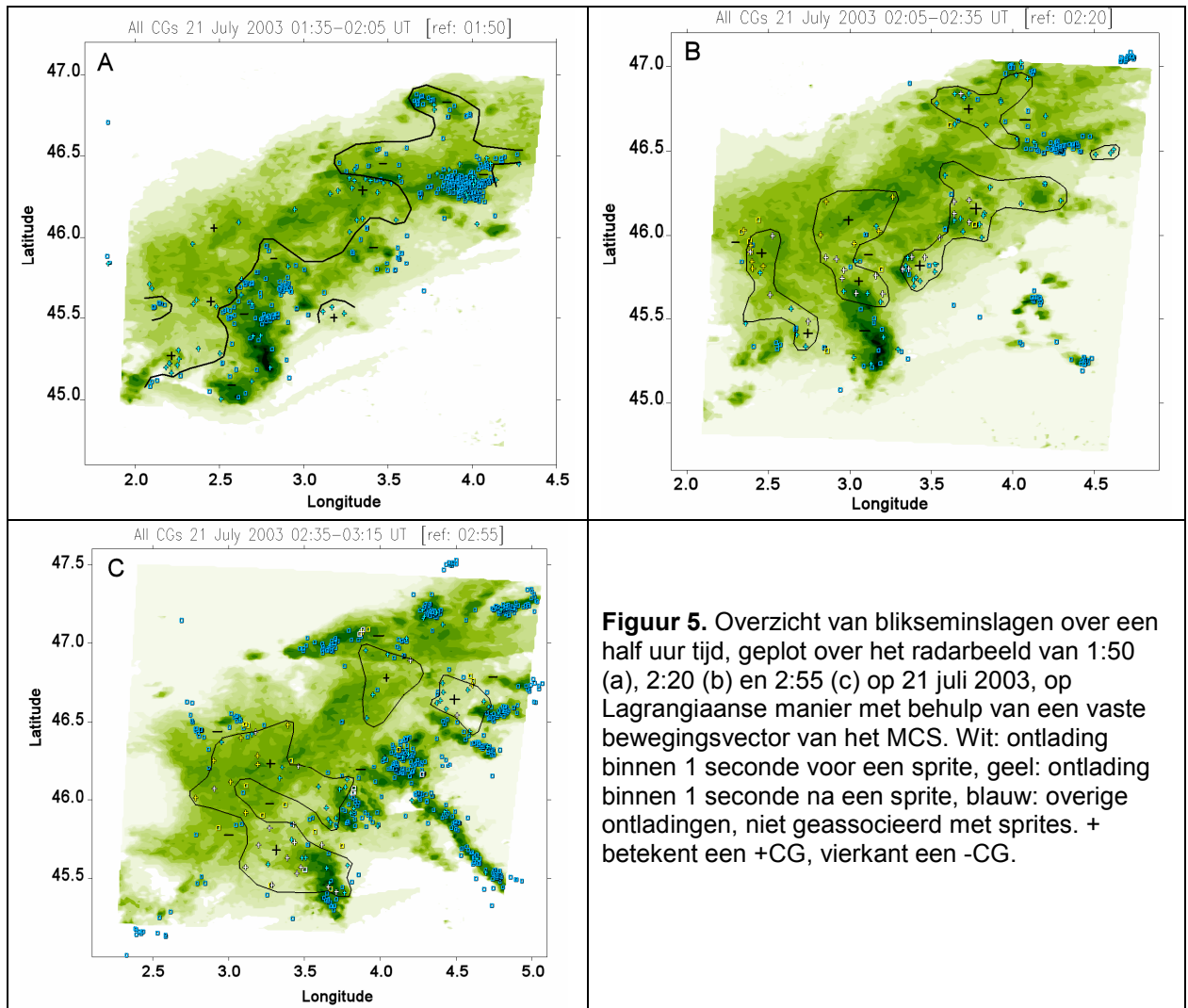
Het verloop van de bliksemactiviteit van het systeem (figuur 4) volgt een gelijksoortig patroon als de verhouding van de grootte van de stratiforme zone tot de grootte van de convectieve zone: het aantal -CG's per vijf minuten neemt af terwijl het aantal +CG ontladingen min of meer gelijk blijft gedurende de periode. De hoge correlatie is opmerkelijk. Er is dus geen toename van het aantal positieve ontladingen gedurende de levensloop van het MCS, slechts een afname van het aantal negatieve ontladingen.



Figuur 4. Bliksemactiviteitsverloop van het MCS van 21 juli 2003 van negatieve en positieve inslagen (per 5 minuten), en de verhouding stratiform tot convectief neerslaggebied.

Een andere inzicht-verschaffende methode is het plotten van een serie wel en niet sprite-veroorzakende ontladingen over een radarbeeld (figuur 5). Figuur 5a toont de bliksemactiviteit in het MCS van een half uur voordat de sprites worden waargenomen. Negatieve ontladingen zijn nog volop aanwezig in het systeem, terwijl de positieve ontladingen die voornamelijk voorkomen in het stratiforme neerslaggebied nog geen sprites veroorzaken. Een half uur later daarentegen (figuur 5b) hebben de negatieve ontladingen plaatsgemaakt voor positieve, waarvan een goed deel ook sprites produceert. Duidelijk zichtbaar is dat de ontladingen vlak na de sprite (geel) verder van de convectieve zone af inslaan dan de ontladingen voor de sprite (wit). Om 2:55 (figuur 5c) heeft een nieuwe zone van convectieve cellen zich gevormd, terwijl de sprites nog steeds geproduceerd worden door +CGs nabij de meest zuidelijke, in reflectiviteit afgenomen cellen.

Er lijkt een cyclus waarneembaar van de kern van de convectieve zone: om 1:50 heeft dat deel nauwelijks ontladingen maar een zeer hoge reflectiviteit (waarschijnlijk wel veel wolk-wolkontladingen). Om 2:20 komen er al meer -CG ontladingen voor, terwijl om 2:55 de reflectiviteit verzwakt is en er nu +CG en sprite-+CG ontladingen in voorkomen.



Conclusies

De belangrijkste factoren voor ontwikkeling van sprites in dit voorbeeld van een onweersysteem zijn de groei van de stratiforme neerslagzone en de snelle afname van een deel van de convectieve zone. De +CG ontladingen in dit deel staan vaak in verband met uitgestrekte horizontale ontladingen ('spider lightning') die van de convectieve neerslagzone naar de stratiforme neerslagzone kruipen en verkrijgen daardoor kennelijk de grote ladingsoverdracht die nodig is om sprites te produceren. Het is echter nog niet duidelijk of deze lading voornamelijk in de stratiforme neerslagzone gegenereerd wordt (in-situ), of dat er lading uit de convectieve zone betrokken is bij het ontstaan van de krachtige sprite-producerende +CG ontladingen. Het is eveneens nog onduidelijk waarom in hetzelfde neerslaggebied als sprite-producerende +CG ontladingen sommige +CG ontladingen toch geen sprites produceren. In een later onderzoek zal gekeken worden naar de processen van ladingsontwikkeling in dit MCS met behulp van een cloud-resolving model met een elektrificatie-module.

Literatuur

- Cummer, S.A. and W.A. Lyons, 2005: Implications of lightning charge moment changes for sprite initiation. *J. Geophys. Res.*, 110, A04304, doi:10.1029/2004JA010812.
- Van der Velde, O.A., en A. Mika, S. Soula, C. Haldoupis, T. Neubert, and U.S. Inan, 2006: Observations of the relationship between sprite morphology and in-cloud lightning processes. Geaccepteerd voor publicatie in *J. Geophys. Res. Atmospheres*.
- Wescott E.M., D.D. Sentman, M.J. Heavner, D.L. Hampton, D.L. Osborne and O.H. Vaughan, 1995: Preliminary results from the Sprites94 aircraft campaign 2, Blue jets. *Geophys. Res. Lett.*, 22, 1209-1212.
- Wilson, C. T. R., 1925: The electric field of a thundercloud and some of its effects, *Proc. Phys. Soc. London*, 37, 32D-37D.
- Eurosprite campagnes: <http://www.eurosprite.net>