

Bliksemactiviteit van onweersbuien in relatie tot omgevingseigenschappen en radarkenmerken

Oscar van der Velde

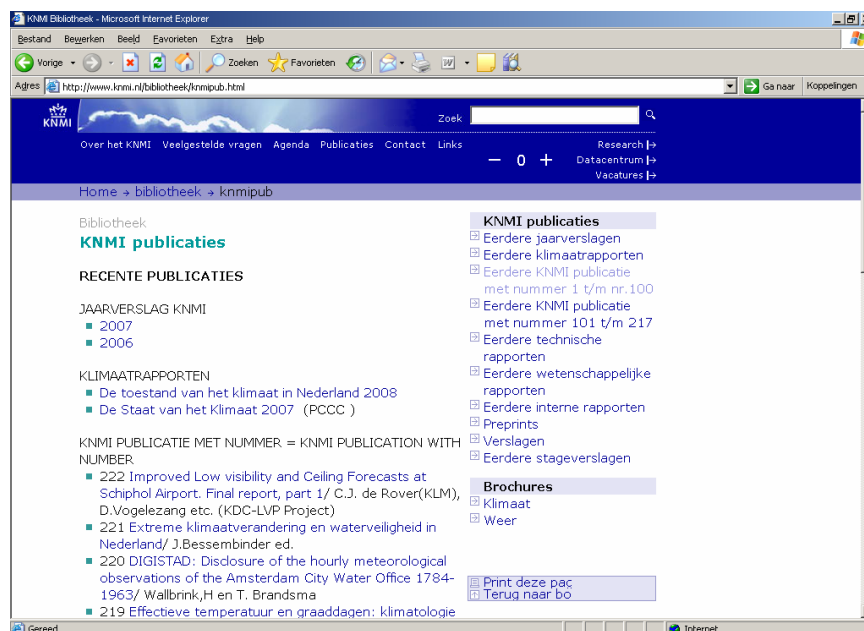
KNMI Intern rapport; IR 2000-06

[dit rapport verscheen eerder als Stageverslag en is in de reeks IR eerst in 2008 uitgegeven]

De Bilt, 2000

PO Box 201
3730 AE De Bilt
Wilhelminalaan 10
De Bilt
The Netherlands
<http://www.knmi.nl>
Telephone +31(0)30-220 69 11
Telefax +31(0)30-221 04 07

Author: Velde, O. van der

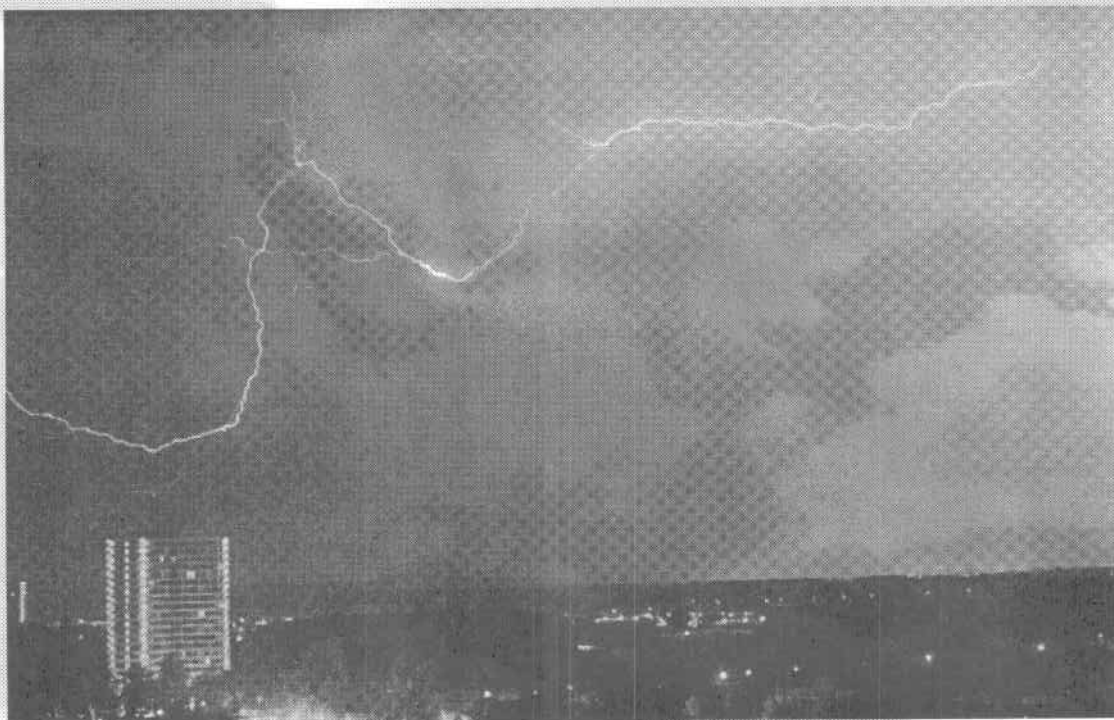


Please note:

All titles of KNMI-publications (and a full text PDF for the most recent ones) can be found on <http://www.knmi.nl/bibliotheek/knmipub.html>

Bliksemactiviteit van onweersbuien in relatie tot omgevingseigenschappen en radarkenmerken

Oscar van der Velde



Wageningen Universiteit

Doctoraalscriptie

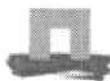
**Bliksemactiviteit van onweersbuien in relatie tot
omgevingseigenschappen en radarkenmerken**

Mei 2000

O.A. van der Velde

Reg.nr. 770128-862-100

Oscar.vanderVelde@95.student.wau.nl
<http://www.geocities.com/oscarvdvelde/Meteo.html>



Wageningen Universiteit
Sectie Meteorologie en Luchtkwaliteit

Begeleiding:

Iwan Holleman
Herman Wessels
Sylvia Barlag



Voorwoord

Beste lezer, in uw handen bevindt zich het verslag dat het resultaat is van mijn afstudeervak op het KNMI. In die tijd (september 1999 tot ongeveer mei 2000, het is iets uitgelopen) dat ik op het KNMI vertoefde, heb ik leuke contacten gehad en ook veel opgestoken: behalve over dit onderwerp, het verrichten van onderzoek en programmeren in C heb ik ook veel opgestoken over het onderzoek en de goede sfeer op het KNMI.

Mijn dank gaat met name uit naar Iwan Holleman en Herman Wessels voor de goeie begeleiding, en coördinerend "chefje" Sylvia Barlag. Verder natuurlijk de rest van de groep Satellietdata (SD), waarbij de koffiebijeenkomsten op maandagochtend altijd gezellig waren met als hoogtepunt het kerst-uitje. Ook verheugde ik mij altijd op de dinsdagochtend-weerpraatjes in de AMOR-kamer, door enkele meteorologen uit de weerkamer, "bij"gestaan door de HiRLAM-crew en andere geïnteresseerden.

Behalve voor mijn studie ben ik ook als hobby in de weer met onweer, vandaar dat dit afstudeervak mij zelden heeft verveeld en ik ben het KNMI dankbaar dat ik er aan dit interessante onderwerp heb mogen werken!

Oscar van der Velde

Voorpagina: foto van een wolk-wolk ontlading, in de nacht van 25 op 26 augustus 1999 (zie elders in dit verslag) te Wageningen. Links ging de ontlading het beeld uit en de wolk weer in. Meer foto's zijn te bezichtigen op <http://www.geocities.com/oscarvdvelde/Meteo.html>

Inhoudsopgave

1. Inleiding.....	2
1.1 Overzicht.....	2
1.2 Onderzoeksvragen.....	4
2. Methoden	6
2.1 Radar	6
2.1.1 Reflectiviteit op constante hoogte.....	7
2.1.2 Echotoppen	9
2.1.3 Vertically Integrated Liquid water.....	10
2.1.4 Verticale dwarsdoorsneden	10
2.2 Het SAFIR bliksemdetectiesysteem.....	11
2.2.1 Werking	12
2.2.2 Nauwkeurigheid	13
2.3 Werkwijze.....	15
2.3.1 Selectie van onweerssituaties	15
2.3.2 Verzameling en weergave van radar- en bliksemdata.....	16
2.3.3 Omgevingseigenschappen	18
2.3.4 Indeling in soorten onweersbuien	20
3. Cases.....	21
3.1 7 juli 1999: Een stationaire cel in een zeewindlijn	21
3.1.1 Overzicht	21
3.1.2 Waarnemingen van de onweersbuien	23
3.1.3 Analyse van bovenluchtwaarnemingen	24
3.1.4 Samenvatting van de ontwikkeling en de bliksemactiviteit van de onweersbui	27
3.1.5 Samenvatting van de opvallendste verschijnselen van deze case:	28
3.2 25 en 26 augustus 1999: Een klein mesoschaal convectief systeem (MCS) gevolgd door buienclusters	34
3.2.1 Overzicht	34
3.2.2 Waarnemingen van de onweersbuien	38
3.2.3 Analyse van de bovenluchtwaarnemingen	39
3.2.4 Samenvatting van de ontwikkeling en de bliksemactiviteit van het complex	41
3.2.5 Samenvatting van de opvallendste verschijnselen van deze case:	50
3.3 2 juni 1999: Ingebedde cellen in het warmtefront, een actieve cluster en een buienlijn	55
3.3.1 Overzicht	55
3.3.2 Waarnemingen van de onweersbuien	60
3.3.3 Analyse van de bovenluchtwaarnemingen	60
3.3.4 Samenvatting van de ontwikkelingen en de bliksemactiviteit van de onweersbuien	63
3.3.5 Samenvatting van de opvallendste verschijnselen van deze case:	79

4. Algemene relaties	81
4.1 Relaties tussen omgevingskenmerken en bliksemactiviteit	81
4.1.1 Onstabiliteit	81
4.1.2 Temperatuur op 700 hPa	83
4.1.3 Windschering	84
4.1.4 Vocht	86
4.1.5 Soort onweersbui	87
4.1.6 Conclusies	89
4.1.7 Discussie	89
4.2 Relaties tussen radarkenmerken en bliksemactiviteit	91
4.2.1 Grootte van de convectieve zone	91
4.2.2 Echotoppen	91
4.2.3 Vertically Integrated Liquid	94
4.2.4 Tijdsduur tussen begin, piek en eind van de bliksemactiviteit	94
4.2.5 Ruimtelijke samenhang tussen bliksemactiviteit en radarkenmerken	96
4.2.6 Conclusies	100
4.2.7 Discussie	101
4.2.8 Typisch verloop van de totale bliksemactiviteit gedurende de levenscyclus van een onweerscel	102
5. Eindconclusies en aanbevelingen	105
Aanbevelingen	108
6. Referentielijst	111
7. Bijlage	113
Synoptische situatie en het type onweersbuien	113
6 juni 1998	113
2 juni 1999	113
7 juni 1999	115
7 juli 1999	115
19 juli 1999	115
8 augustus 1999	115
25/26 augustus 1999, avond en nacht	116
26 augustus 1999, middag	116
6 september 1999	116
15 september 1999	116
24 september 1999	117

1. Inleiding

1.1 Overzicht

Een onweersbui is een gevaarlijk en boeiend weerfenomeen, dat ondanks jaren van onderzoek nog op veel punten weinig begrepen is.

Een onweersbui kan zich vormen als de lucht over een voldoende diepe laag potentieel onstabiel is. Dit is het geval als er zich onder in de troposfeer relatief warme lucht bevindt en hoger in de troposfeer relatief koude lucht. In de onderste luchtlagen moet de lucht bovendien vochtig zijn, zodat een opstijgende luchtbel snel verzadigd raakt en dan door het vrijkomen van condensatiewarmte warmer dan zijn omgeving kan worden. Het verschil tussen de temperatuur in de opstijgende luchtbel en die van de omgeving is bepalend voor de opwaartse kinetische energie (en snelheid) die het luchtpakketje krijgt. Daardoor blijft de luchtbel stijgen, totdat hij op een hoogte geraakt waar de omgevingstemperatuur hoger is dan die van de luchtbel. Vanaf dat moment neemt de stijgsnelheid af, waarbij de kinetische energie omgezet wordt in potentiële energie.

In de meeste gevallen is er een mechanisme nodig dat de onstabieleit doet vrijkomen. Dit gebeurt meestal bij lijnen van convergentie door zeewind of koele uitstroom uit andere buien, of dynamisch geforceerde stijgende bewegingen zoals bij een front of trog.

Vooraf de mate van onstabieleit en de hoeveelheid verticale windschering (het verloop van de windsnelheid en -richting met de hoogte) zijn van grote invloed op het soort onweersbuien dat kan ontstaan. De zwaardere onweersbuien vormen zich bij hogere onstabieleit en windschering.

Gedurende de opstijging van de lucht in de stijgstroom van de bui ontstaan er wolken- en neerslagdeeltjes. Afhankelijk van de temperatuur op die hoogte vormen zich regendruppels of ijskristallen. In het deel van de wolk waar er onderkoelde regendruppels samen met ijskristallen voorkomen en voldoende hoge stijgende bewegingen voorkomen vinden bepaalde interacties (botsingen en fase-overgangen) plaats tussen de verschillende hydrometeoren waardoor er positief en negatief geladen deeltjes ontstaan. Doordat de grotere, vallende druppels een negatieve lading krijgen en kleine, met de stijgende bewegingen meegevoerde ijsdeeltjes een positieve lading, verzamelt negatieve lading zich onder in de onweersbui en positieve lading in het aambeeld. Deze configuratie van ladingscentra wordt ook wel het dipoolmodel genoemd (zie Williams 1989).

Hoe het ladingsscheidingsproces precies verloopt is nog onbegrepen. In het algemeen (een overzicht is te vinden in MacGorman en Rust, 1998) wordt aangenomen dat de ladingsscheiding effectiever verloopt naarmate er grotere stijgende bewegingen voorkomen bij hogere concentraties van onderkoelde druppels en ijsdeeltjes, meestal op een niveau waar de temperatuur tussen de -15 en -40 graden Celsius ligt.

Als er genoeg lading is verzameld is het elektrisch veld zo hoog geworden dat er een soort vonk kan ontstaan, welke uitgroeit tot een bliksemontlading.

De bliksemontladingen vinden plaats tussen de diverse ladingscentra onderling (wolkontladingen, in het Engels cloud discharges of intracloud (IC) genoemd) en tussen (meestal) het onderste ladingscentrum en de aarde (wolk-aarde, in het Engels: cloud-to-ground of CG).

Het teken dat vaak bij wolk-aarde ontladingen vermeld wordt duidt op de lading van de wolk, die netto naar de aarde wordt overgebracht. Een positieve ontlading brengt dus netto altijd positieve lading over van de wolk naar de aarde, ongeacht de bewegingsrichting van de voorontlading (leader in het Engels). Ontladingen tussen wolk en aarde worden ook wel "verticale" ontladingen genoemd, al kunnen deze ook uit diagonale en horizontale delen bestaan. Op dezelfde wijze zijn wolkontladingen ("horizontale" ontladingen) meestal niet alleen horizontaal van aard.

Sinds eind jaren '80 zijn er bliksemdetectiesystemen in operationeel gebruik die de locatie van bliksemontladingen vastleggen en zo nauwkeurig zijn dat de bliksemactiviteit aan een zekere onweersbui, zoals waarneembaar met de buienradar, gekoppeld kan worden. Samen met de radargegevens bracht dit mogelijkheden tot het onderzoeken van de relaties tussen de bliksemactiviteit en de ontwikkelingen van zware onweersbuien, en ook met het optreden van bijvoorbeeld hagel en tornado's.

Het bliksemonderzoek beoogt, behalve het vergaren van kennis over de ontstaanswijze en het transport van elektrische ladingen in onweersbuien, ook het verbeteren van de verwachtingen van de ontwikkeling van onweersbuien op basis van het verloop van de bliksemactiviteit.

Uit het onderzoek bleek dat in zomerse onweersbuien positieve ontladingen veel minder vaak voorkomen dan negatieve ontladingen. In sommige onweersbuien komen echter, gedurende een bepaalde periode, meer positieve dan negatieve ontladingen voor (o.a. Stolzenburg, 1994). Dit waren zware onweersbuien, die hagel van grote afmetingen produceren, met zeer hoge echotoppen (16 km) en groeisnelheden.

Het meeste onderzoek heeft zich geconcentreerd op relaties tussen wolk-aarde bliksemactiviteit en het optreden van tornado's en zware hagel (bijv. Perez *et al.* 1997; Kane 1991; MacGorman en Burgess 1994). Changnon (1992) onderzocht de ruimtelijke en temporele relaties tussen hagelschade aan gewassen en verticale ontladingen en vond dat de ontladingen meestal buiten het hagelspoor inslaan aan enkele voorkeurszijden, meestal parallel aan het hagelspoor.

Ook is de bliksemactiviteit onderzocht in relatie tot het type supercell (Branick en Doswell 1992; Bluestein en MacGorman 1998) en met de horizontale structuur van mesoschaal convectieve systemen (o.a. Rutledge *et al.* 1990, Rutledge en Petersen 1994; Nielsen *et al.* 1994; Holle *et al.*, 1994). Hieruit blijkt dat in de stratiforme neerslaggebieden van mesoschaal convectieve systemen, positieve ontladingen overheersen, zij het met vrij lage activiteit. In de convectieve zones overheersen in het algemeen juist de negatieve ontladingen, die daar in grote getale voorkomen. Dit patroon wordt wel het bipoolpatroon genoemd. De positieve pool in het stratiforme deel van mesoschaal convectieve systemen wordt waarschijnlijk veroorzaakt door een combinatie van lokale ladingsscheidingsprocessen en advectie van lading afkomstig van de convectieve delen van het complex (bijv. Engholm *et al.* 1990, Rutledge *et al.* 1990).

De tot nu toe gebruikte bliksemdetectiesystemen zijn echter ontworpen om alleen

ontladingen weer te geven die tussen de wolk en de aarde voorkomen. Sinds kort zijn er ook bliksemdetectiesystemen in gebruik die mede ontworpen zijn om de ontladingen binnen in de onweersbui weer te geven. Het KNMI heeft in 1995 een dergelijk systeem in gebruik genomen. Wolkontladingen komen veel vaker en meestal eerder voor dan wolk-aarde ontladingen. De mogelijkheden voor het onderzoeken en monitoren van onweersbuien worden zo aanzienlijk vergroot. Het onderzoek met deze detectiesystemen is nog in een vroeg stadium. Voordat deze systemen beschikbaar waren is er in beperkte mate onderzoek gedaan naar de totale bliksemactiviteit met andere middelen. MacGorman *et al.* (1989) onderzochten de totale bliksemactiviteit in een mesocycloon (roterende stijgstroom) van een onweersbui met behulp van een L-band radar. Het gewone bliksemdetectiesysteem nam de verticale ontladingen waar. Uit deze studie bleek dat tijdens de onderzochte zware tornado de activiteit van wolkontladingen een piek vertoonde. MacGorman en Rust (1998) constateerden dat er meer variatie is in de relatie van tornado's met de activiteit van wolk-aarde ontladingen dan met de totale bliksemactiviteit. In Frankrijk onderzocht Richard (1992) een onweerscomplex nabij Parijs die tornado's en hagel voortbracht. De wolkontladingsactiviteit piekte sterk vlak voordat de tornado's optraden. Een tweede, nog sterkere piek trad op aan het eind van de tornadische- en downburstfase, en bereikte het maximum vlak voordat de bui grote hagelstenen produceerde.

Zware onweersbuien die gepaard gaan met noodweer lijken behalve een hoge bliksemactiviteit (vaak meer dan 1 flits per seconde) nog een kenmerk te hebben: een "sprong" van totale bliksemactiviteit, die toeneemt met 30-60 flitsen min^{-2} over tenminste twee minuten. Deze sprong kan mogelijk gebruikt worden om als waarschuwingssignaal voor tornado's te dienen (Goodman *et al.* 1999 ?).

Lang *et al.* (2000) onderzochten de hypothese van MacGorman *et al.* (1989) dat de activiteit en de verhouding tussen wolkontladingen en verticale ontladingen beïnvloed worden door de sterkte van de stijgende bewegingen. Later in deze scriptie wordt hier nader op ingegaan.

1.2 Onderzoeksvragen

Het is voor de korte-termijnverwachting van onweersbuien van belang om te weten wat voor type bui het is met de bijbehorende karakteristieke ontwikkeling, in welk ontwikkelingsstadium de bui verkeert en wanneer het grootste gevaar dreigt, in de vorm van hoge bliksemactiviteit, hagel of windstoten.

Deze scriptie probeert inzicht te geven in het verloop en de ruimtelijke verdeling van de totale bliksemactiviteit gedurende de levensloop van diverse typen onweersbuien.

Hierbij wordt gebruik gemaakt van de KNMI-radars in De Bilt en Den Helder en het SAFIR bliksemdetectiesysteem van het KNMI en de Koninklijke Luchtmacht, waaraan ook de antennes van het Belgische SAFIR-systeem gekoppeld zijn. Verder worden er grond- en bovenluchtwaarnemingen gebruikt om de onweersbuien in hun synoptische context te onderzoeken.

De onderzoeksvragen zijn:

- Wat zijn de algemene relaties tussen omgeving, type en radarkenmerken van een onweersbui en de bliksemactiviteit?
- Hoe verloopt de bliksemactiviteit gedurende de levensloop van onweersbuien en hoe is die ruimtelijk verdeeld?
- Is er op basis van de radar- en omgevingskenmerken van een onweersbui te voorspellen hoe de bliksemactiviteit zich ontwikkelt?

In de komende hoofdstukken wordt geprobeerd deze vragen te beantwoorden. Ook zullen er enkele onweerssituaties in detail besproken worden.

2. Methoden

Al eerste is er een computerprogramma geschreven waarmee de bliksemontladingen over de radarbeelden worden weergegeven in een Postscript bestand. Dit programma kan op elk gewenst deel van Nederland of België traploos inzoomen en telt daarbij het aantal bliksems en het percentage wolk-aarde en positieve ontladingen. Het is mogelijk om zo in te zoomen op een cel dat alleen de bliksemactiviteit van de betreffende cel geteld wordt.

Van de geselecteerde cellen worden zo over de levensloop de radarkenmerken en bliksemaantallen verzameld. De ontwikkelingen van de onweerscellen worden telkens per cel samengevat in een grafiek, waarin het verloop van de neerslagintensiteit en andere radarkenmerken tezamen met het verloop van bliksemactiviteit (met het aandeel wolk-aarde en positieve ontladingen) zijn weergegeven.

Ballonoplatingen (temps) verstrekken gegevens over het verticale verloop van temperatuur, vochtigheid en de wind in de omgeving van de onweersbuien. Deze informatie wordt gebruikt om algemene relaties te onderzoeken tussen de omgeving en de bliksemactiviteit van onweersbuien. Bij de in detail besproken situaties worden synops gebruikt om fronten, het windveld en mogelijk uitstroom van koude lucht uit buien te identificeren.

In de komende paragrafen wordt nader ingegaan op de herkomst, het gebruik en de onzekerheden van de gegevens.

2.1 Radar

Eind 1996 zijn in De Bilt en Den Helder nieuwe zogenaamde C-band (5 cm golflengte) radars geïnstalleerd. Deze bieden in principe ook Doppler windgegevens, maar deze faciliteit is ten tijde van dit onderzoek nog niet bruikbaar. De bundelbreedte is ongeveer 1 graad en er wordt operationeel gemeten over 14 elevaties. De maximale elevatiehoek is 12 graden. Deze grote volumemeting wordt een keer per kwartier verricht. Zo wordt informatie verkregen over de verticale opbouw van buien. Elke 5 minuten wordt een kleine volumemeting gedaan met 4 elevaties tot 3 graden.

De radargegevens bevatten een schat aan informatie. Het verloop in de tijd voegt nog meer waarde toe. Het meest bekende radarproduct is de neerslagintensiteit op een constante hoogte, maar er zijn nog enkele zeer bruikbare radarproducten: Vertically Integrated Liquid (VIL) en echotop hoogten. Deze worden hieronder besproken.

2.1.1 Reflectiviteit op constante hoogte

Dit bekende product geeft een beeld van de ruimtelijke verdeling van de neerslag, met bijbehorende intensiteit. De neerslagproducten van de radars van De Bilt en Den Helder zijn zogenaamde "pseudo-CAPPI"-producten. Dit staat voor pseudo Constant Altitude Plan Position Indicator. Hiervoor worden de scans met de 4 onderste elevaties (0.3, 1.1, 2.0 en 3.0 graden) gebruikt in plaats van die met 14 elevaties. Deze methode geeft een beeld van de reflectiviteit dat over een groot gedeelte van het beeld op dezelfde hoogte is gemeten.

Hieraan kan men zien hoe de horizontale structuur van de bui is. De onderverdeling van onweersbuien in de diverse typen kan in de meeste gevallen al geschieden op basis van het patroon van neerslagintensiteit.

De reflectiviteitsfactor Z hangt af van het aantal deeltjes in een volume en vooral van de grootte van die deeltjes, volgens de relatie:

$$Z = \sum_i n_i D_i^6,$$

waarbij n_i het aantal deeltjes per m^3 in de radarbundel en D_i de diameter van de deeltjes voorstelt.

$$Z(\text{dBZ}) = 10^{10} \log Z \quad (\text{in } \text{mm}^6 \text{ m}^{-3})$$

In dit onderzoek wordt voor de neerslagintensiteit geen mm h^{-1} gebruikt, maar de reflectiviteits eenheid dBZ. Deze kan eventueel wel gemakkelijk omgezet worden in mm h^{-1} :

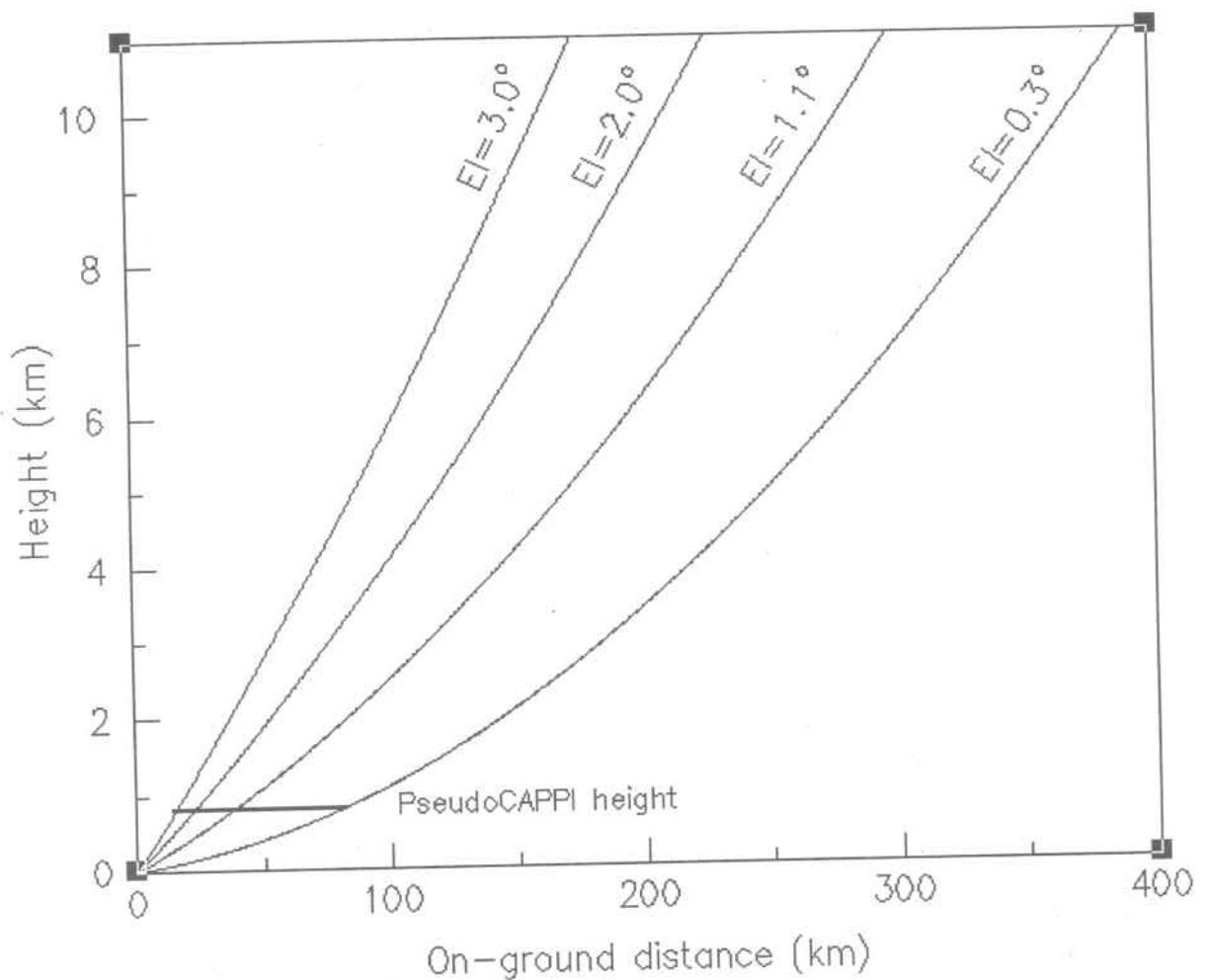
Z (dBZ):	7	15	23	31	39	47	55	63
R (mm h^{-1}):	0.1	0.3	1	3	10	30	100	
Ervaring:	licht	matig		zwaar		wolkbreuk		hagel

De hoogte van de horizontale doorsnede is ingesteld op 800 meter boven het aardoppervlak om over een zo groot mogelijk gebied behouden te kunnen blijven. Zie figuur 1. Dicht bij de radar wordt de 3.0 graden elevatiehoek gebruikt om het 800 meter-niveau te benaderen. Vanaf circa 15 km wordt er tussen de reflectiviteitswaarden van de elevatiehoeken lineair geïnterpoleerd. Verder dan zo'n 100 km wordt alleen de 0.3 graden elevatie gebruikt, die met toenemende afstand echter steeds hoger boven het aardoppervlak uitkomt door de aardkromming.

Bij een lager gekozen hoogte zou er meer kans zijn op grondecho's. Aan de andere kant is ook geen hogere doorsnede gekozen omdat de reflectiviteit op die hoogte een maat moet blijven voor de neerslagintensiteit recht daaronder aan de grond. Dit is niet het geval bij gebruik van een grotere hoogte als het stevig waait, of als de neerslag verdampt in een droge laag.

Een radar ontvangt ook valse echo's, "ground clutter" of grondecho's genaamd. Deze ontstaan in de omgeving van de radar door reflecties van de grond van de zijlobben van de radarbundel. Ook kunnen grondecho's op grote afstand van de radar ontstaan doordat radarstralen naar de grond worden afgebogen. De afbuiging wordt

Calculated height of radar beam



Figuur 1. De hoogte van de radarbundel ten opzichte van het aardoppervlak, als functie van de afstand tot de radar.

veroorzaakt door verandering van de brekingsindex door sterke temperatuurinversies en vochtigheidsverschillen in de luchtlaag waar de radarbundel doorheen gaat. Dit heet "anomalous propagation". Een voorbeeld hiervan zijn de grondecho's in het westen van Friesland bij warm zonnig weer als de radarbundel over het koele IJsselmeer gaat. Dit komt vooral voor in de lente. De grondecho's zijn effectief verwijderd door middel van onder andere enkele ingewikkelde statistische procedures, gebaseerd op karakteristieke standaarddeviaties van reflectiviteitssignalen tussen de opeenvolgende pulsen gedurende de passage van de radarbundel. Bij grondecho's fluctueert het signaal veel minder dan bij neerslagecho's.

De beelden van alle radarproducten zijn van de radiale projectie omgezet in een polair stereografische projectie, met pixels van ongeveer constante afmetingen (2.4 bij 2.4 km). Op korte afstand van de radar valt de hoge resolutie hier in weg, terwijl op grote afstand van de radar de feitelijke resolutie lager is dan het aantal pixels doet vermoeden. De pseudoCAPPI-beelden beslaan 256 bij 256 pixels. Elke

pixel heeft een reflectiviteitswaarde op de halve dBZ nauwkeurig. Bij de gebruikte beelden is echter een indeling gemaakt in klassen van elk 8 dBZ, waarbij twee stapjes 10x zoveel neerslagintensiteit inhoudt.

Er zijn twee datatypen in gebruik: het onderzoeksdatatype en het "publieke" datatype, het zogenaamde ERAS-formaat. Dit formaat wordt door de Klimatologische Dienst opgeslagen en is dus over een lange tijd continu beschikbaar. De beelden in dit formaat worden ook naar de buitenwereld verspreid. Deze beelden beslaan een gebied van 200 bij 200 pixels en zijn samengesteld uit de beide radars van De Bilt en Den Helder.

De beelden zijn als volgt samengesteld: binnen een straal van circa 15 km rondom een radar worden volledig de gegevens van de andere radar gebruikt. Dit is gedaan omdat de elevatie van 3.0 graden binnen die straal nog niet op 800 meter hoogte komt en grondecho's kan tonen. Buiten de straal van 15 km wordt een wegingsfactor gebruikt die voor de betreffende radar oploopt met de straal. Op grote afstand van de radar, buiten een straal van 50 km, geldt de hoogste van de twee reflectiviteiten. Een eventueel probleem van te zwakke echo's door uitdoving van radarstraling achter een zware neerslagkern van de ene radar wordt dan opgevangen door de andere, niet of slechts weinig verzwakte radar.

De ERAS-beelden kennen zeven reflectiviteitsklassen, waarbij de hoogste klasse overeenkomt met 47 dBZ. Het nadeel hiervan is dat waardevolle informatie binnen de zware radarecho's verloren gaat. De pseudoCAPPI beelden van de afzonderlijke radars laten regelmatig echosterkten zien van >55 dBZ en soms zelfs >63 dBZ.

Op grotere afstand van de radar is de bundelbreedte groot en is de radarstraling zwakker. Hiervoor is gecorrigeerd.

2.1.2 Echotoppen

De radarechotoppen geven informatie over de hoogte van een onweersbui en de uitgestrektheid van het aambeeld.

Dit product wordt afgeleid uit de grote volumemeting. In een volumebestand zit alle informatie die verkregen is uit de radarscans op 14 verschillende elevaties.

Om een echotoppenproduct te verkrijgen wordt in het gehele gebied van bovenaf gezocht naar een reflectiviteit van minstens 7 dBZ oftewel 0.1 mm h^{-1} . De bijbehorende hoogte is dan de waarde van de echotop. Hierbij is er gecorrigeerd voor fouten die kunnen ontstaan door zijlobben van de radarbundel, en de bundelbreedte.

De echotoppen zijn dichtbij de radar niet te gebruiken, daar de onweersbuien dan hoger reiken dan bereikt kan worden op de hoogste elevatie scan. Dit is op echotopbeelden gemakkelijk te herkennen als een kring met oplopende echotopwaarden met toenemende afstand van de betreffende radar. In dat geval is het zaak om de echotoppen van de andere radar te bekijken. Het onlangs ontwikkelde gemengd echotoppenproduct was in dit onderzoek nog niet beschikbaar. De afstand van de radar waarop de echotoppen kunnen worden gebruikt hangt natuurlijk van de buien af, maar de meeste Nederlandse buien hebben echotoppen lager dan 15 km. Bij een maximale elevatiehoek van 12 graden kan vanaf zo'n 60 km afstand van de radar dus van

praktisch alle onweersbuien de echotop bepaald worden. Op grote afstanden van de radar is de nauwkeurigheid echter minder door de grotere breedte van de radarbundel.

In de ERAS-beelden zijn de 4 hoogste echotoppen opgeslagen, één per regio.

2.1.3 Vertically Integrated Liquid water

Het VIL-product (Vertically Integrated Liquid water) geeft informatie over de hoeveelheid water die zich boven het aardoppervlak in een verticale kolom van één vierkante meter doorsnede bevindt, uitgedrukt in kilogram per vierkante meter. Dit staat gelijk aan het aantal millimeters neerslag als de inhoud van de hele kolom op aarde terecht zou komen. Hoewel de naam vloeibaar water doet vermoeden, is ook water in de vorm van ijs inbegrepen. De VIL wordt namelijk afgeleid door uit een groot volumebestand alle reflectiviteit in de verticaal op te tellen. Ook ijs (hagel, sneeuw) geeft reflectiviteit.

Reflectiviteit is evenredig met het aantal deeltjes en zesde macht van de grootte van de deeltjes in een bepaald volume. Een beperkende factor bij de bepaling van VIL is het aantal elevatiehoeken. Op grote afstanden van de radar beslaat de bui alleen de onderste paar elevaties. Het onderste deel van de bui kan zich zelfs onder de horizon bevinden, dus nog onder de laagste elevatie. Hier wordt wel enigszins voor gecorrigeerd. De bepaling van VIL uit slechts een paar elevaties is natuurlijk erg onnauwkeurig.

Dicht bij de radar ligt de top van de bui hoger dan op de hoogste elevatie kan worden bereikt. De rest van de bui wordt echter wel in groot detail gescand. De optimale afstand is die waar nog net de top van de onweersbui met de hoogste elevatiehoek gescand kan worden, in veel gevallen dus zo'n 50 km afstand van de radar. Met 14 elevatiehoeken wordt in de verticaal zo per kilometer nauwkeurig de te integreren reflectiviteit bepaald.

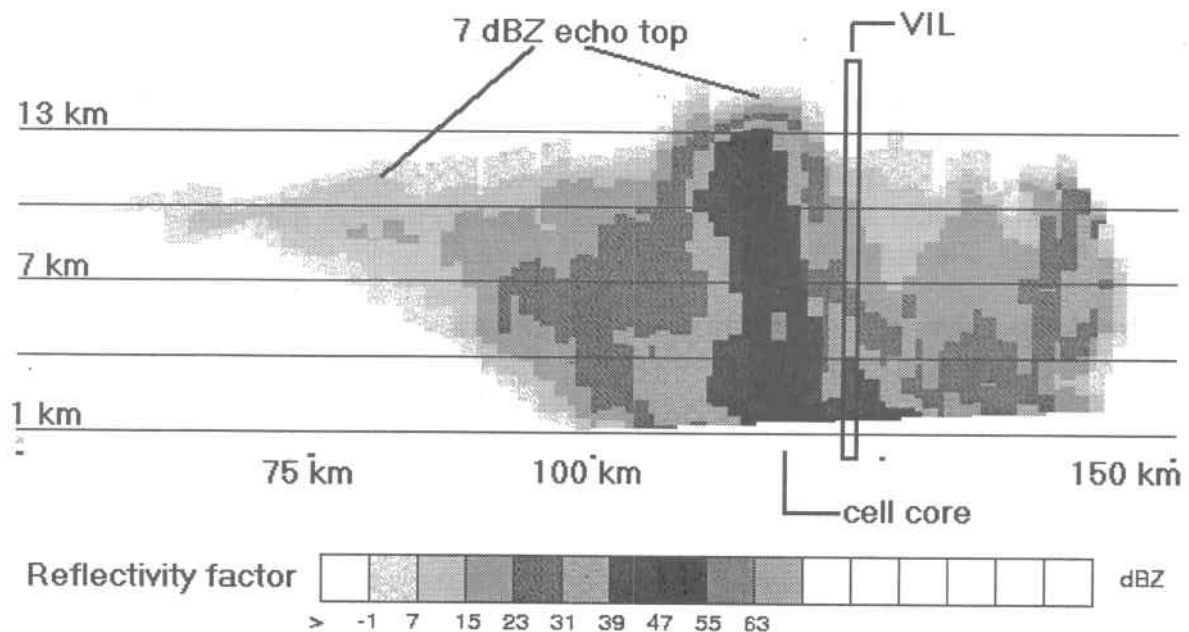
Een onderschatting van VIL treedt op als de buien zich snel verplaatsen gedurende de scantijd.

In de praktijk stelt VIL de diepte van een kern van hoge reflectiviteit voor. De maximale VIL hangt uiteraard ook van de echotophoogte af, maar een bui met een hoge echotop hoeft geen hoge VIL te hebben. Een cel wordt gekenmerkt door een hoge zuil van hoge reflectiviteiten, vandaar dat de VIL een uitstekend hulpmiddel is voor het volgen van individuele cellen. Ook is het een maat voor het potentieel ("zwaarte") van een cel, want de hoeveelheid water is uit de grenslaag mee omhoog gevoerd in de stijgstroom. Het grootste deel zal ook weer terechtkomen op aarde. Daarmee is het een maat voor de sterkte van stijgstroom en de potentiële neerslagproductie van onweersbuien.

2.1.4 Verticale dwarsdoorsneden

Behalve de bovengenoemde radarproducten kunnen er ook verticale dwarsdoorsneden door buien gemaakt worden als er grote volumebestanden beschikbaar zijn. Deze kunnen aanvullende informatie verschaffen over de structuur van onweersbuien, bijvoorbeeld of er Weak Echo Regions (een zone met lage concentraties van hydrometeoren met daarboven hoge concentraties (echo

overhang), indicatief voor sterke stijgende bewegingen) en de vorming van nieuwe cellen. Het geeft ook een visueel aantrekkelijke voorstelling van de bui, met vaak een duidelijk aambeeld en diepe celkernen.



Figuur 2. Voorbeeld van een verticale dwarsdoorsnede en de bepaling van de echotoppen en VIL. De lichtere tint in de kern staat voor een reflectiviteitsfactor van >55 dBZ. De dwarsdoorsnede betreft de zware onweersbui van 25 augustus 1999 om 22:34h UTC, over de azimuth van 228° vanuit De Bilt.

2.2 Het SAFIR bliksemdetectiesysteem

Het KNMI heeft in 1995 samen met de Koninklijke Luchtmacht het in Frankrijk ontwikkelde SAFIR bliksemdetectiesysteem aangeschaft. Voorheen werd het zogenaamde Time-of-Arrival systeem van de KEMA gebruikt.

SAFIR staat voor "Surveillance et Alerte de Foudre par Interférométrie Radioélectrique", vertaald als "waarneming en waarschuwing voor bliksem door middel van radio interferometrie".

Wolkontladingen zenden radiosignalen uit die bestaan uit een serie golfjes.

Ontladingen naar de aarde zijn krachtiger en veroorzaken een radiopuls.

Conventionele bliksemdetectiesystemen verwerken radiopulsen en zijn daardoor vooral geschikt voor het detecteren van ontladingen tussen wolk en aarde. Veel wolkontladingen worden door deze systemen gemist.

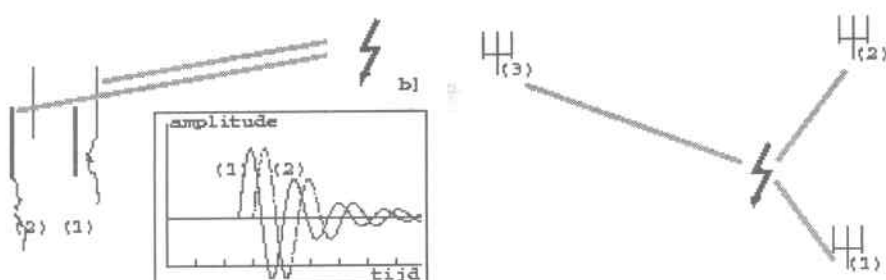
Het SAFIR-systeem verwerkt radiogolfpatronen en is daardoor met name geschikt voor het detecteren van wolkontladingen.

2.2.1 Werking

Verspreid over Nederland en België staan er 6 antennes (sinds januari 2000 is een zevende mast geplaatst bij Hogeveen). De afstand tussen de antennes is gemiddeld zo'n 100 kilometer. Zie figuur 4 voor de ligging van de antennes.

Elke mast is 17.5 meter hoog en bevat een GPS antenne voor de tijdmeting tot op 1 microseconde nauwkeurig, twee gekruisde antenneparen voor de richtingsbepaling en een antenne voor het onderscheid tussen wolkontladingen en wolk-aarde ontladingen (positief en negatief). De laatste ontvangt lange golven met frequenties onder 4 MHz. Zie figuur 3.

De verticale antennes in een paar staan op een kwart golflengte afstand van elkaar en meten bliksemsignalen in een smalle VHF frequentieband, rondom 110 MHz. Deze band wordt vrijgehouden van radioverkeer. Een bliksemsignaal uit een bepaalde richting komt net iets eerder aan op de ene antenne van het paar dan op de andere. Dit is te meten als een faseverschil op de ontvangen golf. Het faseverschil is het grootst als de ontlading zich in het verlengde van de twee antennes van een paar (op één mast) voordoet. De hoekmeting is in dat geval echter onnauwkeurig. Het andere antennepaar op de mast geeft uitsluitel over de richting. Deze informatie gaat naar de centrale processor. Deze vergelijkt de metingen van meerdere masten die verspreid over het land staan opgesteld.



Figuur 3. Principe interferometrie. De antennes links bevinden zich op één mast.

Door kruispeilingen van twee stations wordt de locatie verkregen van de ontlading. Onbetrouwbare en te zwakke signalen worden niet verwerkt. Een station verwerkt geen signalen die dichterbij zijn dan 20 km of verder dan 250 kilometer. Signalen mogen niet op de lijn tussen twee masten liggen: de lijnen van antenne naar de bliksemlocatie moeten elkaar kruisen met een hoek van tenminste 15 graden. Als dat niet het geval is wordt een ander station gebruikt voor de peiling. Punten worden aan hetzelfde bliksemkanaal toegeschreven als zij elkaar opvolgen binnen 0.5 milliseconden en minder dan 7 km van elkaar verwijderd zijn. Anders worden zij geclassificeerd als geïsoleerde bronnen. Bij wolkontladingen worden ook de horizontale dimensies opgeslagen.

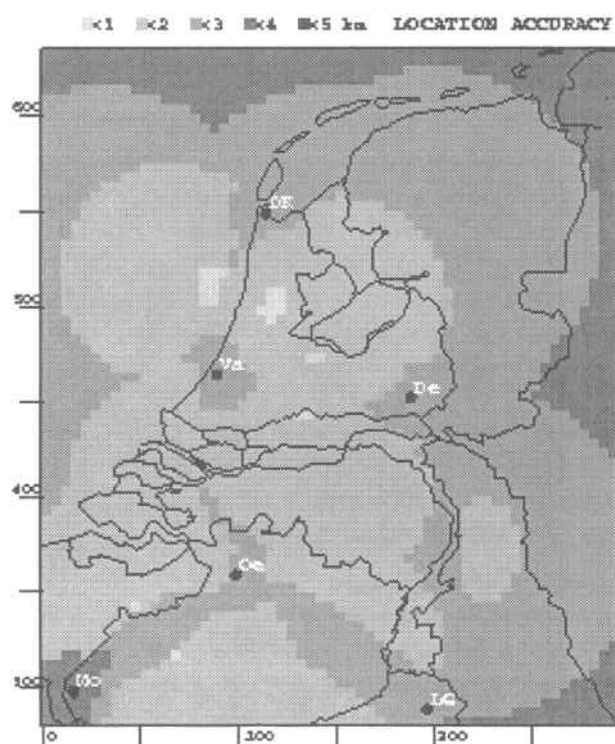
Als laatste worden de discriminatiegegevens uit het langgolvige signaal vergeleken met de locatiegegevens. Als deze qua tijd met elkaar kloppen, wordt op basis van de amplitude en stijg- en daaltijd van het signaal bepaald of het een wolkontlading of een wolk-aarde bliksem is en wat voor teken het in dat geval heeft. Het besluit wordt

voornamelijk genomen op basis van een daaltijdgrens van 15.5 microseconde. De daaltijd is voor wolk-aarde ontladingen meestal langer omdat het herstel van de ladingsverdeling langer duurt.

Uit de golfpatronen kunnen verder nog grootheden als stroomsterkte en ladingsoverdracht bepaald worden. Deze worden in dit onderzoek niet gebruikt.

2.2.2 Nauwkeurigheid

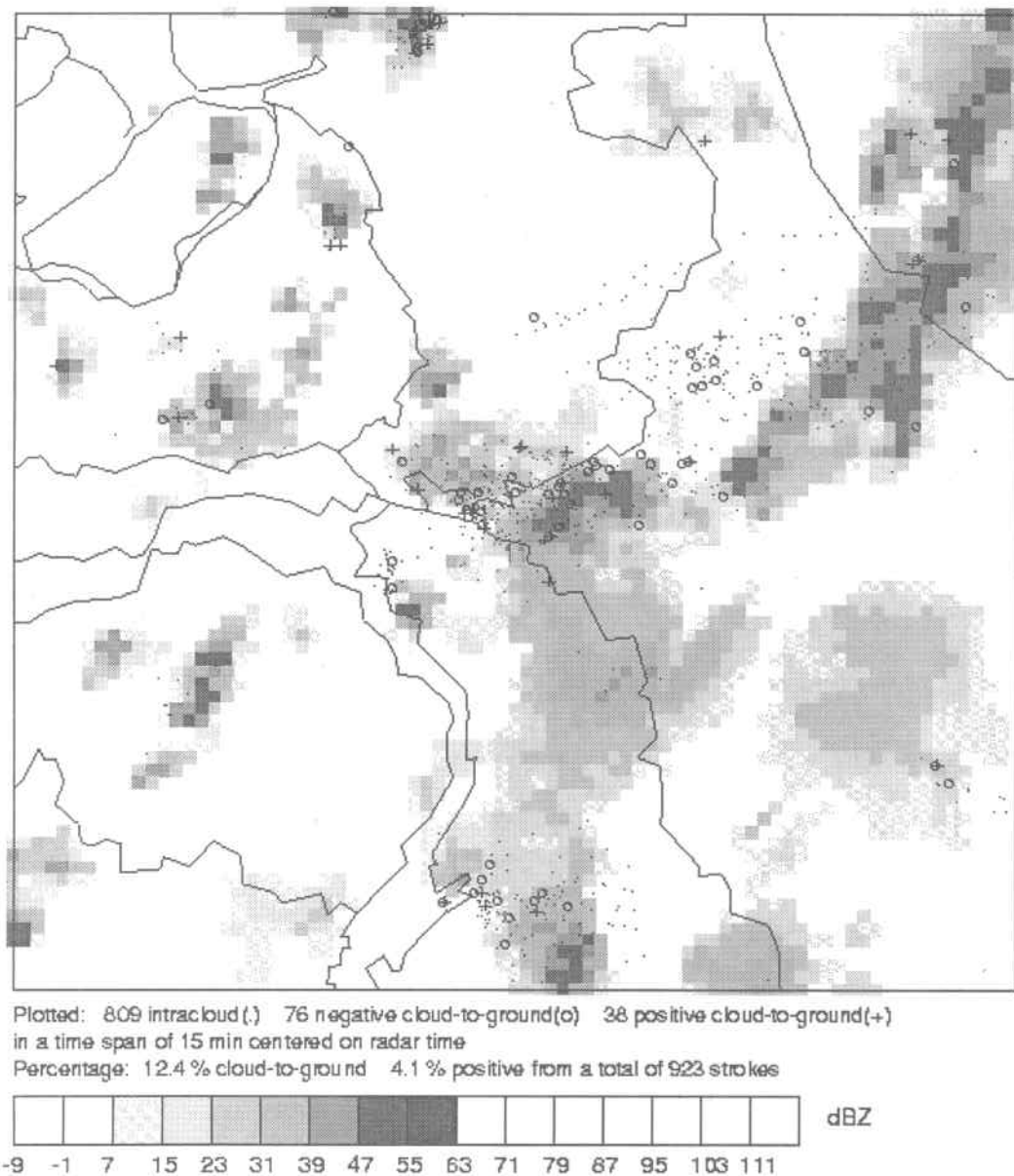
De nauwkeurigheid van het SAFIR systeem is door Wessels (1998) onderzocht. De plaatsnauwkeurigheid heeft gemiddeld over het detectiegebied een standaardafwijking van 2.6 kilometer. De detectiewaarschijnlijkheid en nauwkeurigheid neemt snel af als de op een na verste antenne meer dan 160 km van de ontlading verwijderd is, omdat VHF golven zich niet voorbij de horizon voortplanten. De 4 km locatienauwkeurigheidsgrens ligt net aan de oostgrens bij Twente en het noordoostpuntje van Groningen. Daar wordt circa 50% van de bliksemactiviteit gedetecteerd.



Figuur 4. Uit: Wessels (1998). Positie van de antennes en de berekende detectienauwkeurigheid (en – waarschijnlijkheid).

De onnauwkeurigheid uit zich soms in duidelijk zichtbare patronen: regelmatig komt het voor dat bij onweersbuien net over de grens in Duitsland een soort uitwaaiende straal van bliksems vanuit de antenne bij Deelen (NW van Arnhem) over de Achterhoek loopt richting de buien in Duitsland. Soortgelijke patronen treden soms op andere plaatsen op. Een voorbeeld ervan is te zien in figuur 5 op de volgende pagina.

SAFIR CG + IC Reflectivity 990719 16:15 UTC



Figuur 5. Voorbeeld van het straafeffect bij onweersbuien die in een slecht gedetecteerd gebied liggen (Duitsland).

De nauwkeurigheid is in goed tot redelijk gedetecteerde gebieden in ieder geval voldoende om een concentratie van bliksemactiviteit aan één bepaalde cel toe te schrijven.

Factoren die de plaatsnauwkeurigheid bepalen zijn onder andere: plaatsafhankelijke factoren, zoals afwijkingen in de antenneopstelling en buiging van radiogolven rondom gebouwen bij de mast; temperatuurinvloeden op de antennes; het niet verticaal zijn van een bliksemkanaal; digitalisatie van de hoek met een stapgrootte van 0.7 graden.

Het onderscheid tussen wolkontladingen en verticale ontladingen is ook lang niet waterdicht, omdat er veel ontladingen zijn die daaltijden hebben die rondom de 15.5 microseconde-beslissingsgrens vallen. Het onderscheid positief-negatief bij verticale ontladingen is ook weinig betrouwbaar. Er zijn ook nog een-punts signalen, deze zijn in dit onderzoek geclassificeerd als wolkontladingen.

De bliksemparameters als stroomsterkte en multiplicitéit worden hier niet gebruikt. Deze parameters zijn weinig betrouwbaar en het nut is beperkt.

Voor individuele ontladingen is het onderscheid dus niet echt bruikbaar. De drempelwaarde zullen echter wel statistisch goed gekozen zijn, zodat de fractie van een bepaald type ontladingen betrouwbaarder is over een groter aantal bliksems. Bovendien treden er tussen buien onderling, en over vaste delen van het detectiegebied in de tijd, grote verschillen op in de fracties van de soorten bliksemontladingen.

2.3 Werkwijze

2.3.1 Selectie van onweerssituaties

De eerste stap is het selecteren van geschikte onweersbuien. De gebruikte onweerssituaties zijn geselecteerd op:

- hoge activiteit
- beschikbaarheid van data
- ligging in goed bliksemdetectiegebied gedurende een groot deel van de levensloop
- mogelijkheid om afzonderlijke cellen te onderscheiden.
- variatie in soorten onweersbuien
- variatie in het percentage wolk-aarde ontladingen ten opzichte van de totale activiteit

Zo zijn er enkele zeer actieve onweerssituaties (bijv. 4/5 juli 1999, 29 mei 1999, 30 mei 1999) niet behandeld omdat ze te oostelijk voorkwamen of dat de cellen wisselend samensmolten, dan weer los te volgen waren en niet de gehele levensloop te volgen was. In enkele gevallen waren de radargegevens gedurende een deel van de levensloop niet voorhanden.

Er zijn in totaal 48 cellen en complexen onderzocht, verspreid over 11 dagen. Een beknopte beschrijving van deze situaties en cellen wordt gegeven in de bijlage.

De meeste behandelde onweersbuien hebben een hoge activiteit, zodat er betrouwbaarder uitspraken gedaan kunnen worden over percentages wolk-aarde en positief-negatief, en trends daarin.

De beschikbaarheid van data is als volgt: vóór 1 augustus 1999 is er een keer per uur een pseudoCAPPI, echotoppen en VIL-beeld beschikbaar, van beide radars. De pseudoCAPPI-beelden worden aangevuld met kwartierlijkse ERAS-beelden. De echotoppen worden waar mogelijk aangevuld met de echotoppen uit de ERAS-beelden.

Vóór half mei 1999 is er geen echotop- en VIL-product beschikbaar, alleen de 4 hoogste echotoppen uit de ERAS-beelden. Vanaf 1 augustus 1999 is alle kwartierlijkse radardata opgeslagen. Op 15 september 1999 was de radar van De Bilt tijdelijk uit de lucht en waren alleen de radar van Den Helder samen met (gebrekkige) ERAS-beelden beschikbaar.

In de meeste gevallen trekken de buien door redelijk tot goed gedetecteerde gebieden. Het uitsluiten van buien buiten het meest ideale detectiegebied zou het aantal te behandelen onweersbuien drastisch inperken.

Een variatie in soorten onweersbuien en percentage wolk-aarde ontladingen is nodig om iets te kunnen zeggen over onderlinge relaties tussen omgeving, radarkenmerken en de bliksemactiviteit.

Waar mogelijk zijn er individuele cellen behandeld, in de vorm van een losse cel dan wel als deel van een cluster. Dit heeft als voordeel dat slechts één cyclus tegelijk wordt bekeken en onderlinge relaties betrouwbaarder worden. In sommige gevallen is echter de hele cluster behandeld.

2.3.2 Verzameling en weergave van radar- en bliksemdata

Om alle gegevens te verzamelen is eerst een computerprogramma geschreven dat de radarproducten en SAFIR bliksemgegevens inleest en weergeeft in een Postscript-bestand met een kaart als achtergrond. Het programma kan traploos inzoomen op een bepaald gebiedje, waarin dan de bliksems (afzonderlijke strokes) worden geteld. Strokes zijn deelontladingen van een gehele bliksemflits (flash). Het aantal deelontladingen per bliksemflits wordt multiplicitéit genoemd.

Om de ontwikkelingen van de bui op een kwantitatieve manier te beschrijven, worden de radar- en bliksemkenmerken gedurende de ontwikkeling genoteerd en in een grafiek tegen de tijd uitgezet. Deze radarkenmerken zijn de maximale VIL, de hoogste echotop en de grootte van het gebied dat een reflectiviteit heeft die groter is dan 39 dBZ (afgerond naar 40 dBZ). De waarde van 40 dBZ is gekozen omdat deze vaak een maat is voor de grootte van de convectieve zone. De convectieve zone is het deel van de bui waar grote stijgende bewegingen voorkomen, daar zijn de neerslagintensiteit en de intensiteitsgradiënten het grootst. Een groot onweercomplex heeft vaak ook een uitgestrekte stratiforme zone, meestal aan de achterzijde van de convectieve zone. Hierin is de neerslagintensiteit matig en zijn de gradiënten en verticale bewegingen klein, terwijl de verticale structuur gelaagd is.

Een hogere waarde kan worden gebruikt bij zware complexen, maar voor cellen laat zo'n waarde weinig speling over. In de praktijk wordt 40 dBZ ook wel als indicator voor onweersactiviteit gebruikt.

Een geschikte cel wordt gedurende zijn verplaatsing gevolgd, waarbij de ontladingen geteld worden door zo in te zoomen dat steeds alleen de ontladingen van de betreffende cel in het zoomgebied vallen. Dit wordt moeilijker bij cellen die zich dicht bij elkaar bevinden. Met enige subjectiviteit is dan een grens getrokken. De activiteit is in het grensgebied tussen twee cellen doorgaans niet hoog, zodat de fout ten opzichte van het totaal klein zal zijn. Bij clusters waarbij het bliksempatroon van de cellen met elkaar verweven is, is gekozen voor een aanpak waarbij de totalen van de gehele cluster verzameld worden. Door de verschillende levensstadia van de afzonderlijke cellen in de cluster kunnen bepaalde kenmerken wegvallen in het totaal. Bij grote clusters is de relatie tussen de grootte van de convectieve zone en de totale bliksemactiviteit betrouwbaarder dan die van VIL en echotoppen met de bliksemactiviteit, omdat de cel die de bliksemactiviteit domineert niet persé de hoogste VIL en echotoppen van de cluster hoeft te hebben.

De bliksemactiviteit wordt steeds om de 15 minuten verzameld (tegelijk met de reflectiviteit) en bevat dan 15 minuten aan bliksemactiviteit, 7.5 minuut voor en na de radartijd. Kleinere fluctuaties en het precieze tijdstip van de piek zijn dus niet af te leiden.

De pixels met een reflectiviteit groter dan 39 dBZ worden handmatig geteld. In veel gevallen heeft Den Helder meer pixels boven die waarde dan De Bilt. Een verschil van 10 pixels voor de grotere cellen is niet ongewoon. Als ERAS beschikbaar is zijn daar de pixels van geteld. Steeds is het hoogste aantal gevonden pixels genoteerd, hoewel de neerslagdichtheid die daarbij hoort zich (op grotere afstand van de betreffende radar) op grotere hoogte boven het aardoppervlak kan hebben bevonden.

Bij grote complexen neemt de neerslagintensiteit in de stratiforme neerslagzone aan het eind van de levensloop toe, de 40 dBZ overschrijdend. Dan is die grens niet meer een maat voor de productie van de convectieve zone.

Het is niet geheel uit te sluiten dat bij de grotere complexen soms fouten in het tellen zijn geslopen, maar het verschil tussen de radars is minstens zo groot.

De maximale echotop is meestal de hoogste van de twee radars, maar bij een groot verschil tussen de radars is het gemiddelde genomen. Voor de gevallen van voor augustus 1999 zijn (indien bij die bui aanwezig) de toppen uit ERAS gebruikt om gaten tussen de uurlijkse echotopplaatjes op te vullen. Uiteraard is er rekening gehouden met de afstand tot de radar bij het bepalen van de toppen. De bepaling is tot op 1 km nauwkeurig in de hoogte en de ondergrens van een schaaldeel is gehanteerd als waarde.

De maximale VIL die is gebruikt, is simpelweg de maximaal gevonden waarde van de twee radars, omdat de VIL in de meeste gevallen onderschat wordt. Ook hier is de ondergrens van het schaaldeel als de waarde gehanteerd.

Bij clusters van meerdere cellen geldt de hoogste echotop en de hoogste VIL-waarde van de cluster.

Er is geen correctie uitgevoerd voor afzwakking van de radarbundel of lokaal verminderde detectie.

2.3.3 Omgevingseigenschappen

Om relaties tussen bliksemactiviteit en de algemene omgevingskenmerken, zijn radiosondegegevens uit de omgeving van de onweersbuien verzameld. De stations zijn meestal De Bilt, Ukkel en St. Hubert en soms Herstmonceux, Essen en Emden. De verzamelde gegevens zijn:

- onstabiliteit: CAPE, Boyden index en K-index
- temperatuur op 700 hPa
- vocht op middelbaar niveau: inbegrepen in K-index
- windschering: BRN shear

Met behulp van het radiosonde-analyseprogramma RAOB worden deze gegevens verzameld.

De CAPE (Convectively Available Potential Energy) stelt fysisch de energie voor dat een luchtpakketje krijgt als het vanaf het niveau van vrije convectie stijgt door het vrijkomen van condensatiewarmte, tot het tenslotte een hoogte bereikt waar de omgevingstemperatuur niet langer kouder is dan die van het luchtpakketje, zodat het deeltje begint af te remmen.

$$CAPE = g \int_{lfc}^{el} (\Theta_{(z) \text{ luchtbel}} - \Theta_{(z) \text{ omgeving}}) / \Theta_{(z) \text{ omgeving}} dz$$

Met $\Theta_{(z)}$ de potentiële temperatuur op niveau z , g de gravitatieversnelling, el het niveau waarop de positieve buoyancy in negatieve buoyancy overgaat, lfc het niveau vanaf waar vrije convectie kan plaatsvinden. De eenheid van CAPE is $J \text{ kg}^{-1}$ of $m^2 s^{-2}$.

De energie wordt omgezet in kinetische energie. De theoretisch te bereiken maximale stijgsnelheid is te bepalen door:

$$W = (2 \text{ CAPE})^{1/2}$$

De CAPE wordt in deze studie berekend op een temp die aangepast is voor de waargenomen 2 meter temperaturen in de omgeving van de onweersbui uit de synops, voor zover deze representatief geacht worden (dus niet beïnvloed door uitstroom uit buien).

De onderste 50 hPa-dikke laag wordt gemengd en de normale (niet de virtuele) temperatuur is gebruikt voor het opstijgend luchtpakketje. De CAPE komt lager uit dan wanneer de onderste laag niet gemengd wordt, maar meestal hoger dan bij een CAPE op alleen de radiosondewaarden zonder menging.

Bij onweer 's nachts of in de vroege ochtend is het meest onstabiele luchtpakketje gebruikt van de onderste troposfeer, wat dan representatiever is omdat aan het aardoppervlak dan vaak een inversie voorkomt.

In menige studie is de toewijzing van een hoeveelheid CAPE een discutabel punt, zo ook in deze studie (zeker voor een individuele cel). In het onderzoek van Markowski en Straka (2000) naar mini-supercells is de berekende CAPE gecontroleerd met behulp van de tophoogte van de bui. Dat is hier niet gecontroleerd.

De bepaling van de Boyden index is minder subjectief. RAOB berekent deze index niet tot op de komma nauwkeurig. In de weerkamer van het KNMI wordt de Boyden index operationeel gebruikt. Onweer is waarschijnlijk bij een Boyden index van 95 of hoger.

$$\text{Boyden index} = 0.1 (H_{700} - H_{1000}) - T_{700} - 200$$

Met H de hoogte in geopotentiële meters en T de temperatuur, de index slaat op het drukvlak. De dikte van de laag 1000-700 hPa is een maat voor de gemiddelde temperatuur van die laag. In feite is de Boyden index niets anders dan een maat voor het gemiddelde temperatuurverval in de onderste troposfeer. Het gebruik van dikte heeft als voordeel dat onrepresentatieve temperatuurmetingen weggefilterd worden.

De index kan ook hoge waarden geven als er te weinig vocht in de laag zit voor de ontwikkeling van onweersbuien, die dan echter uitblijven. De Boyden index schommelt meestal tussen 95 en 100 bij onweerssituaties. De horizontale verschillen zijn niet zo groot als bij de CAPE en de K-index.

De K-index neemt op twee niveaus de hoeveelheid vocht mee. De definitie is:

$$KI = T_{850} + Td_{850} - (T_{700} - Td_{700}) - T_{500}$$

Td is het dauwpunt. De waarden liggen bij onweer meest tussen 25 en 35. De K-index is niet goed begrepen. Droge lucht op 700 hPa of hoger kan een onweersbui erg intensiveren, maar dan is de K-index lager. Onweersbuien in een warme omgeving met een diepe vochtige laag kunnen daarentegen veel water naar beneden doen komen, terwijl de K-index dan hoog is. Het nadeel is dat horizontaal grote verschillen kunnen optreden door minder representatieve temperatuur- en vochtprofielen. De K-index is daar heel gevoelig voor. Een K-index bepalen die representatief is voor een cel wordt dan een meer subjectieve zaak.

De temperatuur op 700 hPa ligt 's zomers tussen de -5 en +5 graden Celsius. Op 700 hPa bevindt zich ongeveer ook het onderste ladingscentrum van onweersbuien. De gebruikte verticale windschering is de grootte van de verschilvector tussen de 0-500 m gemiddelde windvector en de 6 km windvector. Deze wordt gebruikt om het Bulk Richardson getal uit te rekenen in Weisman en Klemp (1982). Het Bulk Richardson getal is gedefinieerd als:

$$BRN = CAPE / 0.5 U^2$$

met U de bovengenoemde windscheringsvectorgrootte. Door het computerprogramma RAOB wordt hij berekend als "BRN shear" (in m s^{-1}), die in feite de wortel is van de gehele noemer, waarbij de relatie geldt:

$$BRN = CAPE / BRN_{\text{shear}}^2_{(RAOB)}$$

Zo is af te leiden dat

$$U = \sqrt{2} \text{ BRN}_{\text{shear}}$$

Het Bulk Richardson-getal zou bij supercells (zware onweersbuien met roterende stijgstroom) waarden van onder de 50 geven, daarboven komen multicells (clusters) voor. Nader onderzoek naar de klimatologie door Rasmussen en Blanchard (1998) wees uit dat 75% van de supercells (en zware zomerse hagelbuien) waarden hebben lager dan 17, maar de helft van de gewone onweersbuien ook zulke waarden hebben. De schering U alleen maakt beter onderscheid tussen gewone onweersbuien en supercells. Een betere predictor dan BRN zou zijn: $CAPE^x U^y$, waarbij x en y beide positief zijn. De bepaling van U is niet afhankelijk van de berekende trekrichting van een onweersbui.

RAOB berekent de trek van een onweersbui door 75% van de grootte van de dikte-gewogen gemiddelde 0-6 km windvector te nemen en 30 graden naar rechts daarvan als trekrichting. Voor supercells (zware onweersbuien met een roterende stijgstroom) is dit doorgaans een goede trekrichting. Andere onweersbuien zullen meestal meer naar links trekken dan berekend wordt door RAOB.

2.3.4 Indeling in soorten onweersbuien

Er is geprobeerd een indeling in soorten onweersbuien te maken om onderlinge verschillen in omgevingskenmerken en bliksemactiviteit te identificeren. De onweersbuien zijn ingedeeld in de volgende groepen:

1. Losse cellen
2. Cellen die nauw gerelateerd zijn aan een front (ingebed in frontale neerslag)
3. Individuele cellen in kleine clusters, lijnen of met een klein neerslaggebiedje eraan vast.
4. Grote clusters met meerdere cellen, complexen

De indeling is wat arbitrair, omdat bijvoorbeeld bij losse cellen vaak na enige tijd nieuwe cellen aan de flanken ontstaan waardoor het geheel een cluster wordt. De variatie aan vormen binnen groepen 3 en 4 loopt ook erg uiteen.

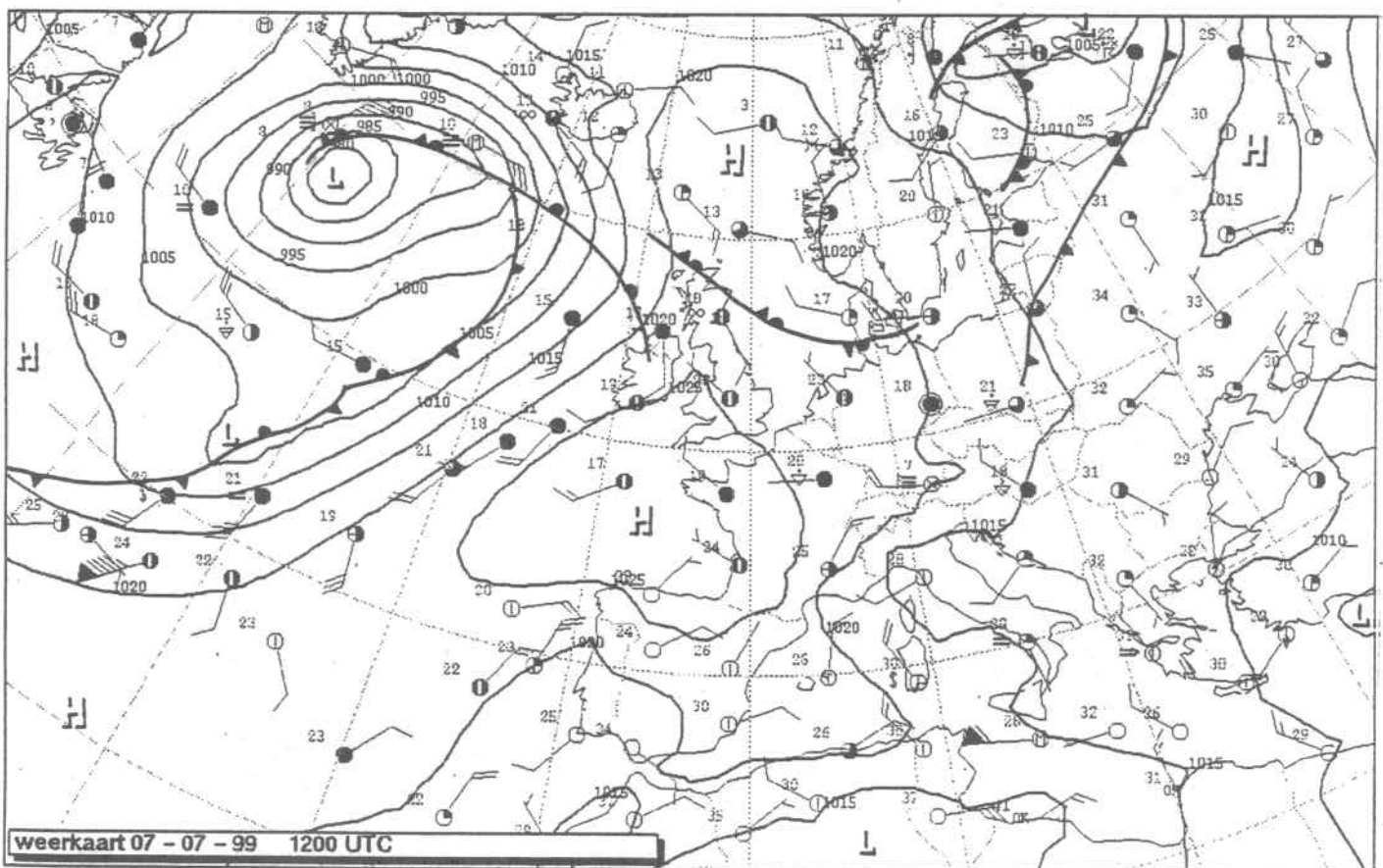
3. Cases

Alle tijden zijn in UTC. Staat er bijvoorbeeld 12:45h, dan betreft dit dus 14:45h Nederlandse zomertijd. De percentages zijn ten opzichte van het totaal aantal ontladingen.

3.1 7 juli 1999: Een stationaire cel in een zeewindlijn

3.1.1 Overzicht

Nederland bevindt zich aan de noordostrand van een hogedrukgebied dat bij West-Frankrijk en verder op de oceaan ligt. In de onderste lagen van de troposfeer is er bijna geen stroming boven Nederland. Tegen de avond breidt het hogedrukgebied zijn invloed uit naar Nederland. De wind op 200 hPa is dan sterk toegenomen.

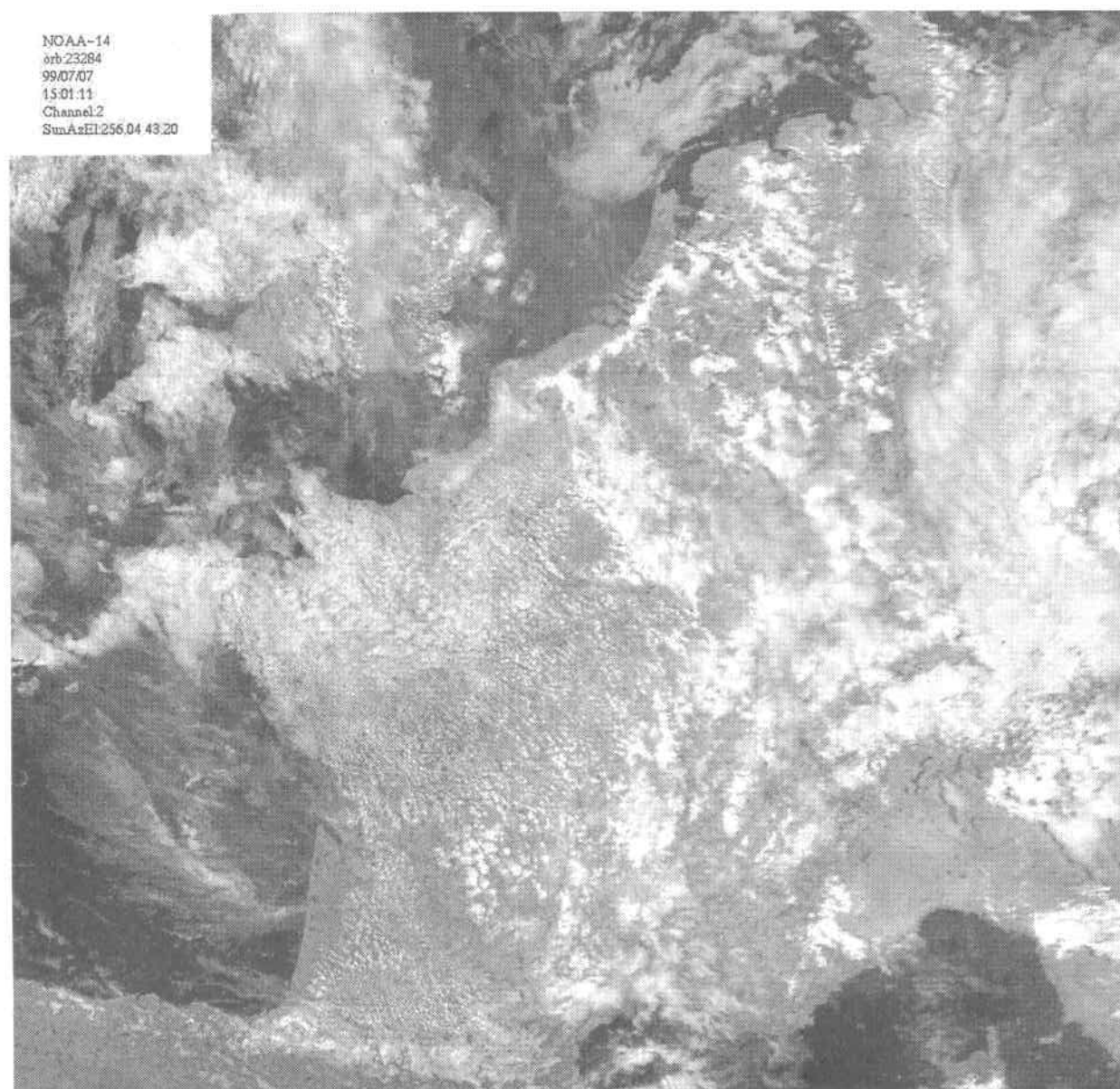


Figuur 6. Weerkaartje met fronten (uit: Dagoverzicht van het Weer, KNMI)

Een actieve geclusterde onweersbui ontstaat om 13:15h in Zuid-Holland en trekt iets naar het zuidoosten. Steeds is er een cel aan de westkant van de cluster die zich nauwelijks verplaatst. Omstreeks 15:45h is een lijn van buien zichtbaar, parallel aan de kust, met her en der wat onweersactiviteit. Dan ontstaat er tussen zo'n langzaam trekkende cel en een losse cel ten zuidwesten daarvan een nieuwe actieve cel, ditmaal met relatief veel meer wolkontladingen dan de eerste cel.

Gezien de goede bliksemdetectie in het gebied waar de bui door trekt is dit een geschikt geval voor dit onderzoek.

Ook in de noordelijke en oostelijke provincies komen geclusterde buien voor met wat onweer. Toch is de bliksemactiviteit van die buien minder dan bij de hier onderzochte bui.



Figuur 7. NOAA satellietfoto in zichtbaar licht van 15:01h UTC. Duidelijk is te zien dat de buienlijn parallel aan de kust ligt.

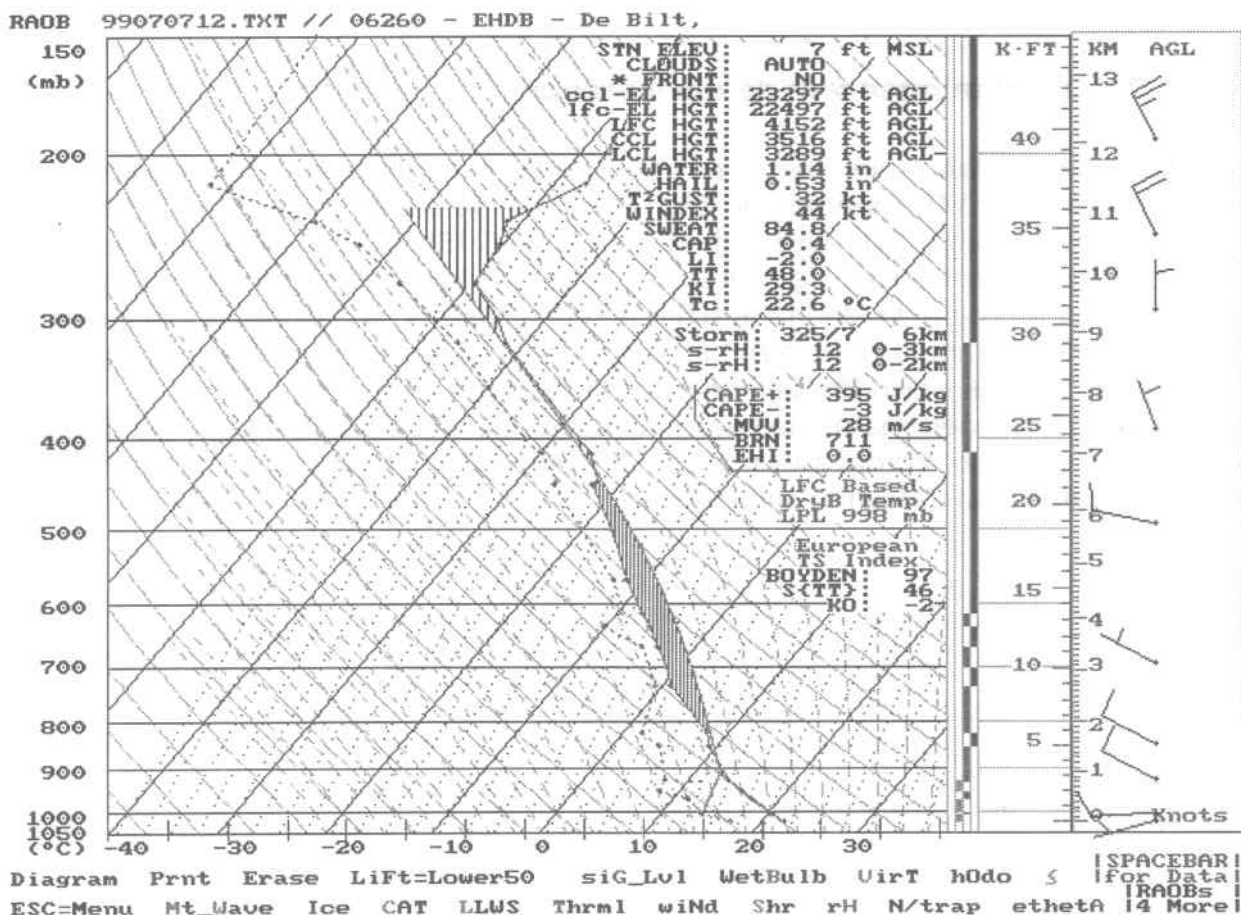
De lijn van buien parallel aan de kust, fraai te zien op de satellietfoto (figuur 7) doet een zeewindeffect vermoeden. De lijn trekt langzaam naar het zuidoosten. Uit de grondwaarnemingen (figuren in paragraaf 3.1.4) is slechts moeizaam een zeewind af te leiden. De windsprong is klein en duidelijke temperatuurverschillen zijn er ook niet. In het gebied waar de onweersbui ontstaat is er wel een kleine verstoring van het windveld, wat eventueel door zeewind kan komen. Boven zee is het ongeveer 16 graden, op het land 22 graden. De bui dooft om 17:15h uit door de dagelijkse temperatuurdaling en mogelijk onderdrukking van stijgende bewegingen door het zich uitbreidende hogedrukgebied.

3.1.2 Waarnemingen van de onweersbuien

In Cabauw werden zware buien met hagel en forse windstoten in de namiddag waargenomen. In Groot-Ammers hing om 13:30h de eerste onweersbui in het oosten, met hoofdzakelijk wolkontladingen. Om 15:15h kwam een tweede bui over, de bliksemfrequentie was hierbij laag en meest verticaal. Deze bui kwam precies over Groot-Ammers. In Montfoort (U) trok de bui tussen 13:45h en 14:15h langzaam over. Er viel 24 mm regen in een half uur. Daarbij kwamen er dichtbij inslagen voor. In de Achterhoek viel in Bredevoort in totaal 40 mm uit de buien. Van de KNMI-regenwaarnemers heeft Vleuten hagel gemeld bij de bui, die daar rond 14:00h overkwam. Verder kwam er bij de buien in het oosten en noordoosten hagel voor, waarbij er in Zuidlaren schade was.

3.1.3 Analyse van bovenluchtwaarnemingen

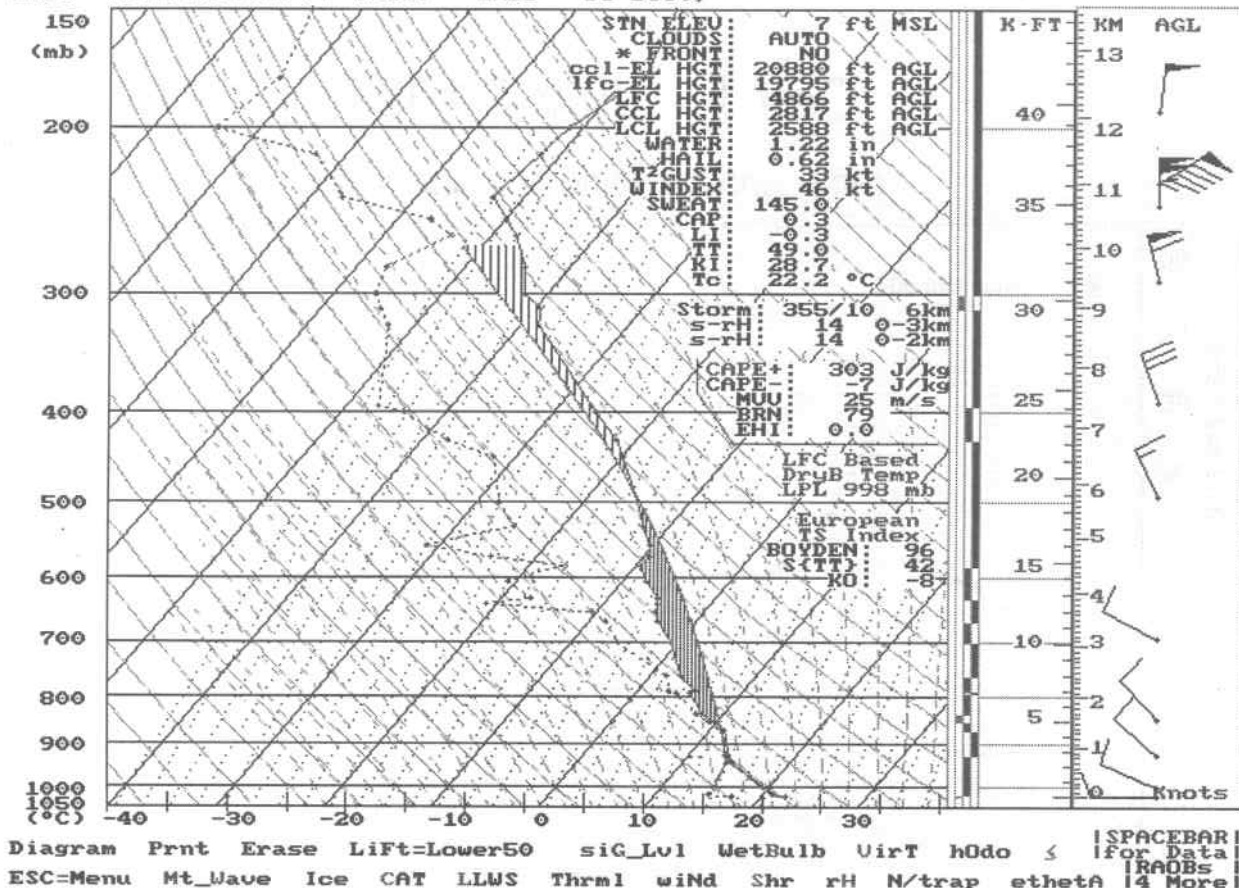
De temps van De Bilt zijn het meest bruikbaar voor deze situatie vanwege de locatie dicht bij de onderzochte onweersbui. Er komen CAPE-waarden voor van ongeveer 350 J kg^{-1} , de Boyden index is 96 en er is weinig windscherping, bij gebrek aan hoge windsnelheden. De gemiddelde grootte van de windscherpingsvector grenslaag-6 km is slechts 1.5 m s^{-1} . De temperatuur op 700 hPa is 1 graad Celsius.



Figuur 8. Verticaal profiel (skew T- log p diagram) van temperatuur-, dauwpunt en windgegevens van De Bilt om 12 UTC. De onderste meting van de temp is aangepast volgens de synop temperaturen en de onderste 50 hPa is gemengd.

Onder deze omstandigheden met weinig windscherping zijn geïsoleerde en geclusterde kleine buien met een lage treksnelheid het meest waarschijnlijk, zoals ook waargenomen is. Uit het hodogram kan bepaald worden dat de winden in de onderste 2-3 kilometer ten opzichte van de bui uit het zuidwesten tot westen waaien. Aan deze zijde van de bui zullen de nieuwe cellen bij voorkeur ontstaan en het langst leven. In de werkelijkheid zien we dat ook. Aan de oostkant van de bui zal de koele daalstroom overheersen. De cellen aan de zuidwest- en westzijde krijgen warme vochtige lucht binnen die nog niet door daalstromen in buien is afgekoeld. De temp is vrij vochtig, vooral op middelbaar niveau (700-500 hPa) zonder echt droge lagen.

RAOB 99070718.TXT // 06260 - EHDB - De Bilt,

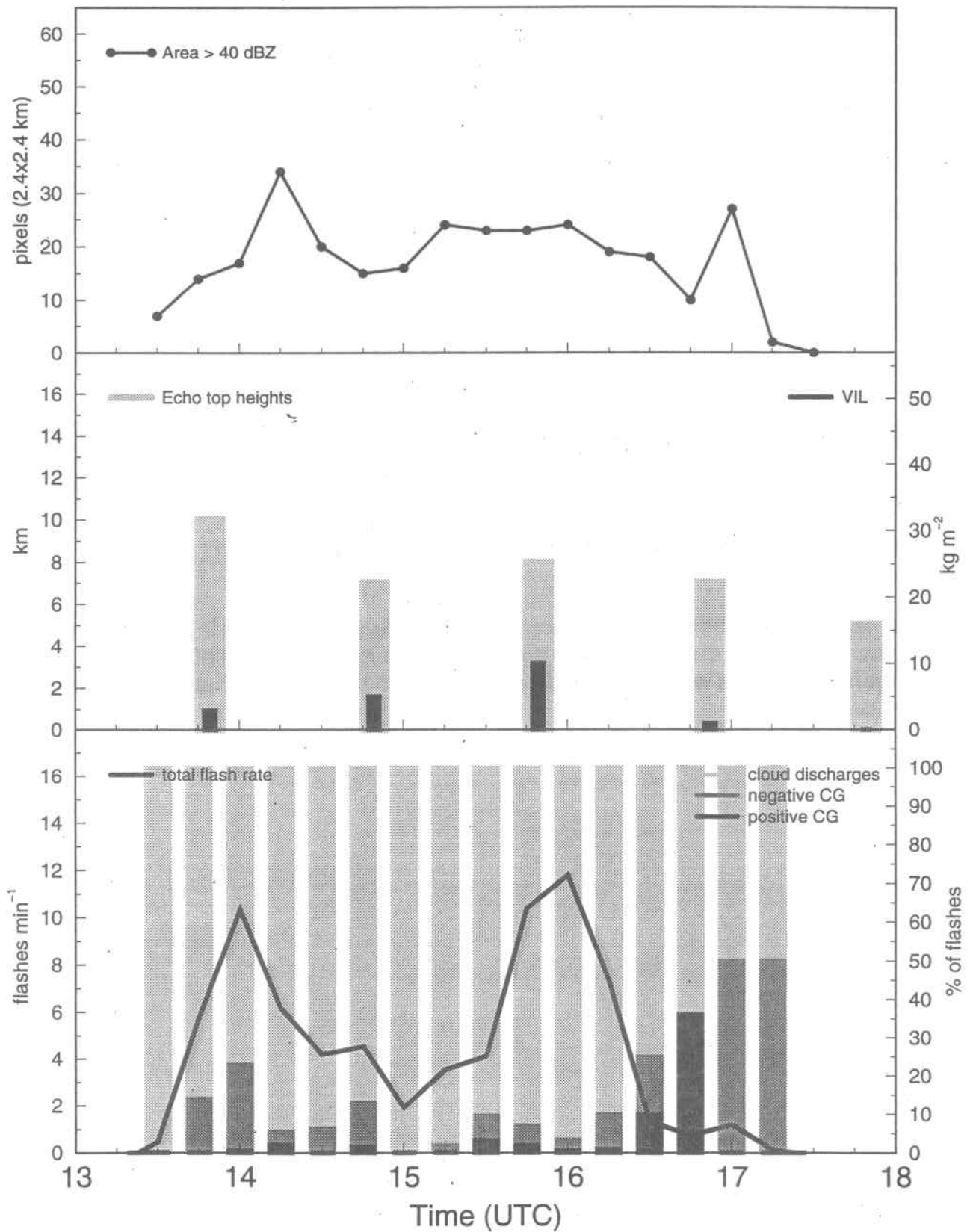


Figuur 9. Als figuur 8, maar dan voor 18 UTC.

Om 18 UTC is de bovenlucht droger geworden. De windschering is in de onderste niveaus niet veel veranderd, maar boven 500 hPa is de wind uit het noorden toegenomen. Dit is waarschijnlijk de oorzaak van het meer naar het zuiden trekken van de buien.

Cell 1 – July 7 1999

radar and lightning characteristics



Figuur 10 (op linker pagina). Verloop van de radarkenmerken en bliksemactiviteit van de onweersbui op 7 juli 1999.

3.1.4 Samenvatting van de ontwikkeling en de bliksemactiviteit van de onweersbui

De bij dit verhaal behorende kaartjes zijn te vinden op pagina 29 t/m 33.

13:30-14:15h

De snelgegroeide cel met echotoppen tot 11 km begint snel met het produceren van veel wolkontladingen en negatieve ontladingen. De ontladingen komen voornamelijk voor in de convectieve zone en ten noordwesten daarvan, aan de achterzijde van de bui. Het wolk-aarde percentage is bij deze piek ongeveer 20%.

14:15-15:45h

Daarna neemt het aantal negatieve ontladingen weer sterk af. De wolkontladingsactiviteit verspreidt zich over een groter gebied maar de dichtheid neemt af. De echotoppen tonen aan de zuidoostkant van de bui een aambeeld met aan de noordwestrand de westelijke cel. Een half uur daarna wordt door de radar onder het aambeeld stratiforme neerslag waargenomen. De bliksemactiviteit in deze egale neerslag is bijna nihil. Het minimum in bliksemactiviteit wordt bereikt als de stratiforme neerslagzone zijn grootste afmetingen bereikt. Dit is ook het tijdstip dat de westelijke cel aan het aftakelen is. De maximale echotoppen zijn 7-8 km hoog. De wolkontladingen komen nog voornamelijk voor in de celkernen en soms iets ten zuidwesten daarvan. De weinige negatieve ontladingen komen vrij verspreid voor. Positieve ontladingen zijn zeldzaam in dit tijdvak.

15:45-16:15h

De volgende grote opleving van de bliksemactiviteit is voortgebracht door een nieuwe cel, die door convergentie op de uitstroom tussen de cluster en een kleine bui ten zuidwesten daarvan is ontstaan. De activiteit bestaat nu voor maar 9% uit wolk-aarde ontladingen. De wolkontladingen zijn net als de negatieve ontladingen gecentreerd in het gebied met hoge reflectiviteit. De negatieve ontladingen komen bovendien dicht bij elkaar voor, centraal in het gebied met wolkontladingen. De stratiforme neerslagzone is in deze periode kleiner. De VIL is 10 kg m^{-2} en de echotoppen zijn maximaal 8-9 km.

16:15-17:30h

Dit tijdvak staat in het teken van het uitsterven van de bui. De wolkontladingsactiviteit is nu vrij gering en komt bijna alleen voor aan de zuidelijke en zuidoostelijke kant van de cel. Er is een opleving van positieve ontladingen oostelijk van de cel een half uur

voor het oplossen van de cel en een opleving van negatieve ontladingen aan de oostkant een kwartier voor het oplossen van de cel en het stratiforme gedeelte. De stratiforme neerslagzone aan de oostkant van de cel bereikt zijn maximale intensiteit en omvang ongeveer een half uur voor het oplossen van de bui (als geheel). De VIL en maximale echotophoogten zijn ook afgenomen.

3.1.5 Samenvatting van de opvallendste verschijnselen van deze case:

- ❖ Het zwaartepunt van de activiteit van wolkontladingen en negatieve ontladingen ligt gemiddeld meestal centraal in de convectieve zone. Dit verschuift meer naar de oostkant in de loop van de tijd.
- ❖ De cel die is ontstaan door convergentie tussen twee buien zorgt voor een sterke opleving van bliksemactiviteit, vooral van wolkontladingen.
- ❖ De eerste piek bevatte ruim 20% verticale ontladingen, terwijl de tweede piek slechts 9% verticale ontladingen bevatte. Ten opzichte van het totaal was daarbij het percentage positieve verticale ontladingen tijdens beide pieken laag, maar relatief gezien is het aandeel positieve ontladingen tijdens de tweede piek hoger ten opzichte van negatieve ontladingen.
- ❖ Als de convectieve activiteit een minimum (oude cellen) vertoont, is het stratiforme neerslaggebied het best ontwikkeld en de bliksemactiviteit minimaal, en omgekeerd.
- ❖ Een tijdelijke relatieve toename van het aantal positieve ontladingen markeert het einde van de bui, terwijl het aantal wolkontladingen dan al sterk is afgenomen.
- ❖ Bij lage bliksemactiviteit komen ontladingen in dit geval meestal buiten de celkern voor.
- ❖ De hoogste VIL ligt meestal circa 4 km ten zuidoosten van de convectieve zone en de daarmee samengaannde bliksemactiviteit. De cel ligt helemaal aan de westzijde van de echotoppen. De bliksemactiviteit ligt dan ook steeds aan de westzijde van het aambeeld.

Figuur 11 (volgende pagina). Kaartje met radar, bliksem en synopwaarnemingen van 13 UTC, 7 juli 1999.

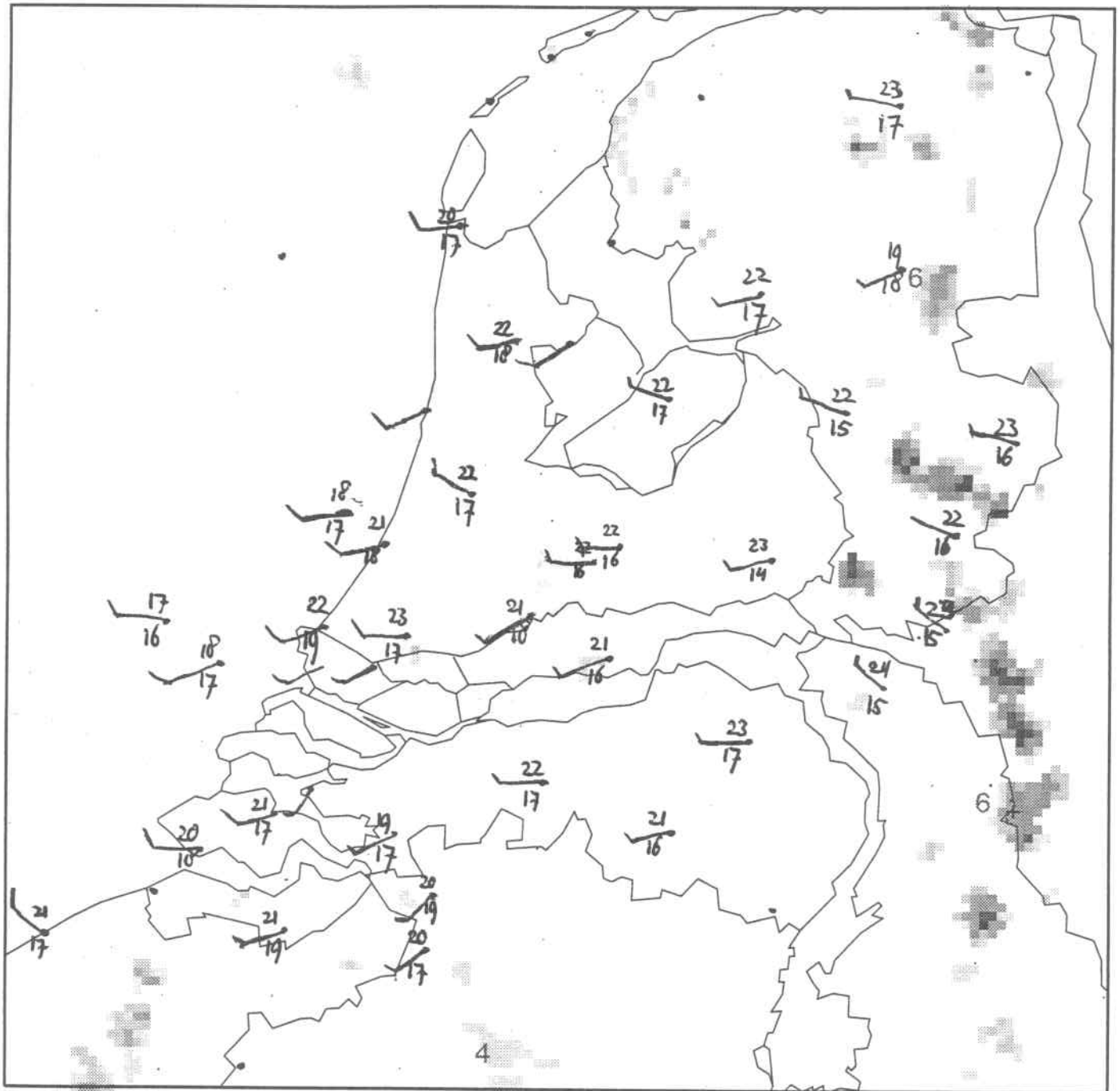
Figuur 12 (pagina 30). Idem, 14 UTC.

Figuur 13 (pagina 31). Idem, 15 UTC.

Figuur 14 (pagina 32). Idem, 16 UTC.

Figuur 15 (pagina 33). Zonder synops, 17 UTC.

SAFIR CG + IC Reflectivity 990707 13:00 UTC



Plotted: 8 intracloud(.) 0 negative cloud-to-ground(o) 1 positive cloud-to-ground(+)
in a time span of 15 min centered on radar time

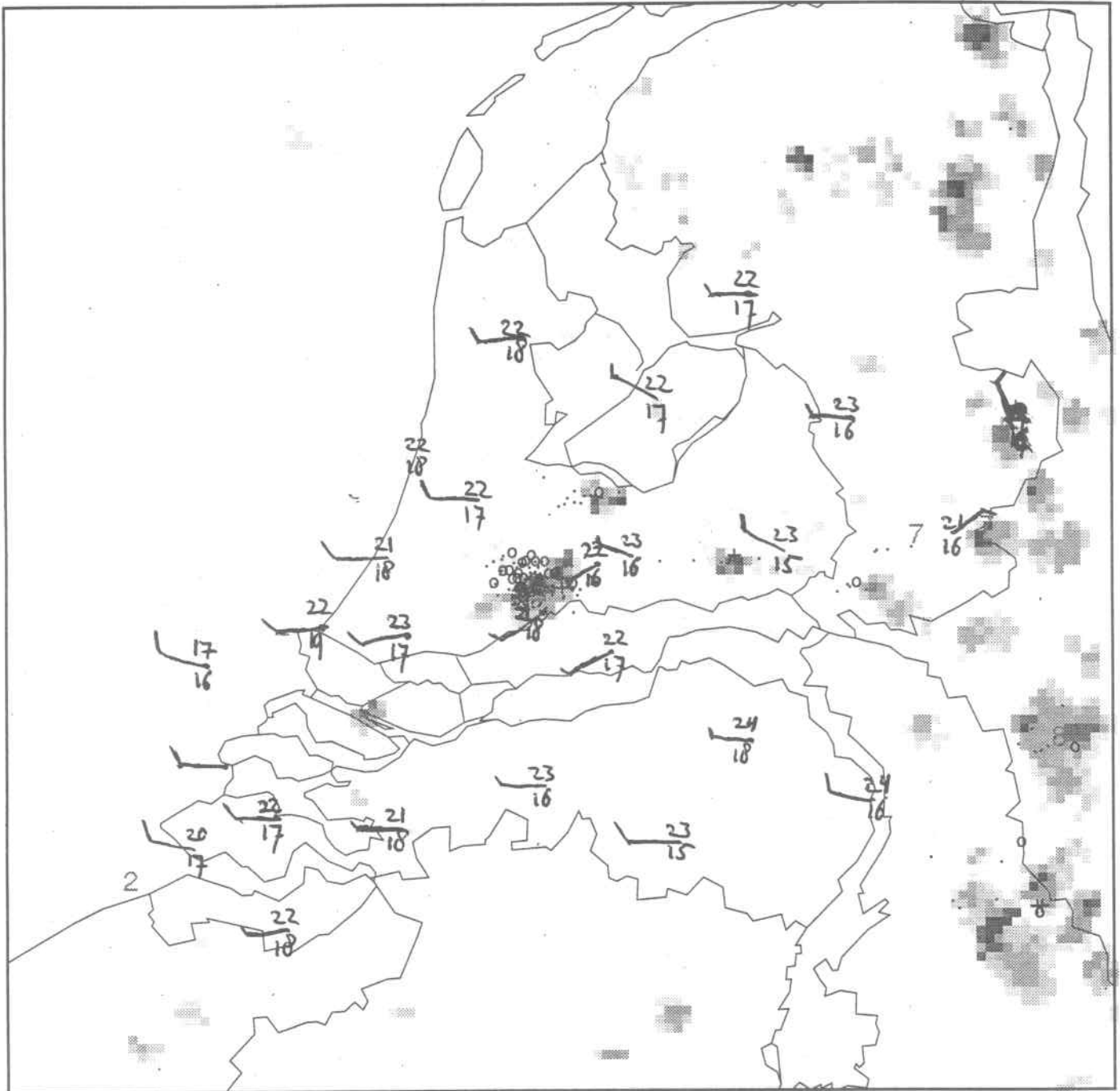
Percentage: 11.1 % cloud-to-ground 11.1 % positive from a total of 9 strokes



dBZ

-9 -1 7 15 23 31 39 47 55 63 71 79 87 95 103 111

SAFIR CG + IC Reflectivity 990707 14:00 UTC



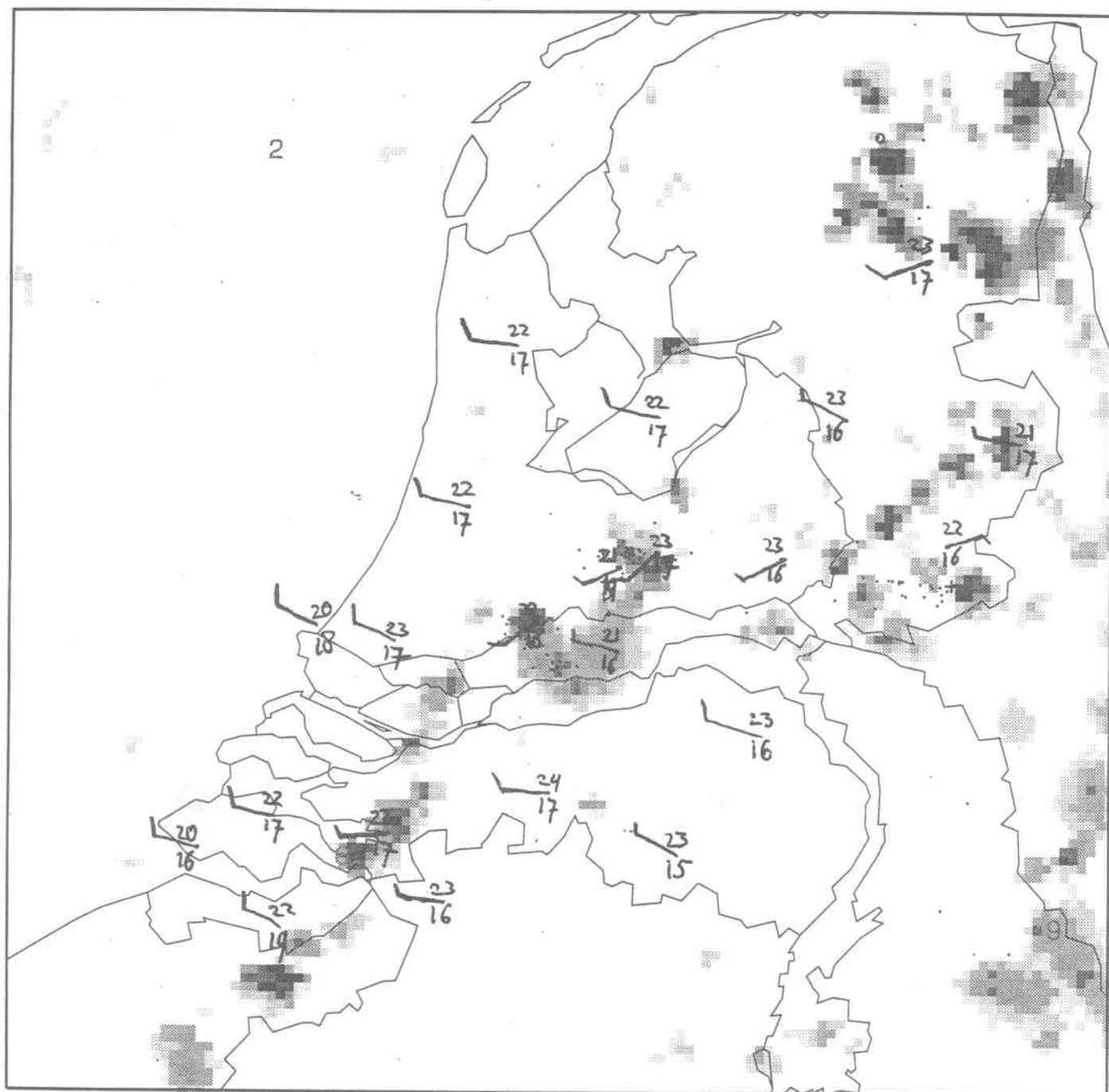
Plotted: 168 intracloud(.) 39 negative cloud-to-ground(o) 4 positive cloud-to-ground(+)
 in a time span of 15 min centered on radar time
 Percentage: 20.4 % cloud-to-ground 1.9 % positive from a total of 211 strokes



dBZ

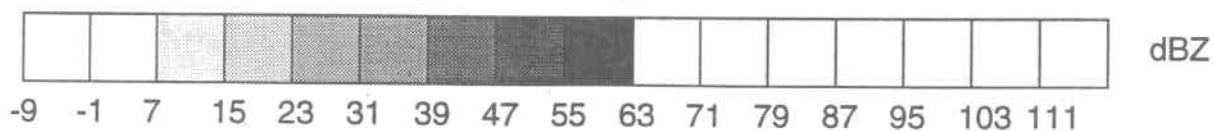
-9 -1 7 15 23 31 39 47 55 63 71 79 87 95 103 111

SAFIR CG + IC Reflectivity 990707 15:00 UTC

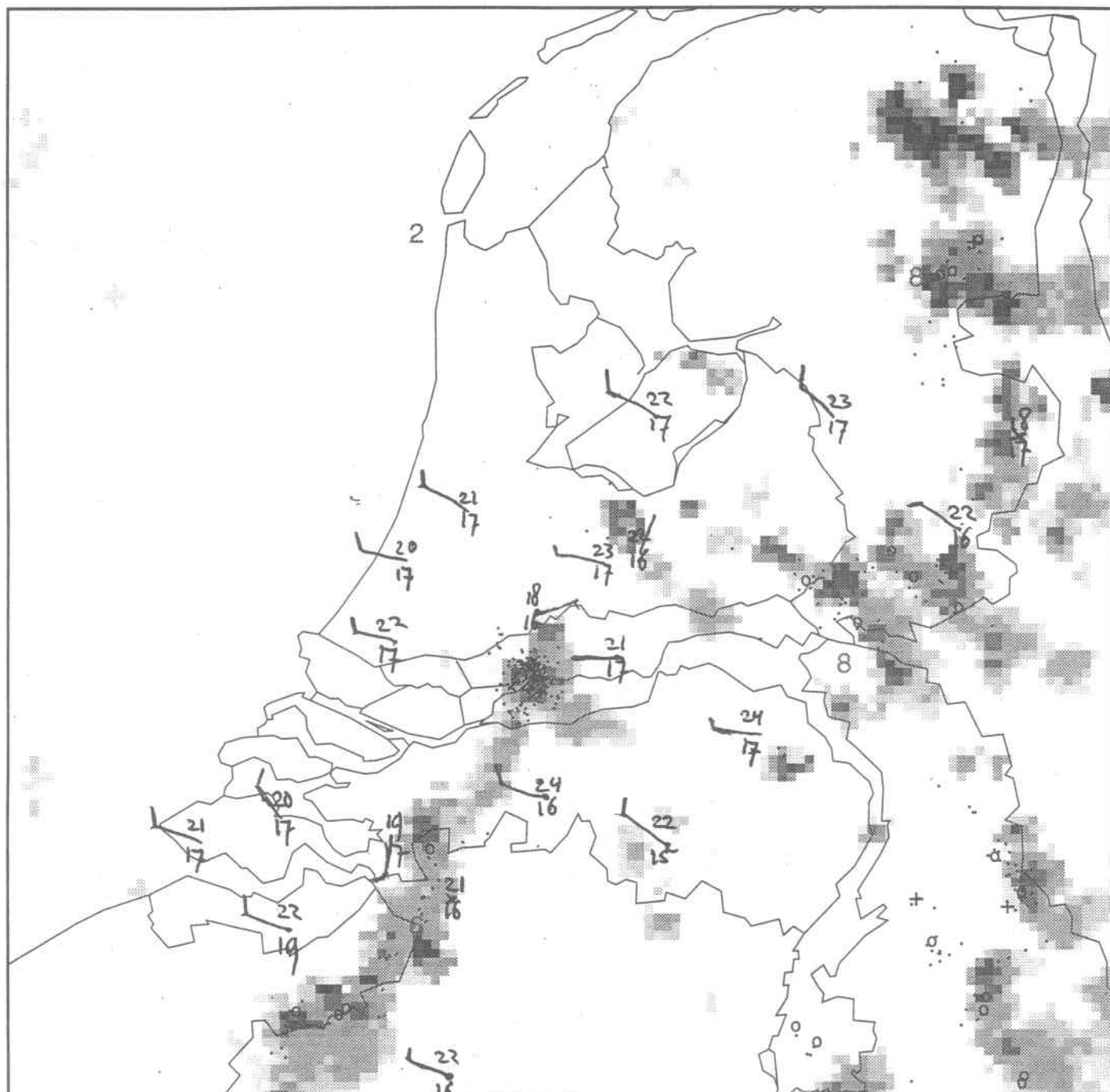


Plotted: 124 intracloud(.) 3 negative cloud-to-ground(o) 2 positive cloud-to-ground(+)
in a time span of 15 min centered on radar time

Percentage: 3.9 % cloud-to-ground 1.6 % positive from a total of 129 strokes

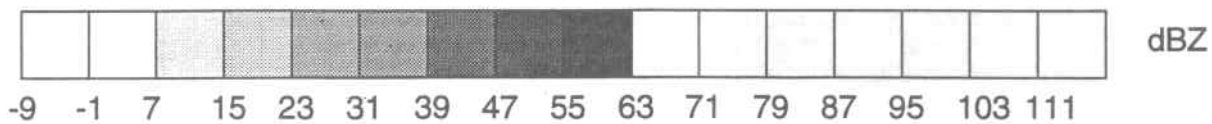


SAFIR CG + IC Reflectivity 990707 16:00 UTC

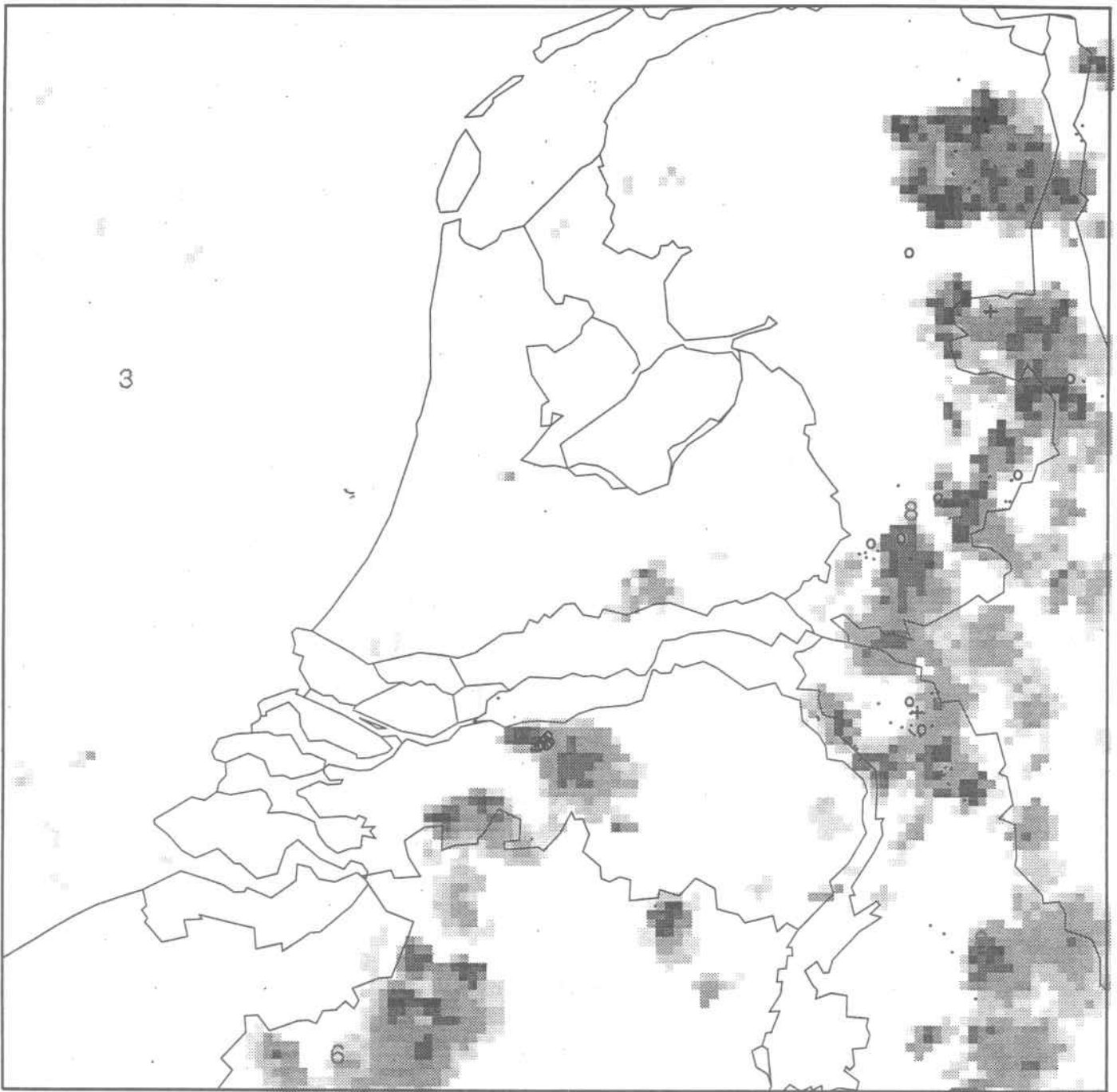


Plotted: 344 intracloud(.) 29 negative cloud-to-ground(o) 6 positive cloud-to-ground(+)
in a time span of 15 min centered on radar time

Percentage: 9.2 % cloud-to-ground 1.6 % positive from a total of 379 strokes

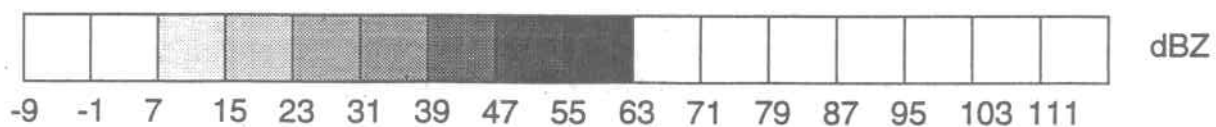


SAFIR CG + IC Reflectivity 990707 17:00 UTC



Plotted: 86 intracloud(.) 17 negative cloud-to-ground(o) 2 positive cloud-to-ground(+)
in a time span of 15 min centered on radar time

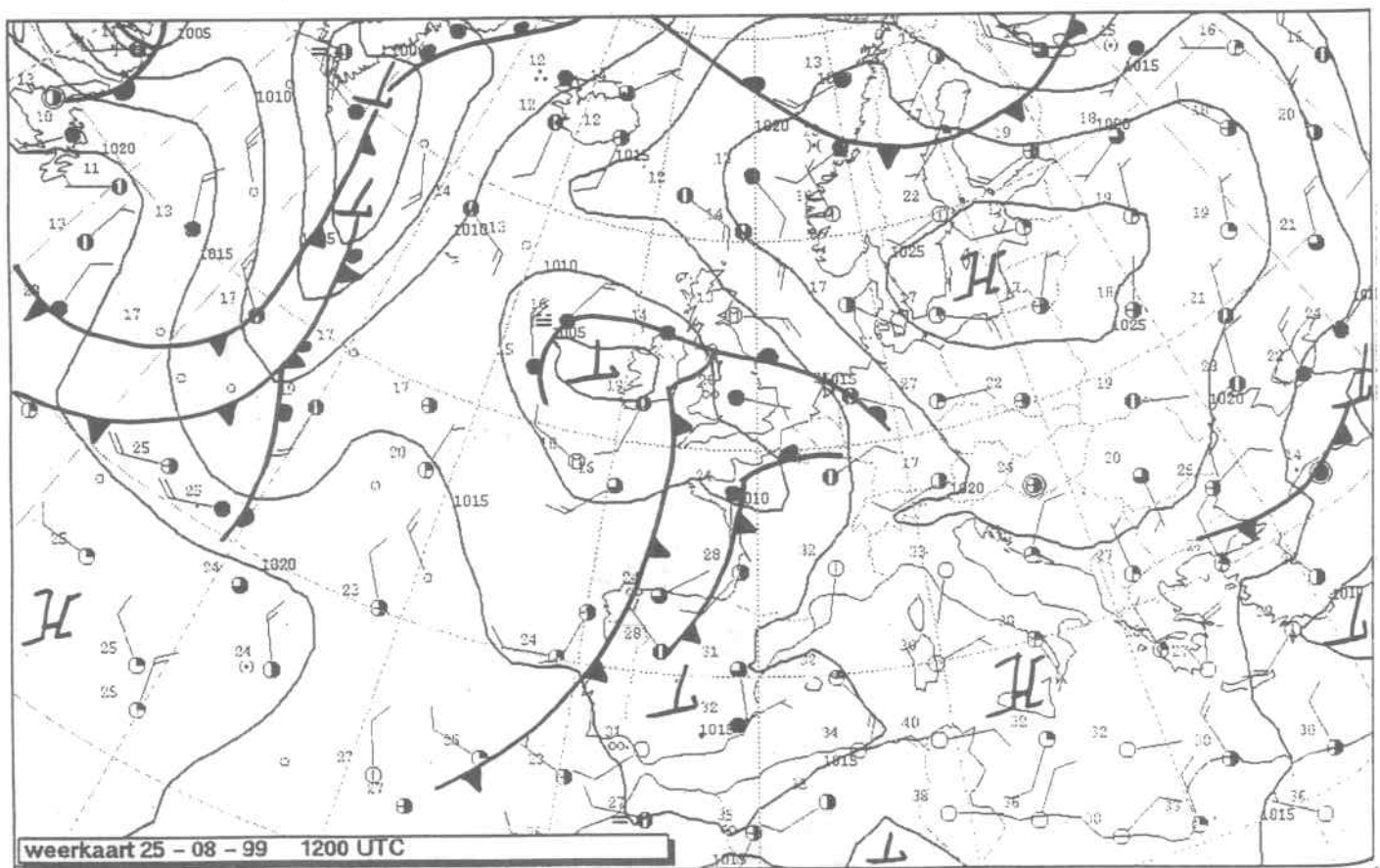
Percentage: 18.1 % cloud-to-ground 1.9 % positive from a total of 105 strokes



3.2 25 en 26 augustus 1999: Een klein mesoschaal convectief systeem (MCS) gevolgd door buienclusters

3.2.1 Overzicht

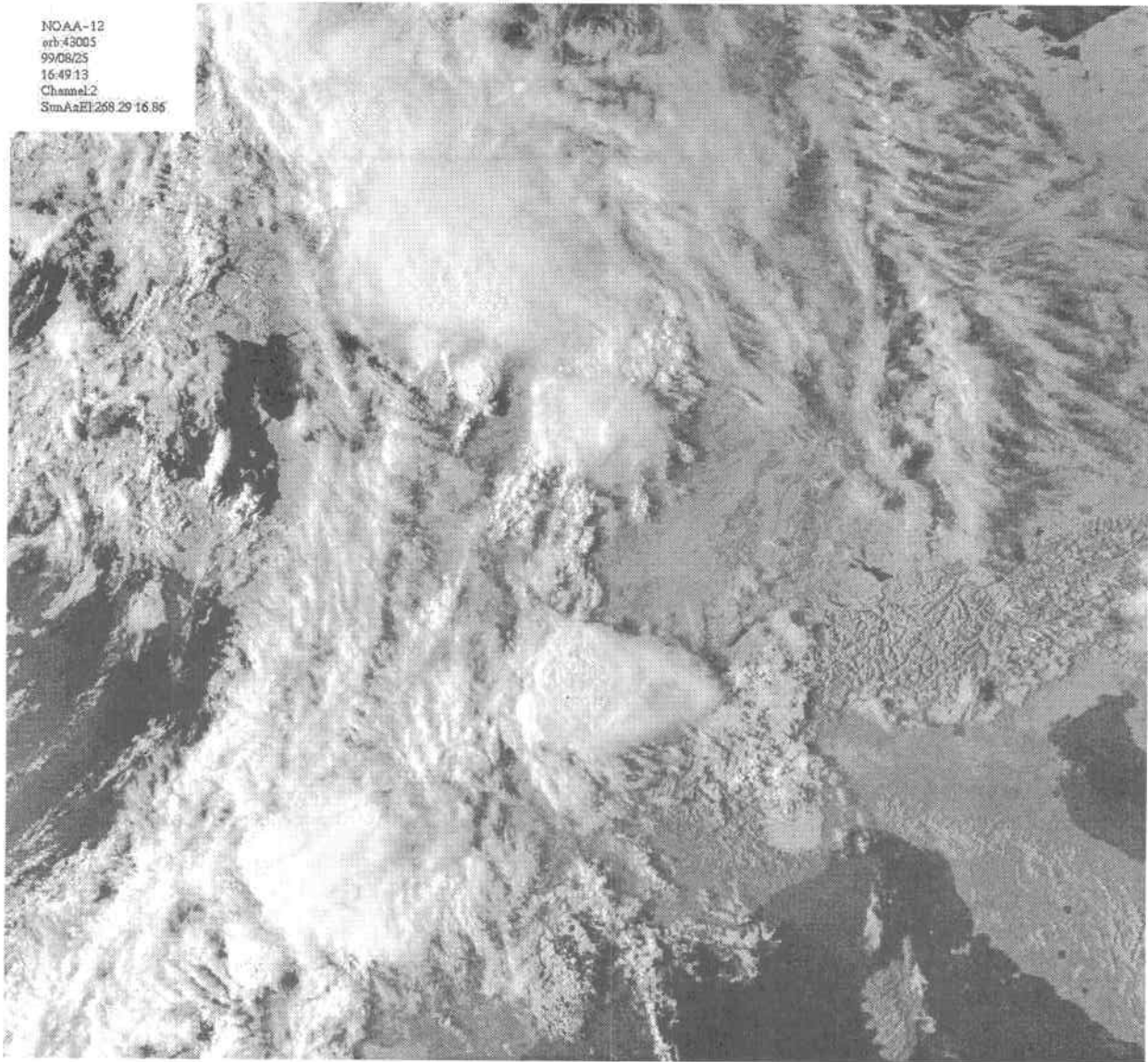
Met een zuidelijke stroming worden in de middag van de 25ste augustus temperaturen van 26 tot 29 graden bereikt. In de nacht trekt een actief koufront van een depressie bij Schotland over Nederland. Aan de warme zijde vlak voor het front ontstaan zware onweersbuien. Op veel plaatsen is het voor het onweer broeierig met 23 tot 25 graden.



Figuur 16. Weerkaart 25 augustus 1999, 12 UTC. (uit Dagoverzicht van het Weer, KNMI)

In de avond van 25 augustus en het begin van 26 augustus 1999 trekt er een actief onweerscomplex over West-Nederland naar het noordoosten. Het is om 21:40h ontstaan in West-Vlaanderen als een NNW-ZZO georiënteerd langwerpig complex. Omstreeks 22:40h is het complex het meest actief, met 130 ontladingen per minuut. Het zwaarste deel ligt dan boven oostelijk Zuid Beveland. De toppen reiken dan tot bijna 15 km hoogte.

NOAA-12
orb:43005
99/08/25
16:49:13
Channel:2
SunAzEl:268.29 16.86

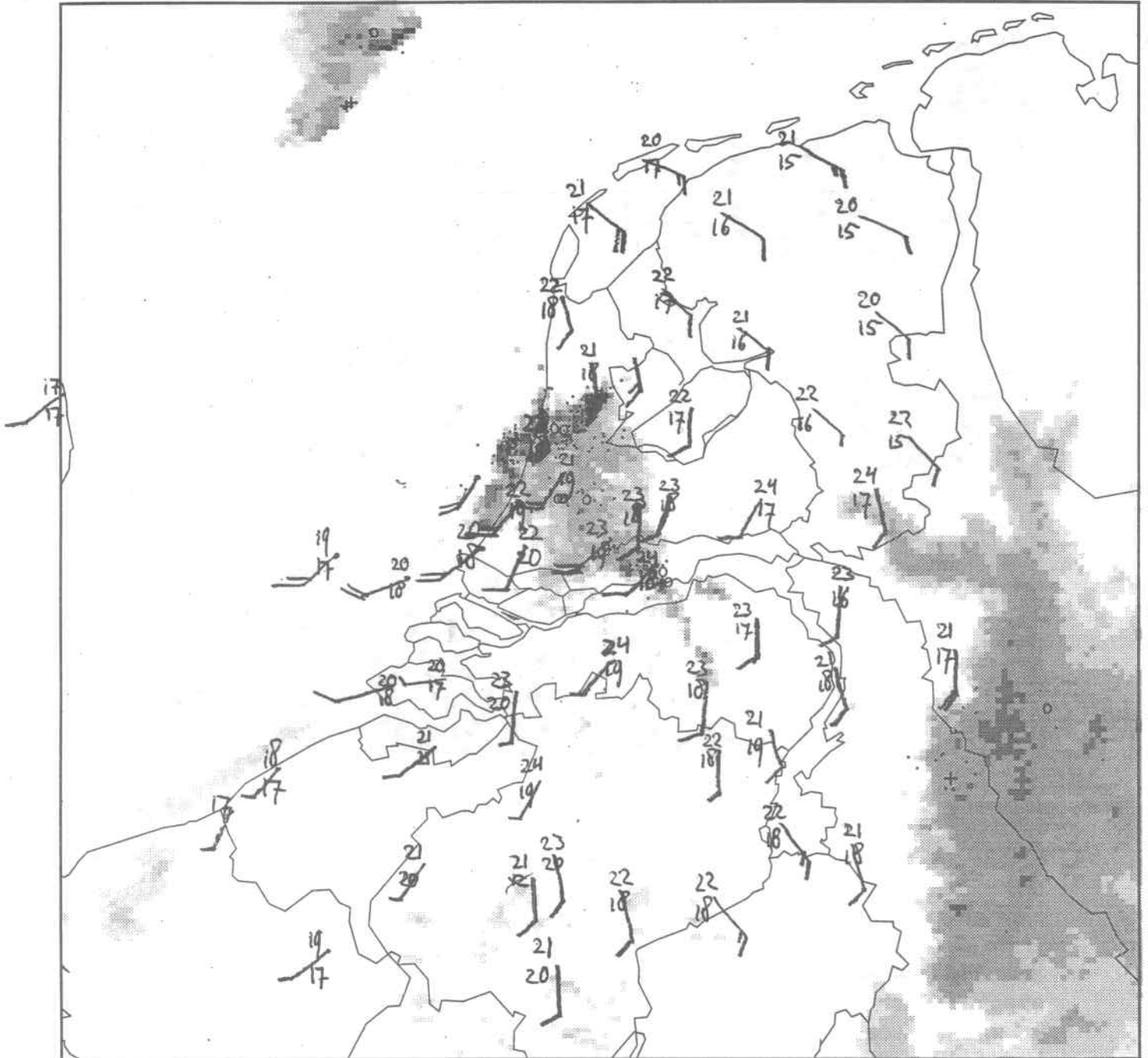


Figuur 17. NOAA satellietfoto van 25 augustus 1999, 16:49h UTC.

Om 23:25h boet de eerste zware onweershaard aan activiteit in. De noordwestelijke cellen van het complex rangschikken zich om 23:55h in een gekromde WZW-ONO lijnvorm, waarbij de bliksemactiviteit weer toeneemt. Het ligt dan halverwege Noord-Holland. Achter de lijn bevindt zich dan een stratiforme zone die zich tot aan het rivierengebied uitstrekt. Een staartje van cellen aan de zuidoostkant van de stratiforme zone is actief geworden en trekt over het Utrechtse Heuvelrug-gebied, waarna het weer uitdooft. Het geheel ziet er enigszins ruitvormig uit. Vanaf 0:25h worden cellen die voor de lijn groeien deel van de lijn, die op die manier een noordwest-zuidoost oriëntatie krijgt. Het geheel trekt uit het detectiegebied. Achter dit complex volgen nog enkele clusters met relatief veel negatieve ontladingen.

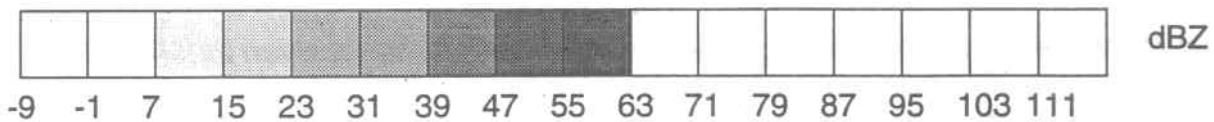
Figuur 18 (volgende pagina): Kaartje met radar, bliksem en synops van 23:55h UTC.
Figuur 19 (pagina 37). Idem, van 01:55h UTC. Hierop zijn de geclusterde cellen 2 (westen van Utrecht) en 3 (bij Hoorn) te zien.
Op deze kaarten is duidelijk de windsprong te zien na de passage van het complex.

SAFIR CG + IC Reflectivity 990825 23:55 UTC

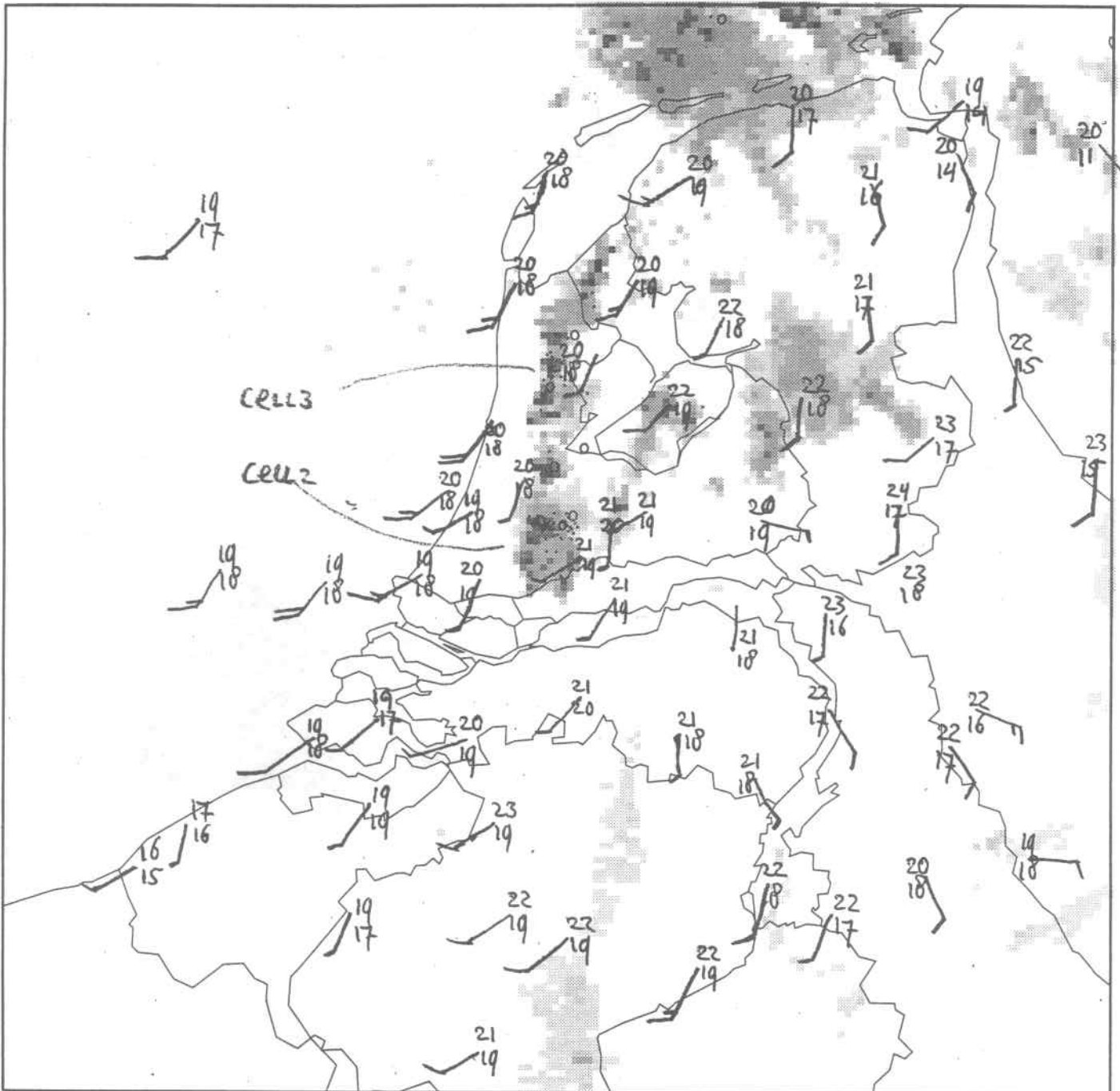


Plotted: 266 intracloud(.) 47 negative cloud-to-ground(o) 14 positive cloud-to-ground(+)
in a time span of 3 min centered on radar time

Percentage: 18.7 % cloud-to-ground 4.3 % positive from a total of 327 strokes

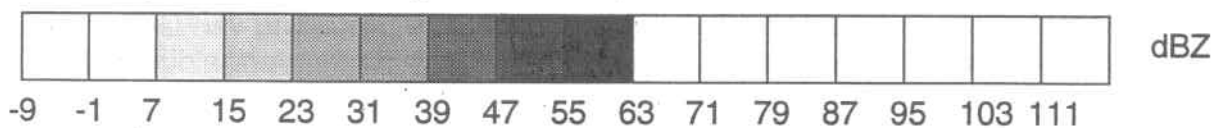


SAFIR CG + IC Reflectivity 990826 01:55 UTC

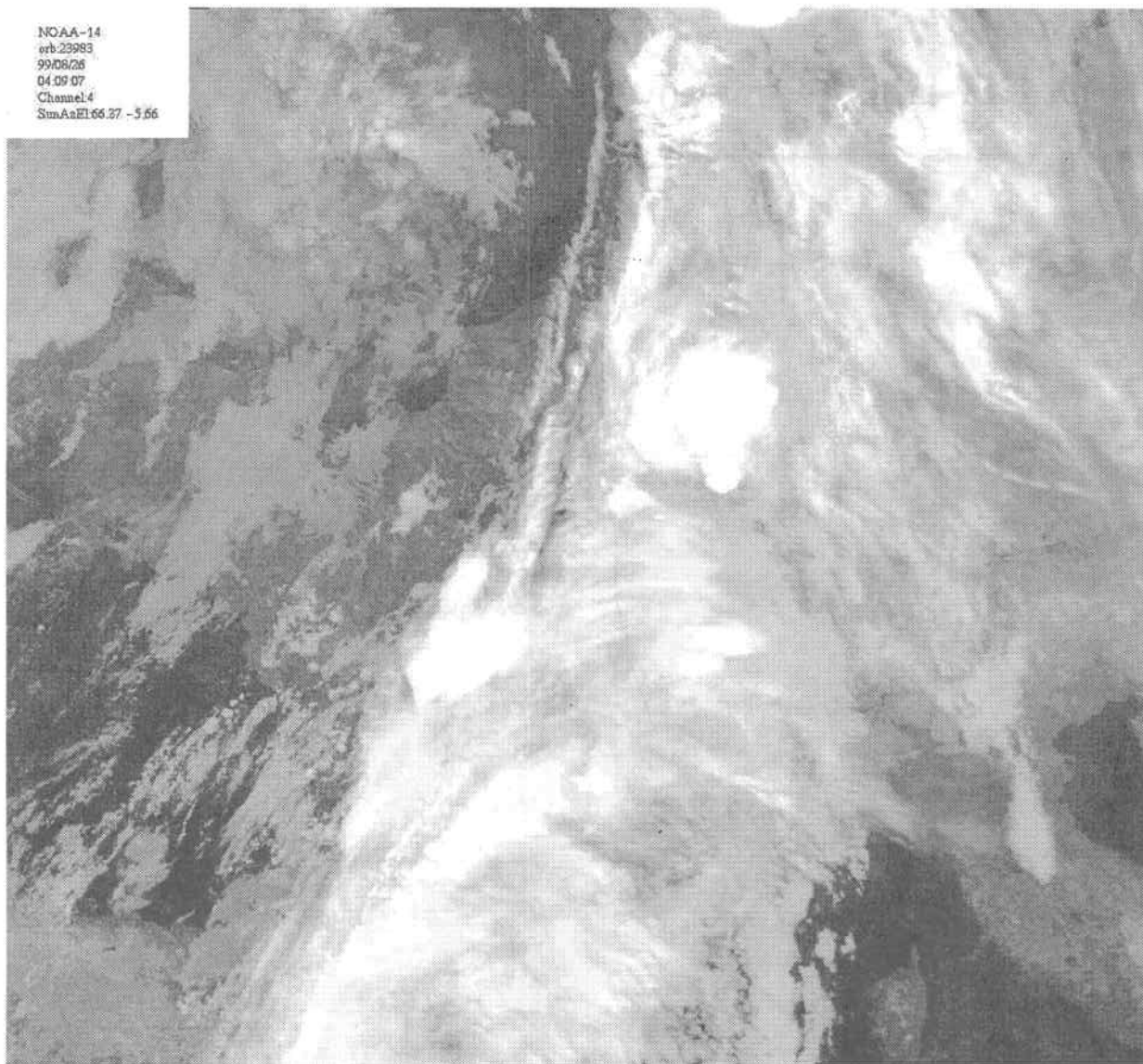


Plotted: 78 intracloud(.) 8 negative cloud-to-ground(o) 0 positive cloud-to-ground(+)
in a time span of 3 min centered on radar time

Percentage: 9.3 % cloud-to-ground 0.0 % positive from a total of 86 strokes



NOAA-14
orb 23983
990826
04:09:07
Channel 4
SunAaE166.27 -5.66



Figuur 20. NOAA satellietfoto(infrarood) van 26 augustus 1999, 04:09h UTC. Duidelijk is hierop het koufront te herkennen.

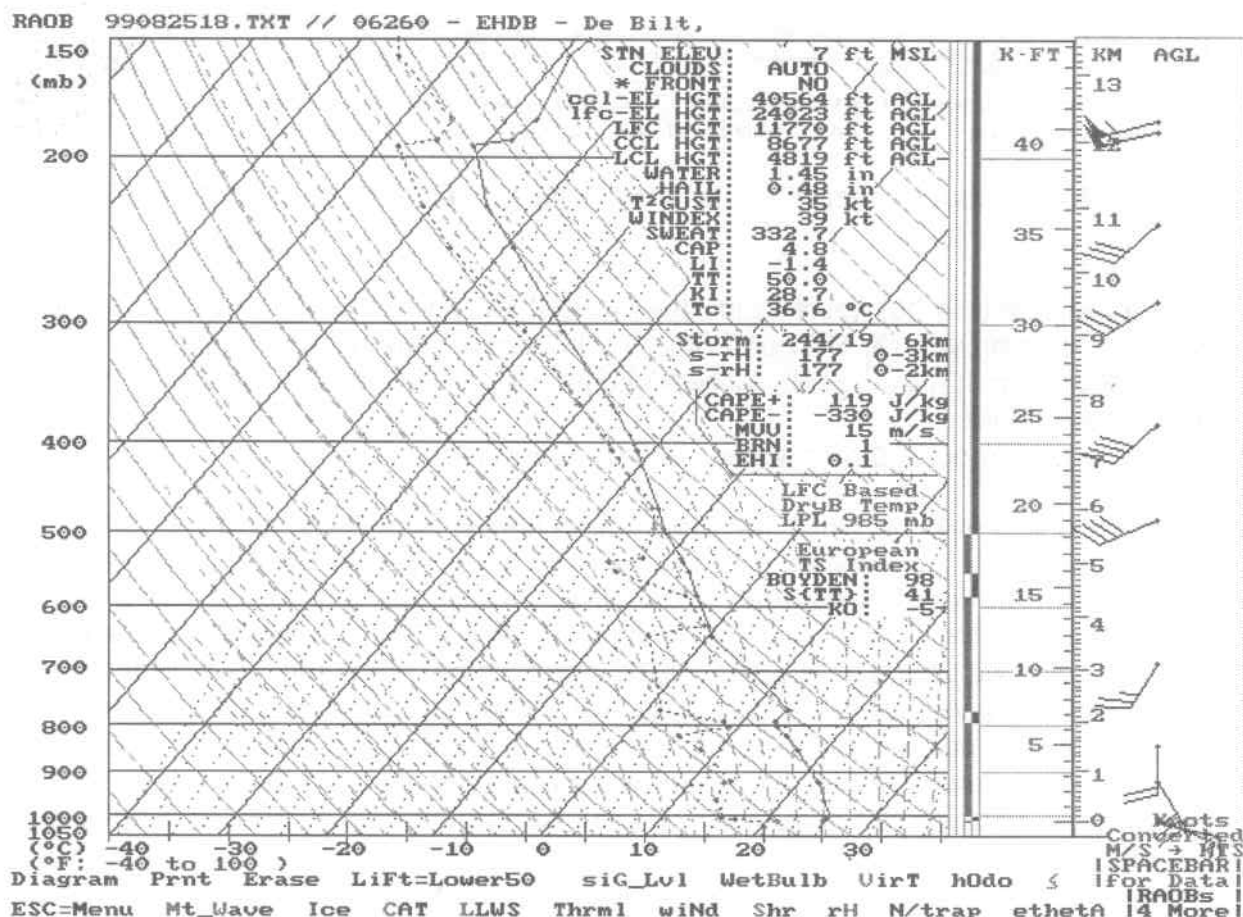
3.2.2 Waarnemingen van de onweersbuien

In het westen van het land werd op veel plaatsen melding gemaakt van 40-100 ontladingen per minuut, het actiefste onweer sinds enkele jaren. Vaak waren het combinaties van wijdvertakte wolkontladingen (ook wel "anvil crawlers" en "spider lightning" genaamd in Engelse publicaties) en verticale ontladingen. Windstoten kwamen ook voor, over het algemeen 10 tot 15 m s⁻¹. Op Terschelling werd echter 28.6 m s⁻¹ gemeten. Ook in de omgeving van Nieuwe Tonge (Zld) waren de windstoten waarschijnlijk zwaarder, daar werden bomen omgeblazen. Hagel is op enkele plaatsen waargenomen, bijvoorbeeld in de omgeving van Goes, Dirksland (Zld) (hooguit 1.5 cm doorsnede), Lisse en Houten, zonder vermelding van grootte. In Dordrecht werd hagel waargenomen bij de venijnige tweede bui die daar overtrok omstreeks 1:30h.

Van de KNMI-regenstations gaven Dirksland, Leiden, Harderwijk, Krabbendijke (Zld), en Ovezande (Zld) hagel aan. Bij de Hagelunie kwamen enkele schademeldingen binnen uit de gemeenten Borssele, Schouwen-Duiveland, Oostflakkee, Middelharnis, Wieringermeer en Noordoostpolder. De laatste betreft waarschijnlijk een clusterbui om ongeveer 3:00h.

3.2.3 Analyse van de bovenluchtwaarnemingen

Uit de radiosondegegevens van 18 en 00 UTC van de omgeving van de bui is het moeilijk een betrouwbare CAPE te bepalen. Er is een grondinversie met daarboven een 300 hPa dikke laag warme, vrij droge lucht. Het niveau van vrije convectie ligt, vanaf de grond bepaald, rond 750 hPa. Dit is behoorlijk hoog. Er moet dus eerst een hoeveelheid negatieve buoyancy overwonnen worden. Met optilling van de luchtlaag door dynamisch geforceerde stijgbewegingen op het koufront, convergentie op oude uitstroomgrenzen wordt de onderste laag koeler en vochtiger en kan er een CAPE worden aangesproken van 1000-1500 J kg⁻¹. De Boyden index is 98-99. Aan wolke toppen kan afkoeling plaatsvinden door uitstraling, waardoor de onstabiliteit bevordert wordt.



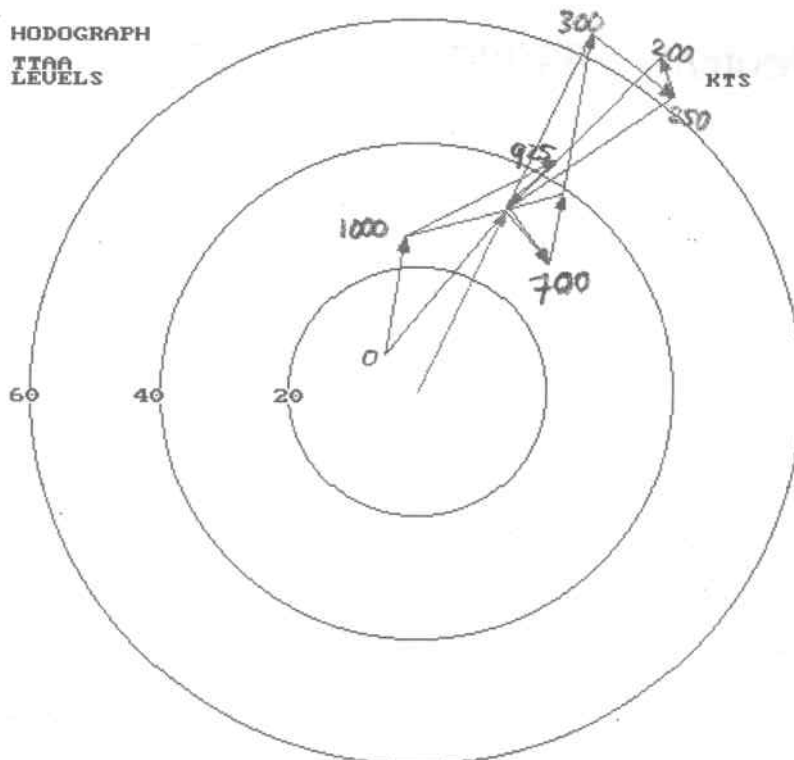
Figuur 21. Verticaal temperatuur- en windprofiel van De Bilt, 25 augustus 1999 om 18 UTC.



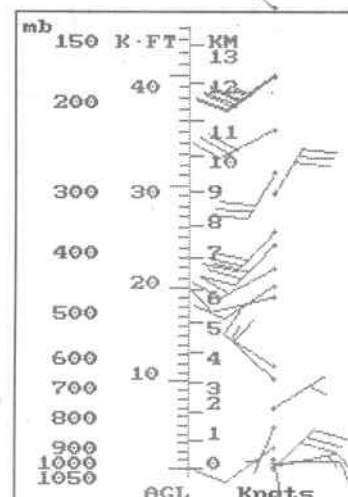
De temperaturen op 700 hPa liggen rond de 5 graden.

40

HODOGRAPH
TTAA
LEVELS



STORM RELATIVE



Helicity Information

Storm Motion: 205/32
Mean Wind: 214/33 6km
s-rH: 116 0-3km
s-rH: 116 0-2km

DATA LABELS: Off WIND_Relative Storm-Motion Plot Edit Wind Data
LEVELS: All or TTAA Storm-Relative Change Storm-Motion Save Wind Data
OPTIONS: Vector_3-D_Trajectory Level Print ESC/Menu [SpaceBar for Data]

Figuur 23. Aangepast hodogram De Bilt, 26 augustus 1999 om 00 UTC.

3.2.4 Samenvatting van de ontwikkeling en de bliksemactiviteit van het complex

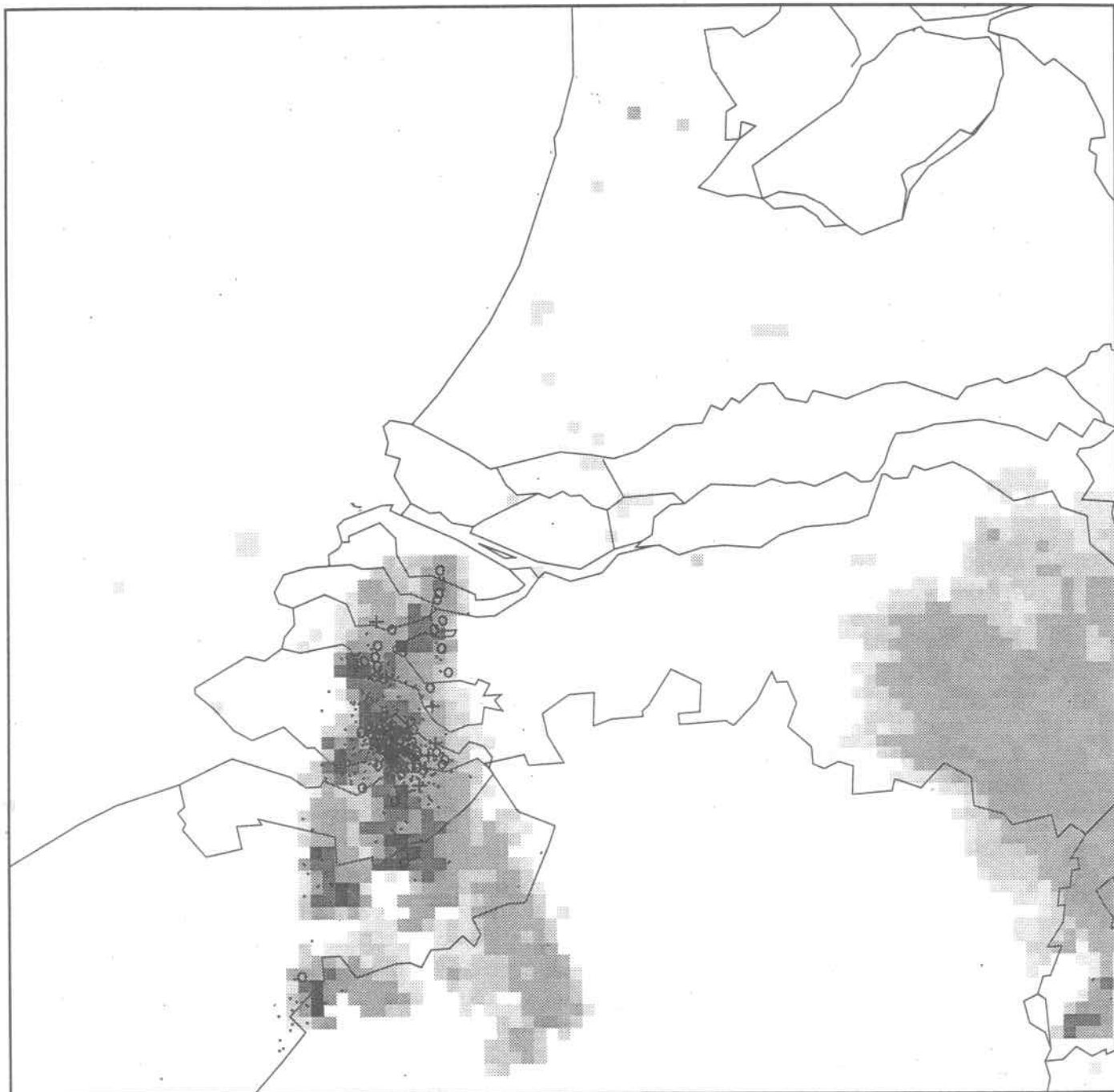
21:40-23:10h

De noordwest-zuidoost georiënteerde lijn vormt zich om 21:40h. De reflectiviteiten zijn dan nog laag. De eerste ontladingen zijn wolkontladingen van vrij kleine afmetingen, in de noordpunt van de lijn. De lijn en de bliksemactiviteit groeien explosief, terwijl in dit stadium nog relatief weinig wolk-aarde ontladingen voorkomen. Het zuidelijk deel van de lijn heeft nauwelijks bliksemactiviteit.

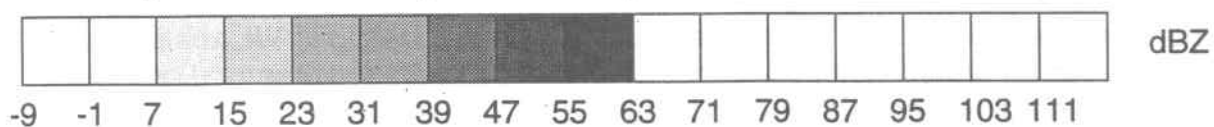
Een uur na het ontstaan is het percentage wolk-aarde ontladingen (vooral negatieve) toegenomen. De activiteit bereikt een piek en vanuit Zeeland worden hagel en zware windstoten gemeld. De zware windstoten bij Nieuwe Tonge lijken samen te hangen met het groeien van een nieuwe cel aan de noordwestkant van het complex. Het verband tussen snelle secundaire celgroei en zware windstoten werd opgemerkt door Schmid *et al.* (2000).

De echotoppen reiken tot bijna 15 km, de VIL tot 30 kg m⁻². De dip in VIL zoals om 22:22h te zien in de grafiek komt door het incidenteel ontbreken van een radarstraal van De Bilt, duidelijk te zien (niet getoond) in het echotoppenpatroon. De radar van Den Helder is te ver van de bui om de VIL te bepalen.

SAFIR CG + IC Reflectivity 990825 22:40 UTC



Plotted: 346 intracloud(.) 84 negative cloud-to-ground(o) 14 positive cloud-to-ground(+)
 in a time span of 3 min centered on radar time
 Percentage: 22.1 % cloud-to-ground 3.2 % positive from a total of 444 strokes



Figuur 24 (op linker pagina). PseudoCAPPI-radarbeeld van 25 augustus 1999, 22:40h UTC, met ontladingen in een 3 minuten-periode. Het complex heeft nu zijn maximale bliksemactiviteit bereikt en er valt schade-veroorzakende hagel in Goes en omstreken.

Een verticale dwarsdoorsnede vanuit De Bilt door de actiefste kern tijdens het hoogtepunt van dit complex om 22:34h, is te zien in figuur 2 op pagina 11. Tegen het eind van deze periode (23:00h) ontwikkelen zich cellen aan de noordwestpunt van de lijn met VIL van 25-30 kg m⁻². De bliksemactiviteit komt daarin pas een half uur later goed op gang, als de VIL al wat afgenomen is. De oudere zware cel produceert nu relatief meer negatieve ontladingen. Op de volgende pagina's (figuren 25 en 26) zijn de VIL- en echotoppenbeelden te zien van 23:04h UTC.

23:10-0:40h

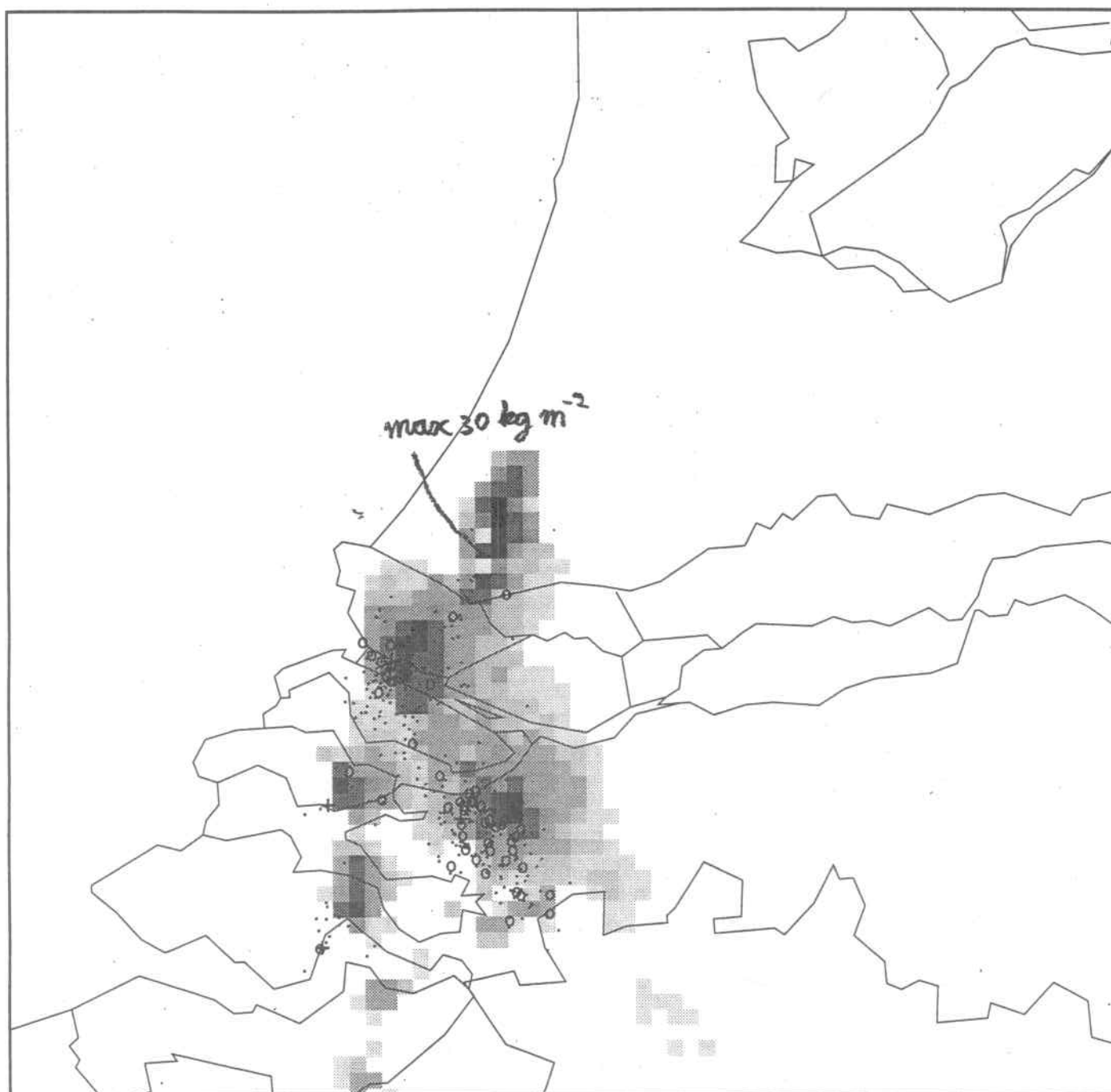
De bliksemactiviteit van de zware cel is aan het afnemen. Om 23:55h is hij niet meer te herkennen als cel, maar als deel van de stratiforme zone. Aan de noord- en noordwestkant hebben de cellen zich in een lijnvorm georganiseerd. Vanaf 23:25h komen er enkele wolkontladingen voor in het aambeeld aan de oostkant van de ontwikkelende cel aan de noordpunt, en iets later ook in het aambeeld ten westen van de lijn. Aan de noordpunt komt een zware echo overhang voor (niet getoond), indicatief voor sterke stijgende bewegingen. Aan de zuidoostkant van de stratiforme zone groeit om 23:55h een boogvormig staartje dat om 0:40h weer uitgedoofd is. Het geheel lijkt sterk op het conceptuele model van een symmetrisch MCS (Houze *et al.*, 1990), met een lijnvormige convectieve zone aan de voorzijde, een overgangszone met lage reflectiviteit, gevolgd door de stratiforme zone met middelmatige reflectiviteiten en een zogenaamde "bright band" (zie dwarsdoorsnede, figuur 29) vlak onder het nul graden niveau, door sterkere reflectie van smeltende sneeuw. De structuur komt vooral tot uiting in de verticale doorsnede van de bui. De kromming in de lijn lijkt iets op een zogenaamde "bow echo" (figuur 28), veroorzaakt door krachtige divergerende uitstroomwinden aan het aardoppervlak. Alleen in Castricum worden daarbij windstoten gemeld. Het aandeel verticale ontladingen is in deze fase gepiekt tot 24%, en 3% positieve ontladingen van het totaal. De VIL is echter gehalveerd. Hagel veroorzaakt schade in de gemeente Wieringermeer. De bliksemactiviteit in de stratiforme zone is laag en bestaat uit enkele wolkontladingen en positieve ontladingen.

Figuur 25 (volgende pagina). Vertically Integrated Liquid van het complex om 23:04h UTC. Duidelijk is te zien dat de bliksemactiviteit zich vooral aan de achterzijde van VIL bevindt. De uitloper aan de noordzijde is een nieuwe cel. De hoogste waarde bevindt zich in de noordelijke kern, met 30-35 kg m⁻².

Figuur 26 (pagina 45). Het bijbehorende echotoppenbeeld van de radar van Den Helder. Hierop is duidelijk het overkoepelende aambeeld te zien dat zich met de krachtige bovenwind mee ver uitstrekt voor de onweersbui uit. De hoogste toppen zijn 13 km hoog.

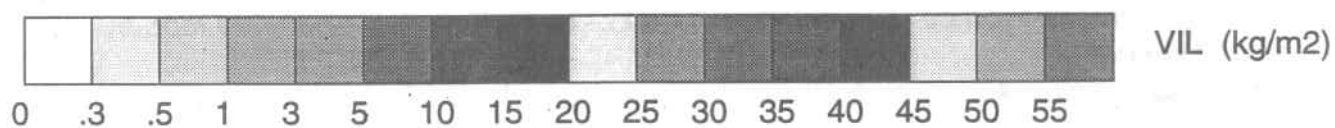
Figuur 27 (pagina 46). PseudoCAPPI-beeld van 23:25h UTC. Te zien zijn de ontladingen buiten de neerslag aan de noordpunt van het onweerscomplex.

SAFIR CG + IC Vert. Integr. Liquid 990825 23:04 UTC

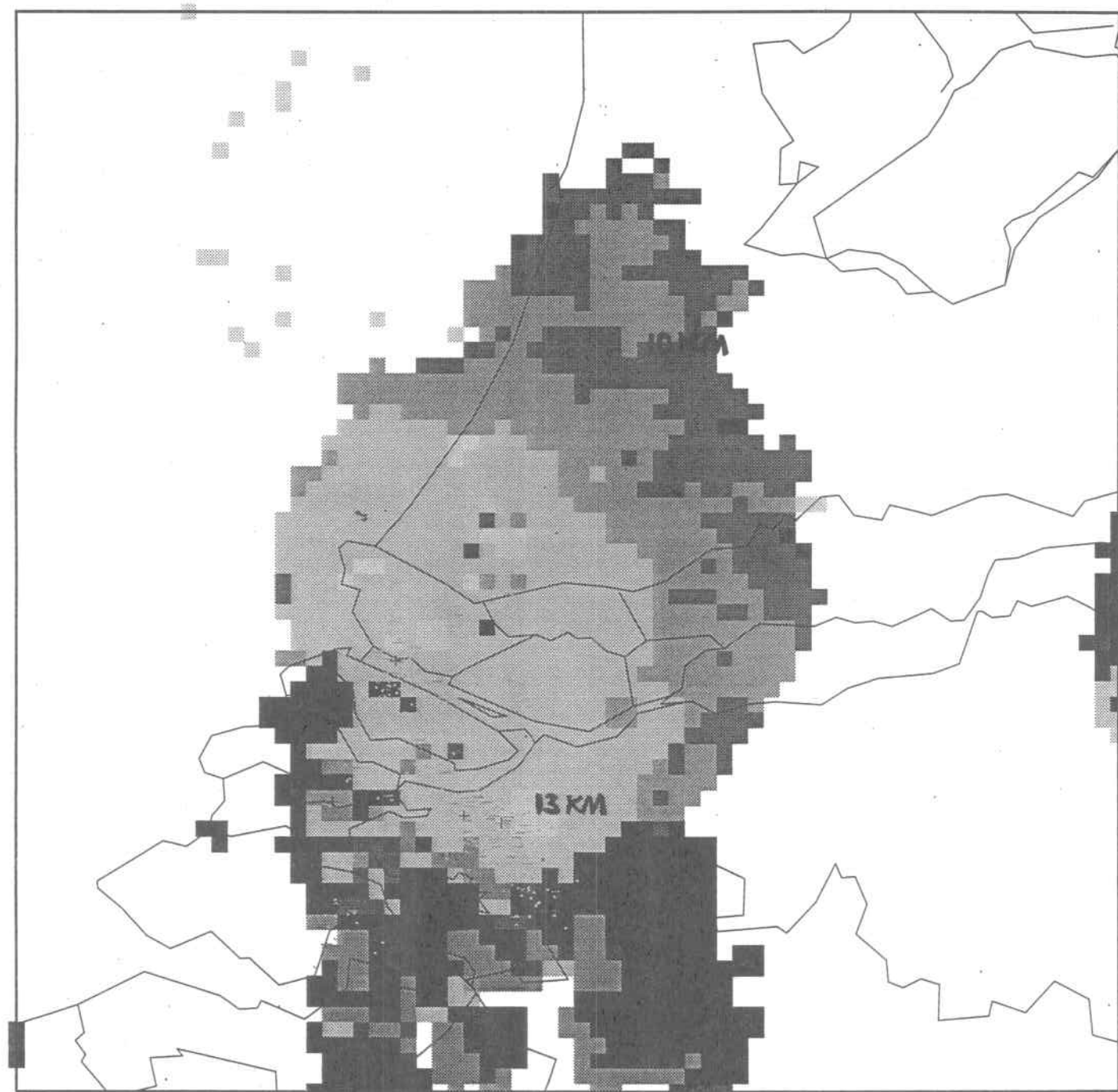


Plotted: 297 intracloud(.) 56 negative cloud-to-ground(o) 5 positive cloud-to-ground(+)
in a time span of 3 min centered on radar time

Percentage: 17.0 % cloud-to-ground 1.4 % positive from a total of 358 strokes



SAFIR CG + IC Echo Top Heights 990825 23:04 UTC



Plotted: 299 intracloud(.) 58 negative cloud-to-ground(-) 5 positive cloud-to-ground(+)
in a time span of 3 min centered on radar time

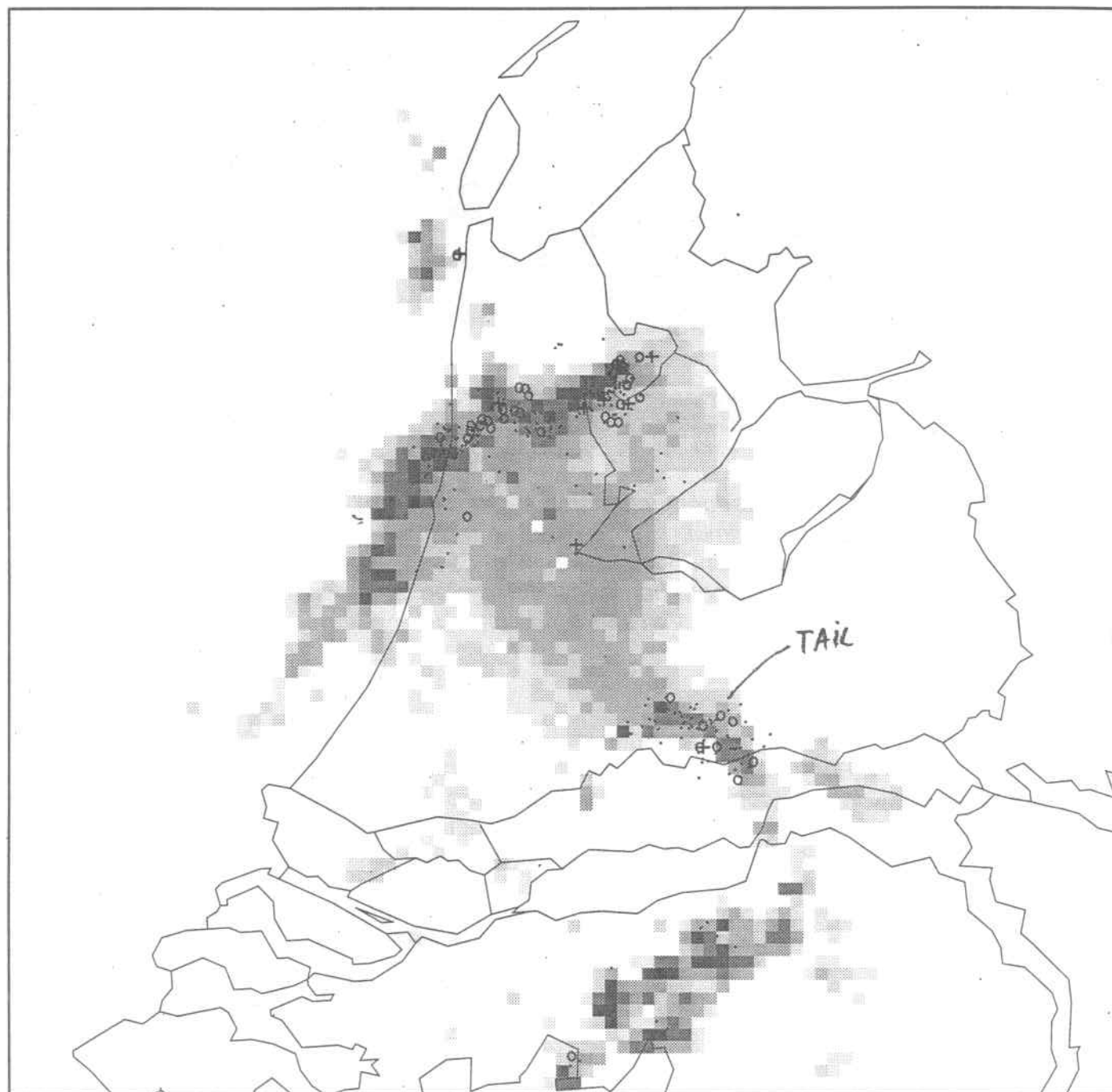
Percentage: 17.4 % cloud-to-ground 1.4 % positive from a total of 362 strokes



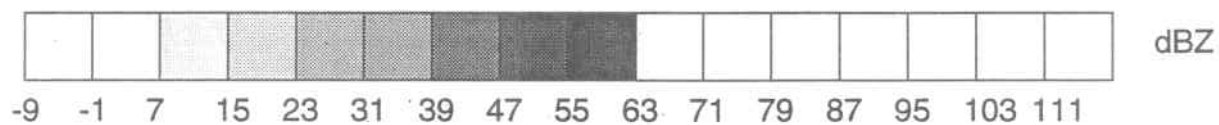
Echotop heights (km)

-9 -1 7 15 23 31 39 47 55 63 71 79 87 95 103 111 dBZ

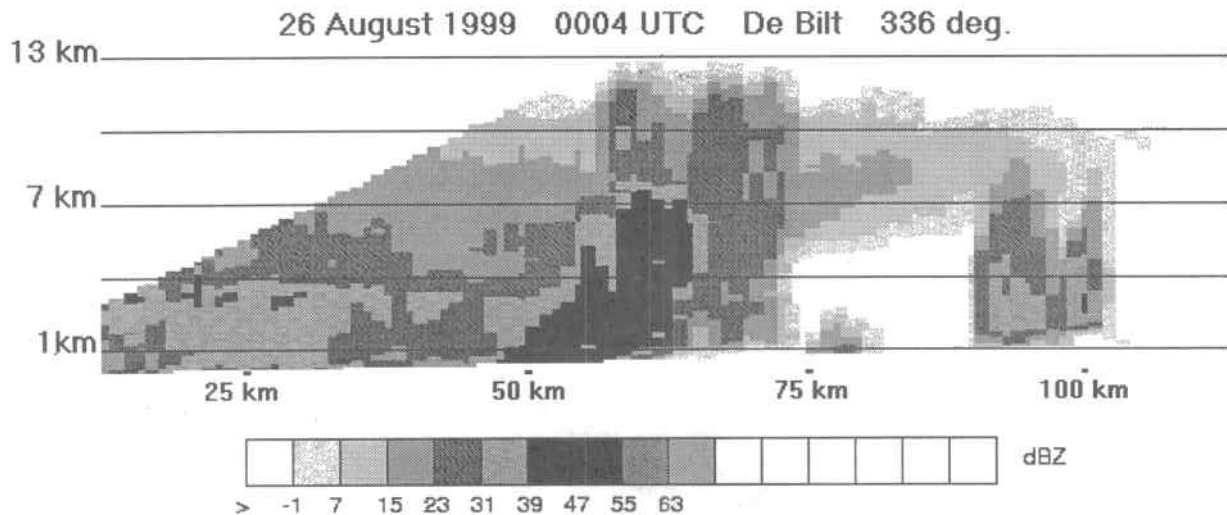
SAFIR CG + IC Reflectivity 990826 00:10 UTC



Plotted: 232 intracloud(.) 48 negative cloud-to-ground(o) 8 positive cloud-to-ground(+)
 in a time span of 3 min centered on radar time
 Percentage: 19.4 % cloud-to-ground 2.8 % positive from a total of 288 strokes



Figuur 28 (vorige pagina). PseudoCAPPI-beeld van 00:10h UTC. Het complex bestaat nu uit een lijnvormige convectieve zone, daarachter een stratiforme zone en het staartje.



Figuur 29. Verticale dwarsdoorsnede van het complex om 00:04h UTC, vanuit De Bilt over de 336 graden-azimuth. De lichtere tint in de kern betreft een reflectiviteit van 55-63 dBZ. Op ongeveer 25 km afstand van de radar zijn op circa 3 km hoogte, iets onder het nulgradenniveau, hogere reflectiviteiten te vinden (39-47 dBZ) als gevolg van de hogere reflectie van smeltende sneeuw.

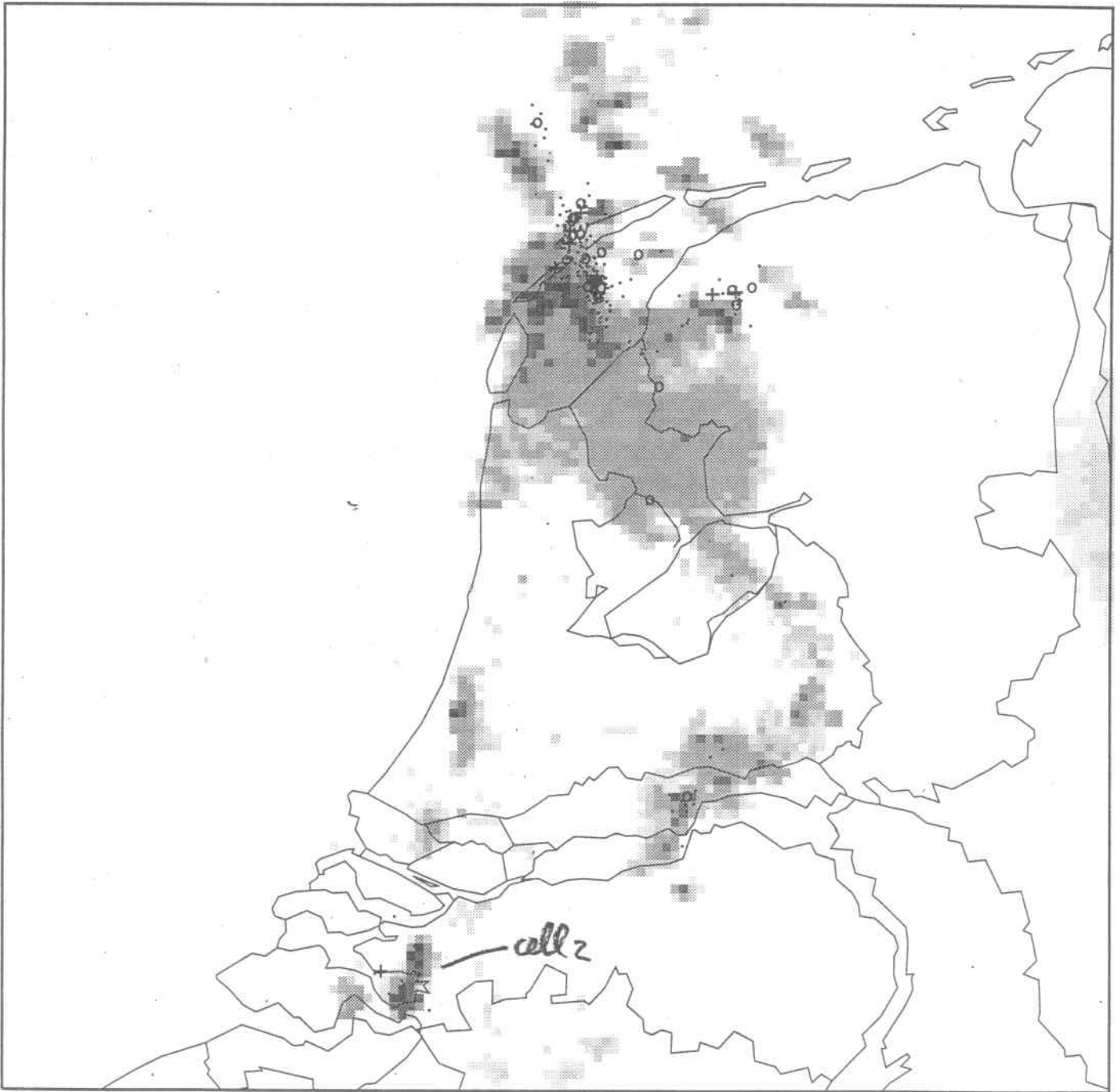
0:40-1:25h

Snel ontwikkelende buien ten noorden van de lijn worden boven de Waddenzee in het systeem opgenomen (figuur 30), waarna de lijn meer een noordwest-zuidoost oriëntatie krijgt. Het percentage wolk-aarde is daarbij weer afgenomen. In de stratiforme zone komen alleen dichterbij de convectieve zone enkele wolkontladingen voor. De bui trekt weg uit het detectiegebied, zodat het verdere verloop niet betrouwbaar is.

In de grafiek loopt het gebied met reflectiviteiten hoger dan 40 dBZ op doordat deze waarden ook steeds meer in het stratiforme gebied voorkomen.

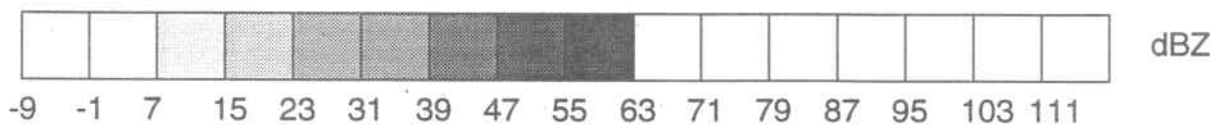
Figuur 30 (rechter pagina). PseudoCAPPI-radarbeeld met bliksem om 00:55h UTC. Op dat moment is het noodweer op Vlieland en Terschelling, waarbij windstoten werden gemeten tot 103 km per uur.

SAFIR CG + IC Reflectivity 990826 00:55 UTC



Plotted: 216 intracloud(.) 32 negative cloud-to-ground(o) 10 positive cloud-to-ground(+)
in a time span of 3 min centered on radar time

Percentage: 16.3 % cloud-to-ground 3.9 % positive from a total of 258 strokes



Na het complex:

De buien die na het complex overtrekken (figuur 19 met synops) zijn geclusterd in een ruwe noord-zuid lijn en hebben veel negatieve ontladingen. De reflectiviteitspatronen zien er chaotisch uit. Ze zijn ontstaan vanaf 0:25h. De echotoppen reiken tot 12 kilometer en de VIL tot 20 kg m^{-2} . De meest zuidelijke is de zwaarste, die piekt om 1:40h met 30 strokes per minuut boven de Krimpenerwaard. Het voorheen smalle bliksemspoor is dan breder geworden. Daarna vervalt de bui in wat kleine celletjes. Daarbij neemt het percentage verticaal toe tot rond de 30%.

De noordelijke cel is smaller en piekt om 2:10h met 17 ontladingen per minuut. Het percentage wolk-aarde is tijdens de piek meer dan 45%. Ook hier wordt het bliksemspoor breder na de piek.

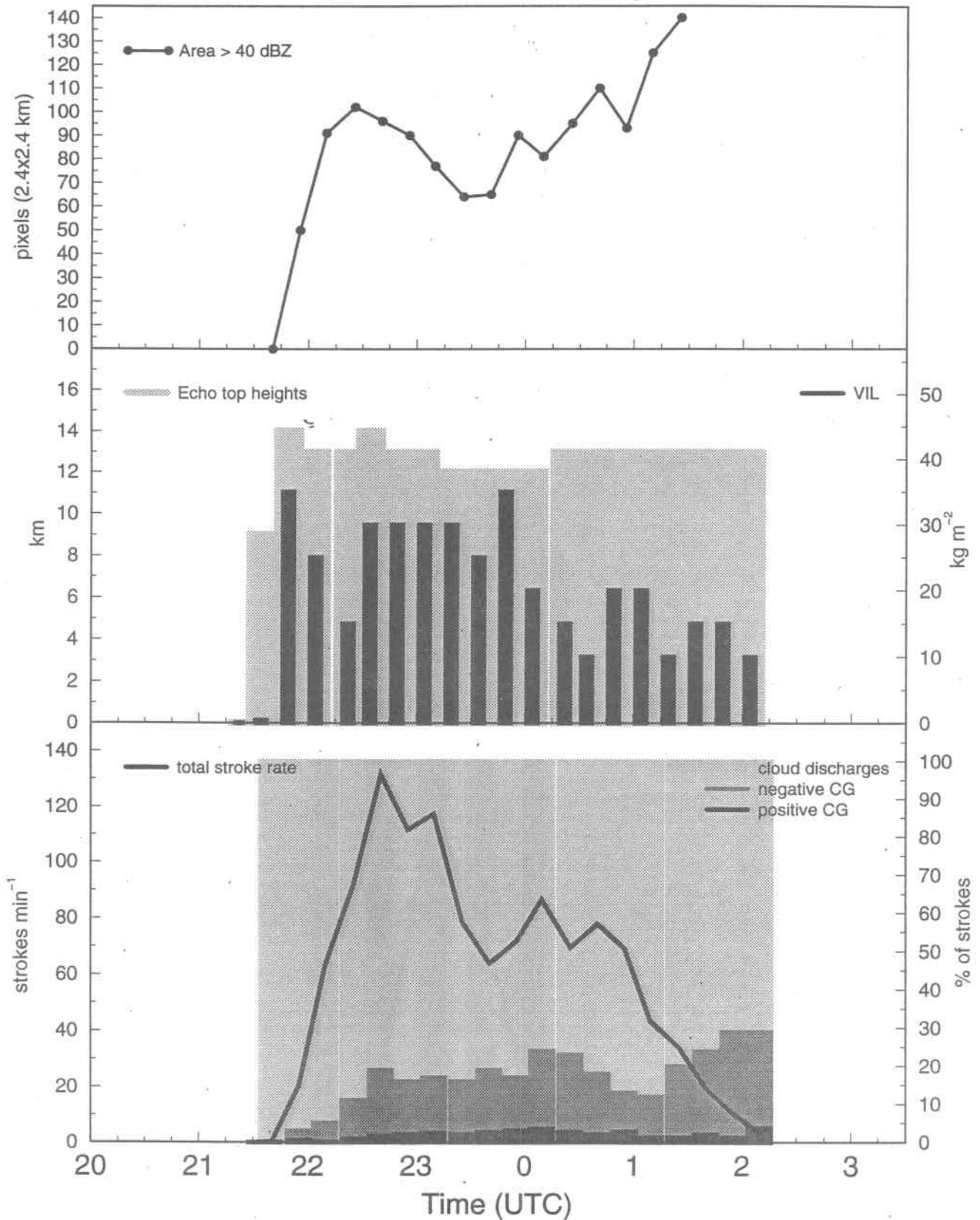
3.2.5 Samenvatting van de opvallendste verschijnselen van deze case:

- ❖ Het complex produceert naar verhouding meer wolkontladingen dan de daarna volgende buien (cel 2 en 3), die in de nacht passeerden. De VIL en de echotoppen zijn ook hoger.
- ❖ De activiteitspiek valt voor de drie onweersbuien samen met de echotoppenpiek en iets na (15 minuten) de reflectiviteitspiek. Met de VIL is de activiteit niet zo goed gecorreleerd in dit geval, zoals afgeleid uit de grafiek. Dit kan komen doordat in de grafiek de hoogste VIL en echotop van het hele complex staat uitgezet. Bij het staartje komt het maximum van de echotoppen en de VIL voor de piek.
- ❖ De bliksemactiviteit is in dit geval meestal geconcentreerd in de buurt van de VIL-pitten. Het is bij het complex soms waargenomen dat de hoogste bliksemactiviteit zich eerst aan de achterkant (benedenwinds van de bui-relatieve bovenwind) van de VIL-kernen bevindt. Daarna neemt de VIL iets af en bevindt de (nog hogere) bliksemactiviteit zich dicht bij de VIL-kern.
- ❖ Het percentage positieve ontladingen blijft vrijwel constant en laag gedurende de levensloop van deze onweersbuien.
- ❖ Er komen wolkontladingen voor in het aambeeld dicht bij de groeiende lijn.
- ❖ Negatieve ontladingen komen bijna alleen in de convectieve zone voor, terwijl positieve ontladingen ook in het stratiforme gebied voorkomen. Dit klopt met de bevindingen (bijv. Rutledge *et al.* 1990) met wolk-aarde bliksemdetectiesystemen.
- ❖ Bij de buien na het complex (cel 2 en 3) wordt het bliksemspoor breder na de piek.
- ❖ De bliksemproductie van cel 2 en 3 is minder efficiënt per oppervlak $> 40 \text{ dBZ}$ dan die van het complex en het "staartje".

Figuur 31 t/m 34 (pagina's 51 t/m 54). Grafieken van radarkenmerken en bliksemactiviteit gedurende de levensloop van de besproken onweersbuien.

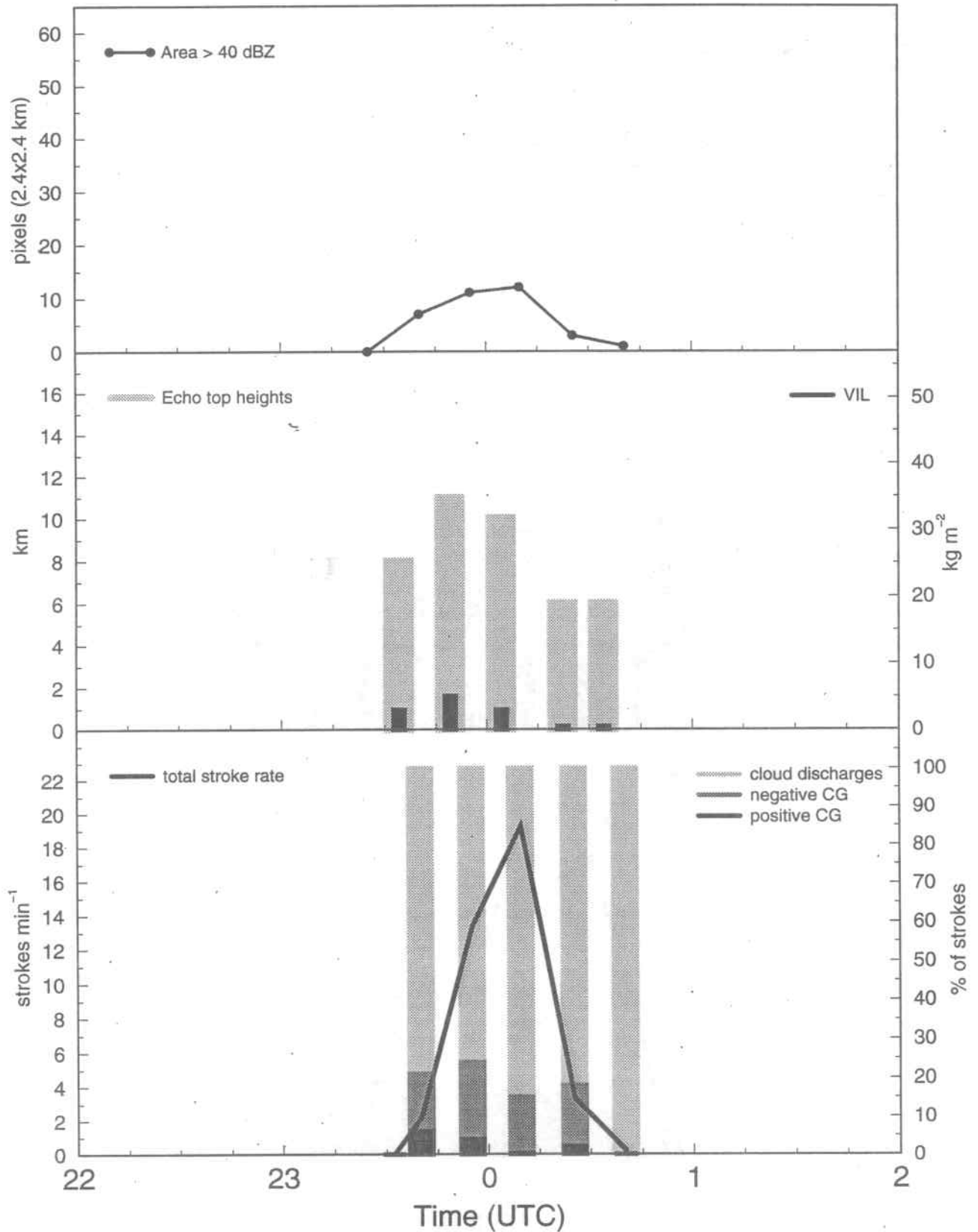
MCS – August 25/26 1999

radar and lightning characteristics



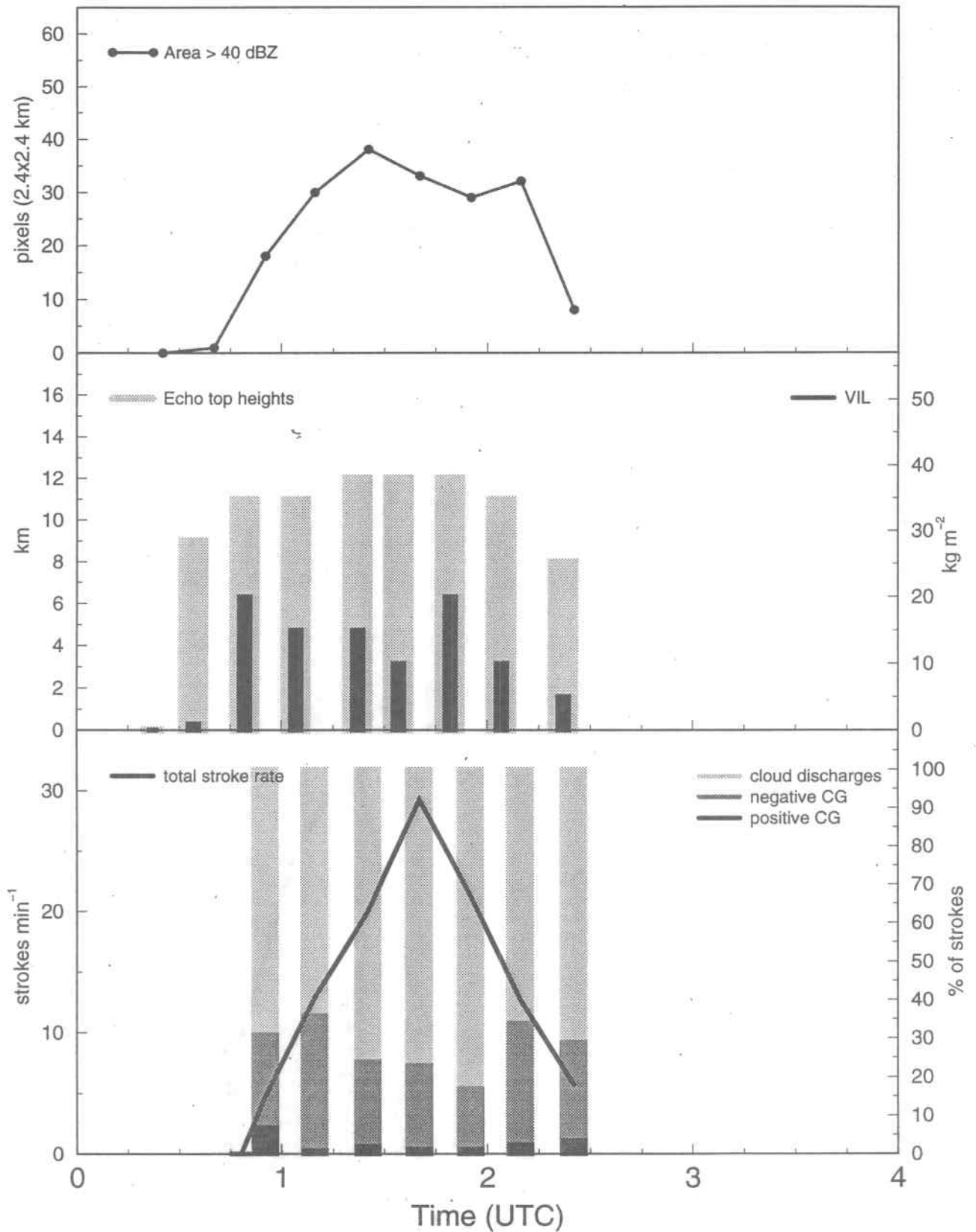
"tail" from MCS – August 25/26 1999

radar and lightning characteristics



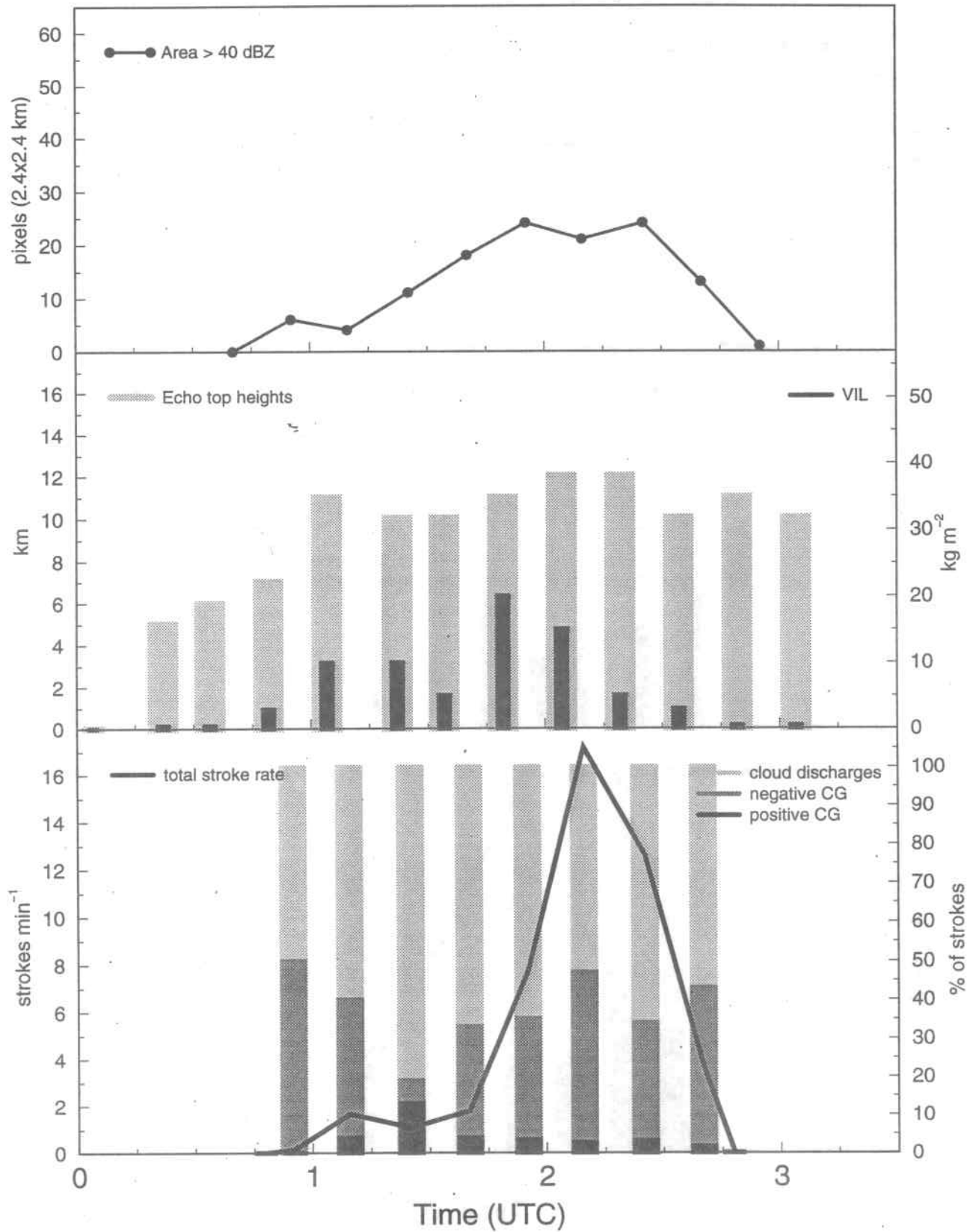
Cell 2 – August 26 1999

radar and lightning characteristics



Cell 3 – August 26 1999

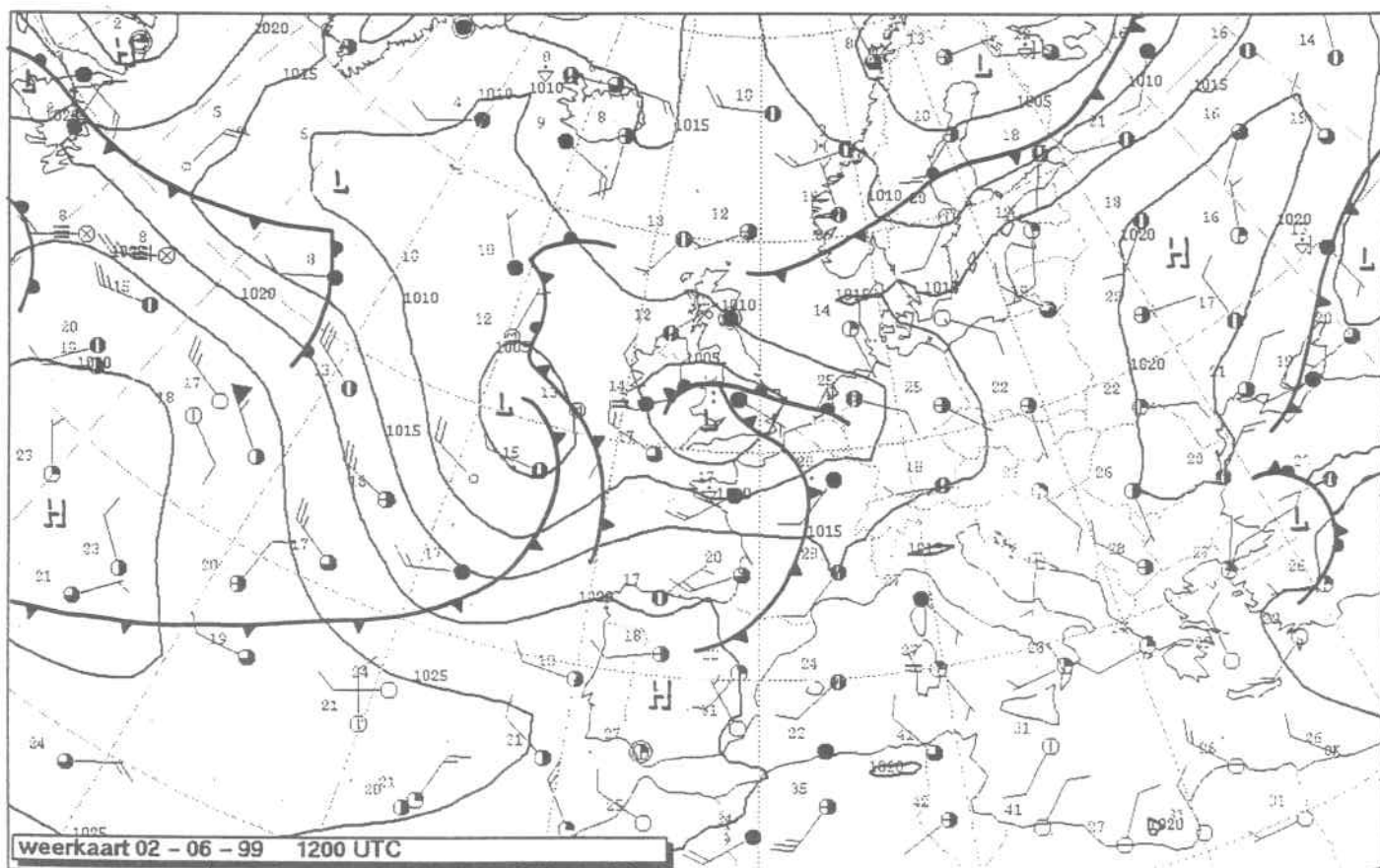
radar and lightning characteristics



3.3 2 juni 1999: Ingebedde cellen in het warmtefront, een actieve cluster en een buienlijn

3.3.1 Overzicht

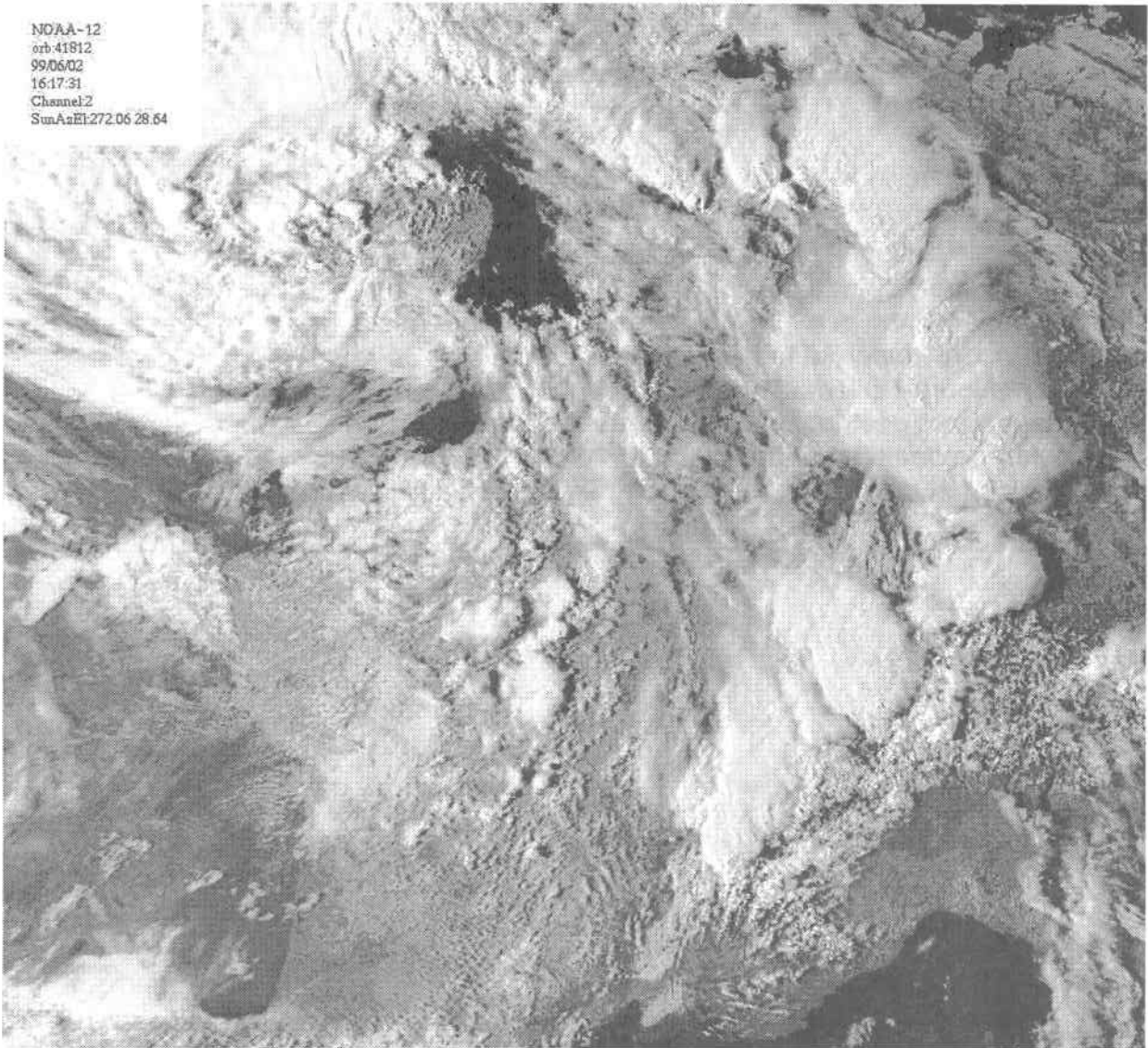
Een depressie trekt van Bretagne naar de Noordzee. 's Ochtends komt het warmtefront over, daarna ligt Nederland in een stukje warme sector met in het oosten temperaturen van 25 tot 27 graden. In de late middag passeert het koufront met in de noordwestelijke helft enkele onweersbuien. De temperatuur is voor het koufront in Noord-Holland 23 graden met een dauwpunt van 20 graden. De wind is voor het koufront oost tot zuidoost. Achter het koufront draait de wind naar het zuidwesten en daalt het dauwpunt naar 16 graden. Verder naar het zuidoosten is de lucht droger met dauwpunten onder de 10 graden.



Figuur 35. Weerkaart 2 juni 1999, 12 UTC (uit Dagoverzicht van het Weer, KNMI)

Op het warmtefront komt in de vroege ochtend nog uitgebreid actief ingebed onweer voor in België, dat al uitstervende Zuidwest-Nederland bereikt. In en aan de grens van het stratiforme frontale neerslaggebied komen kleine cellen voor. Deze zijn weinig actief. Aan het eind van de ochtend ontstaat aan de achterzijde van het warmtefront een actievere lijn die van Noord-Brabant naar Groningen trekt.

NOAA-12
orb:41812
99/06/02
16:17:31
Channel:2
SunAzEl:272.06 28.64



Figuur 36. NOAA VIS satellietbeeld van 2 juni 1999 om 16:17h UTC.

Achter het warmtefront ontstaan in oostelijk Noord-Brabant actieve clusters, die om 14:00-15:00h hun hoogtepunt bereiken en in de omgeving van Barchem en Lochem wind- en hagelschade veroorzaken.

Het koufront is in eerste instantie moeilijk te herkennen. Verspreid komen er onweersbuien op voor, zoals een actieve cluster die langs de Noordzeekust trekt. Naar verloop van tijd ontstaan in de namiddag steeds meer buien op het front in Noord-Holland, die tezamen in een lijn zijn gerangschikt. De lijn trekt over Friesland naar het noordoosten weg.

Zie ook de kaartjes met plotjes (figuren 37 t/m 39).

Figuren 37, 38 en 39 (pagina 57 t/m 59). PseudoCAPPI-beelden met bliksem en synops van 15-17 UTC.

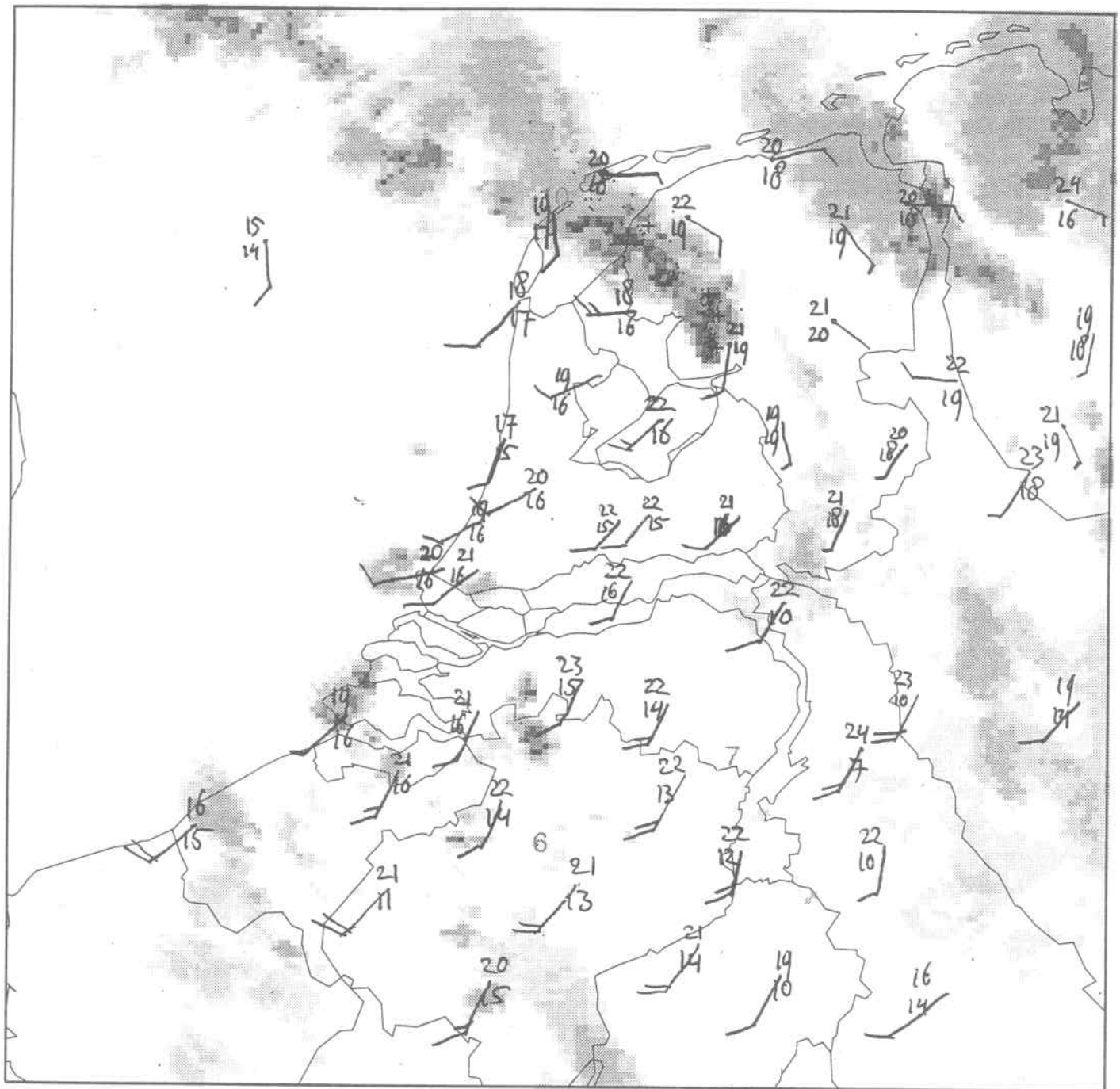
A hand-drawn map of the Pacific Northwest coast of the United States, showing various coastal features, islands, and numerous handwritten numerical annotations. The map includes labels for "cell 9", "cell 8a", and "cell 8c". The numbers are scattered across the map, often in pairs or groups, and some are connected by lines. The map is oriented with the coast on the left and the open ocean on the right.

A hand-drawn map of Europe with various numbers and lines indicating data points or boundaries. The map includes labels like "all 11", "20 18", "22 18", "23 19", "22 20", "23 20", "19 18", "20 18", "24 16", "24 16", "21 18", "25 14", "25 14", "20 17", "23 15", "22 15", "23 15", "22 16", "23 11", "23 11", "21 11", "20 13", and "20 13". The map is drawn on a grid background.

dBZ

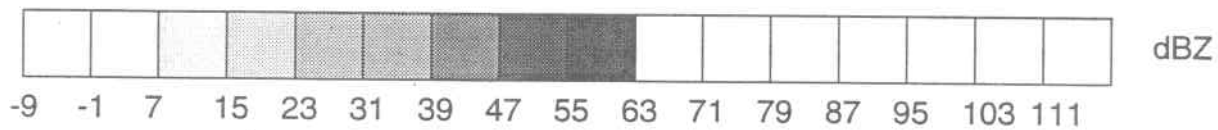
-9 -1 7 15 23 31 39 47 55 63 71 79 87 95 103 111

SAFIR CG + IC Reflectivity 990602 17:00 UTC



Plotted: 78 intracloud(.) 2 negative cloud-to-ground(o) 5 positive cloud-to-ground(+)
in a time span of 3 min centered on radar time

Percentage: 8.2 % cloud-to-ground 5.9 % positive from a total of 85 strokes



3.3.2 Waarnemingen van de onweersbuien

De ochtendbuien brachten weinig bijzonderheden. Rond 15 UTC werd het gebied van Lochem-Barchem-Ruurlo getroffen door zeer zware windstoten en hagel van minstens 4 cm grootte, waardoor veel schade aangericht werd.

In Rekken (bij Eibergen) werd om 15:15h een rolwolk (of arcus) waargenomen met woeste kolkingen en rukwinden. Iets later was dat het geval in Enschede.

In Deventer werden rond 15:10h windstoten van 24 m s^{-1} gemeten. Het regende toen al licht sinds 14:40h. Tussen 15:10h en 15:20h vielen er hagelstenen van 1.5 cm en liep het zicht terug tot 200 meter. Er viel 18 mm in 5 minuten tijd.

Bij de passage van het koufront tegen de avond in het westen van het land werden windstoten van 17 m s^{-1} gemeten. In Castricum werd hagel waargenomen. Een krantenartikel maakt ook melding van een "windhoos" of windstoten in Wognum bij Hoorn, even na 16 UTC. Bij de bui (cel 11) direkt ten zuidoosten van de bui van Wognum werd in Amsterdam-Zuidoost en later vanuit Wijdenes rotatie waargenomen van een uitgezakte wolkenbasis.

Op vliegveld Eelde was de passage van de buienlijn spectaculair, er werd melding gemaakt van een duidelijk roterende rolwolk aan de voorzijde van de kilometers lange wolkenmuur en enorme "wall clouds" (roterende uitzakkingen van de wolkenbasis) aan de achterzijde van de bui.

De Hagelunie ontving schademeldingen door hagel vanuit de gemeenten Vlagtwedde, Deventer (cel 8c), Markelo, Borculo, Lochem (alle drie cel 8a), Franekeradeel (koufront 's avonds), Noordoostpolder en West Maas en Waal (cel 8b, 14 UTC). Bij Vlagtwedde en de Noordoostpolder is het onzeker welke bui verantwoordelijk was voor de schade.

3.3.3 Analyse van de bovenluchtwaarnemingen

De temps van De Bilt en Saint Hubert(B) geven om 06 UTC met de waargenomen temperaturen geringe onstabiliteit aan, in de orde van 150 J kg^{-1} en er moet eerst negatieve buoyancy overwonnen worden. De ingebedde convectie in het warmtefront zal dan ook vooral met dynamische optilling tot stand komen. Als op deze temps de maximumtemperatuur gebruikt wordt blijkt het potentieel voor zware convectie in de middag ($\text{CAPE} > 1500 \text{ J kg}^{-1}$). De Boyden index is 's ochtends 96.

Om 12 UTC is de temp van De Bilt niet goed bruikbaar, omdat de sonde dwars door een onweersbui is opgelaten. De temp vertoont een merkwaardig, vochtig temperatuurprofiel. De temps van Essen en vooral die van Ukkel zijn in dit geval beter bruikbaar. Op basis van de SYNOP-waarnemingen kan er in het westen van het land een maximale CAPE worden aangesproken van 1000 J kg^{-1} , verder naar het oosten gaat dit richting 1600 J kg^{-1} . De Boyden index is in het oosten 98, in het westen van Nederland 97.

De 700 hPa temperatuur is ruim 3 graden Celsius.

Figuur 40 (op volgende pagina boven). Verticaal temperatuur- en windprofiel van De Bilt, 2 juni 1999 06 UTC.

RAOB 99060206.TXT // 06260 - EHDB - De Bilt,

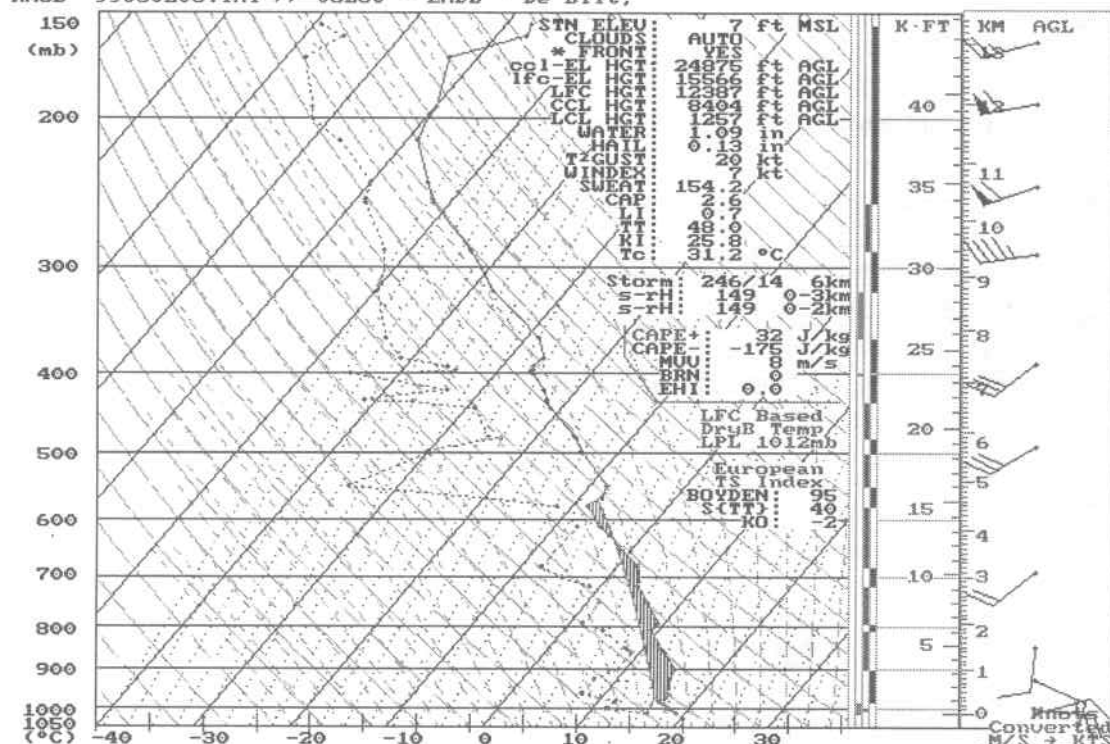


Diagram Prnt Erase LiFt=Best_300 siG_Lv1 WetBulb Uirt hOdo < SPACEBAR
ESC=Menu Mt_Wave Ice CAT LLWS Thrml wiNd Shr rH N/trap etheta 14 More

RAOB UK9906~1.TXT // 06447 - EBUM - Uccle,

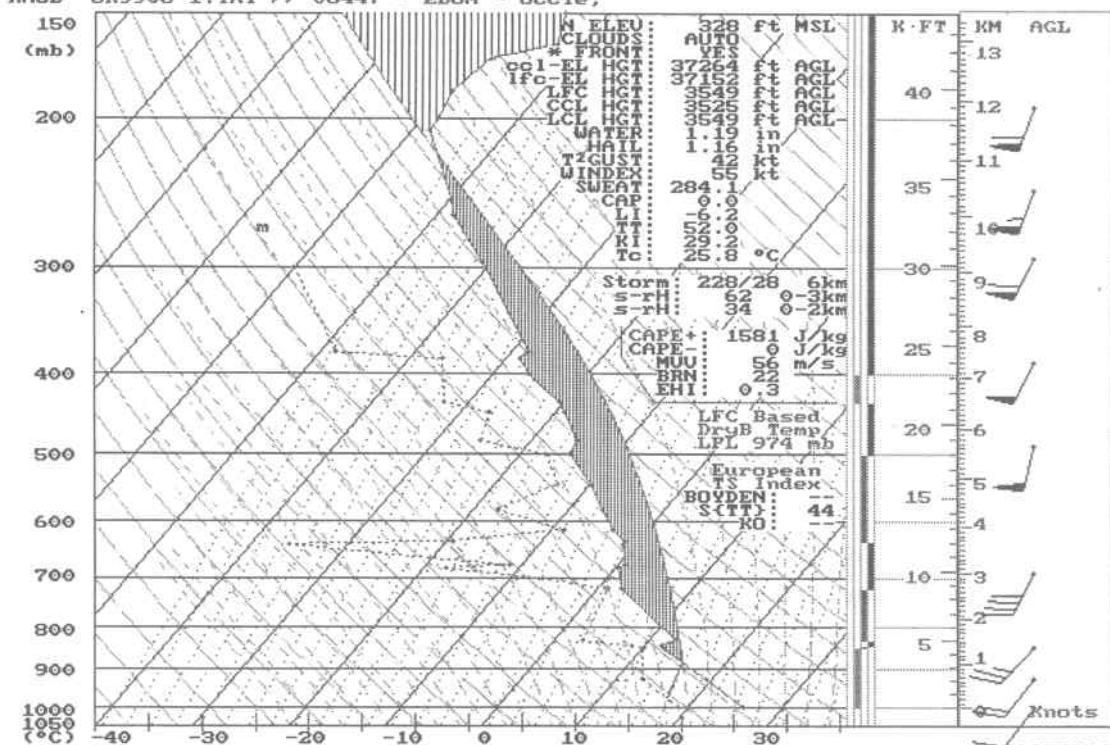


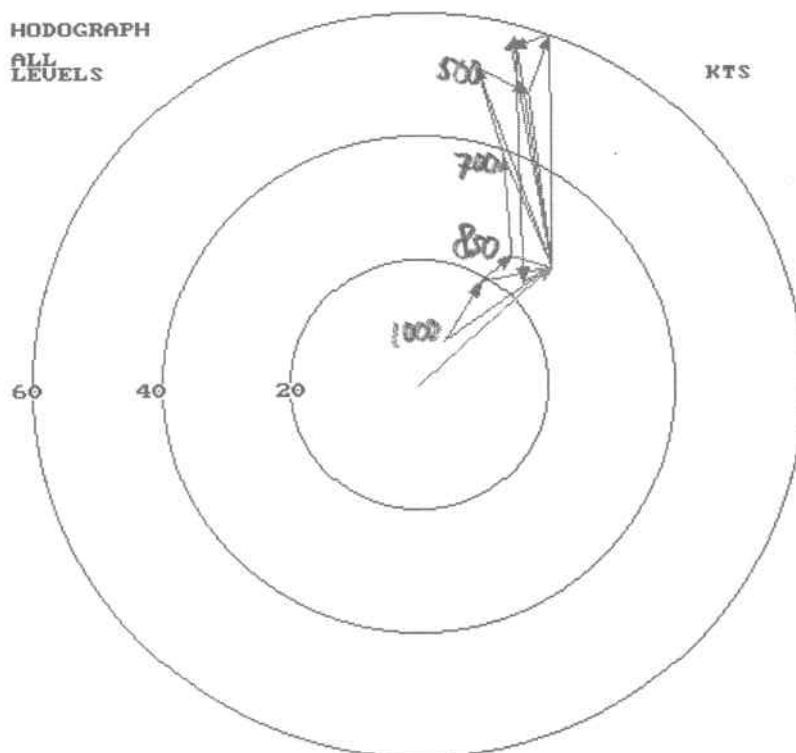
Diagram Prnt Erase LiFt=Lower50 siG_Lv1 WetBulb Uirt hOdo < SPACEBAR
ESC=Menu Mt_Wave Ice CAT LLWS Thrml wiNd Shr rH N/trap etheta 14 More

Figuur 41. Verticaal temperatuur- en windprofiel van Ukkel, 2 juni 1999 12 UTC.

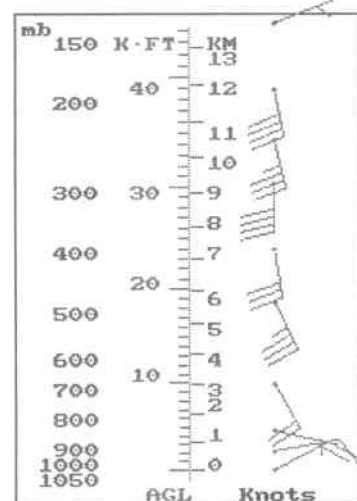
De Bilt en Ukkel geven een windscheringsvector van circa 12 m s^{-1} wat beschouwd over de hele gebruikte dataset vrij groot is. Essen geeft echter 8 m s^{-1} . Van hoge heliceiteit is geen sprake. Dit pleit niet bijzonder voor eventuele supercells (zware onweersbuien met een roterende stijgstroom). Wel is in de temps van Ukkel en Essen een vrij dunne, droge laag op middelbaar niveau te vinden wat een microburst kan veroorzaken. Verzadigde dalende lucht met neerslag valt door de droge laag, waardoor menging en verdamping optreedt waarbij de lucht verder afkoelt. In de onstabiele omgeving wordt de neerwaartse beweging versneld. Bij het bereiken van de grond spreidt de lucht zich horizontaal uit waarbij het zeer zware windstoten kan veroorzaken. Atkins en Wakimoto (1991) vonden dat voor alle "wet" microburst cases die zij onderzochten, het verschil in equivalente potentiële natteboltemperatuur tussen het minimum op middelbaar niveau en dat aan de grond groter was dan 20 graden. Voor de temp van Ukkel bedraagt het verschil circa 23 graden.

RAOB UK9906~1.TXT // 06447 - EBUM - Uccle,

HODOGRAPH
ALL
LEVELS



STORM RELATIVE



Helicity Information

Storm Motion: 228/28
Mean Wind: 198/37 6km
s-rh: 62 0-3km
s-rh: 34 0-2km

DATA LABELS: Off or TTA WIND_Relative Storm-Motion Plot Edit Wind Data
LEVELS: All or TTA Storm-Relative Change Storm-Motion Save Wind Data
OPTIONS: Vector_3-D_Trajectory Level Print ESC/Menu [SpaceBar for Data]

Figuur 42. Hodogram van Ukkel om 12 UTC.

De treksnelheid van de buien is ongeveer 17 m s^{-1} van ZW naar NW. Nieuwe cellen groeien meestal aan de zuidoostkant of tussen twee cellen in. Steeds is een gebied met stratiforme neerslag aan de noord- of noordwestkant aan de cel verbonden. Zo'n stratiform gebied vormt zich in het algemeen aan de zijde van de cel waar de bui-relatieve winden op grotere hoogten heen waaien. Dit komt goed overeen met gegevens uit het hodogram van Ukkel. Volgens het hodogram van Essen (niet getoond) zou dat aan de noordoostkant zijn. Dat geldt wel voor de buien in Duitsland.

3.3.4 Samenvatting van de ontwikkelingen en de bliksemactiviteit van de onweersbuien

Achteraan dit hoofdstuk bevinden zich de radar- en bliksemgrafieken van de cellen.

7:00-14:00h (warmtefront)

In de stratiforme regenzone van het warmtefront bevinden zich enkele kernen van hoge reflectiviteit. De hoge activiteit ($40 \text{ strokes min}^{-1}$ over het geheel om 7:30h) in het westen van België dooft langzamerhand uit. De zuidoostkant van het warmtefront bestaat uit enkele korte regenbandjes, waar zich cellen op ontwikkelen. Van cel 2 in zo'n regenband is op pagina 71 het verloop van de bliksemactiviteit en radarkenmerken getoond. De activiteit is echter laag, meestal slechts 2 ontladingen per minuut. De cellen hebben echotoppen tot 10 kilometer en VIL-waarden van 15 kg m^{-2} , hoewel hogere waarden kunnen zijn opgetreden omdat slechts uurlijkse informatie hierover aanwezig is.

Over het algemeen brengen de cellen en het ingebedde actieve onweer relatief veel verticale ontladingen voort, meestal meer dan 30 procent van het totaal. Bij cel 2 ligt de bliksemactiviteit na 10 UTC (na de piek) aan de voorzijde van de celkern.

Dan ontstaat er om 10:30h aan de achterste regenband van het warmtefront een actief lijntje (grafiek op pagina 72). Om 9:30 is dit in België als een klein buitje ontstaan. De nog brokkelige lijn produceert ontladingen vanaf 11:00h, wanneer het boven Noord-Brabant ligt. Tot 12 uur is het wolk-aarde gehalte zeker 45% van het totaal en het percentage positief is ook hoog, rond de 8%. Dit bij ongeveer 9 ontladingen per minuut. De VIL is circa 10 kg m^{-2} , de echotoppen reiken tot 9 km. Om 11:45h lijken de ontladingen zich meest aan weerszijden van de hoge reflectiviteiten te bevinden. Om 12:00h geldt dit voor de verticale ontladingen, terwijl er wel wolkontladingen in de kern voorkomen. De lijn is dan een vloeiend geheel geworden.

Tot 12 UTC waren de reflectiviteitswaarden nog nauwelijks boven de 47 dBZ uitgekomen. Vanaf dit tijdstip neemt de neerslagproductie langzaam toe met ook waarden boven 47 dBZ.

Het wolk-aarde percentage is nu kleiner, rond de 35% en het aandeel positief blijft vanaf nu laag: 2%. Om 12:45h bereikt de bliksemactiviteit zijn piek. De lijn ligt dan van zuidwest Friesland naar Zwolle. De negatieve ontladingen bevinden zich wederom aan de randen van de lijn en wolkontladingen komen door de hele lijn voor. De VIL vertoont een sterke lijnvorm met maximaal 20 kg m^{-2} , met echotoppen tot 12 kilometer. Opvallend is dat de bliksemactiviteit zich direct aan de achterzijde van de VIL bevindt.

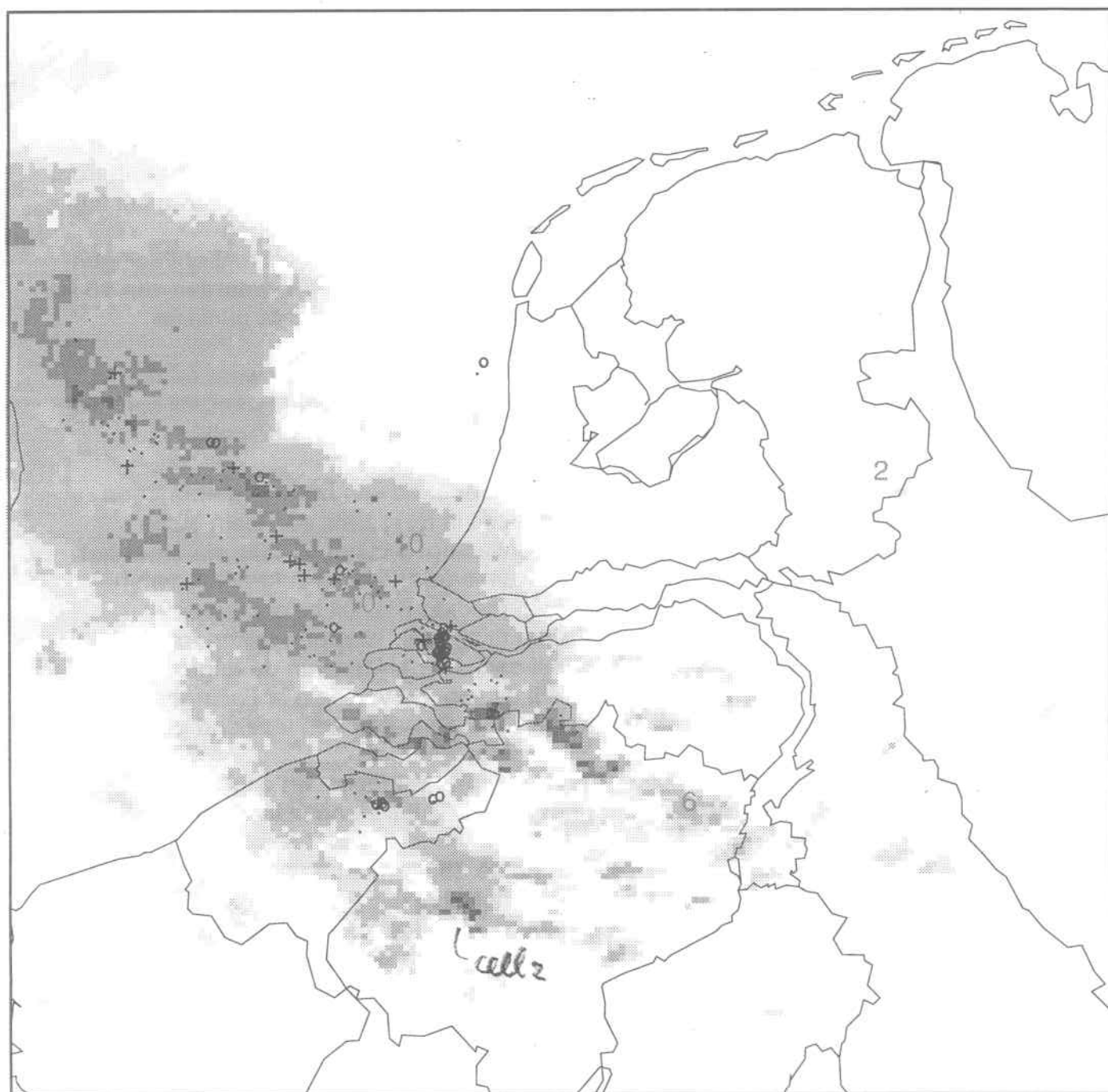
Positieve ontladingen komen het meeste voor bij het noordwestelijk deel van de lijn. Vanaf 13:00h groeit een stratiform gebied daar omheen.

Om 13:30h is de activiteit van het noordwestelijk deel sterk afgenomen. Het zuidelijk deel blijft actief tot 14:00h, om daarna te eindigen met relatief veel positieve ontladingen (5% bij $5 \text{ strokes min}^{-1}$). De lijn bevindt zich dan al in Groningen, waar de detectie verminderd is.

Figuur 43 (pagina 64). *PseudoCAPPI-beeld met bliksem van 2 juni 1999 om 09 UTC.*

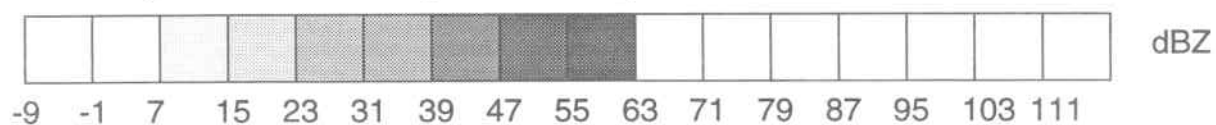
Figuur 44 (pagina 65). *Idem, voor 12:45h UTC.*

SAFIR CG + IC Reflectivity 990602 09:00 UTC

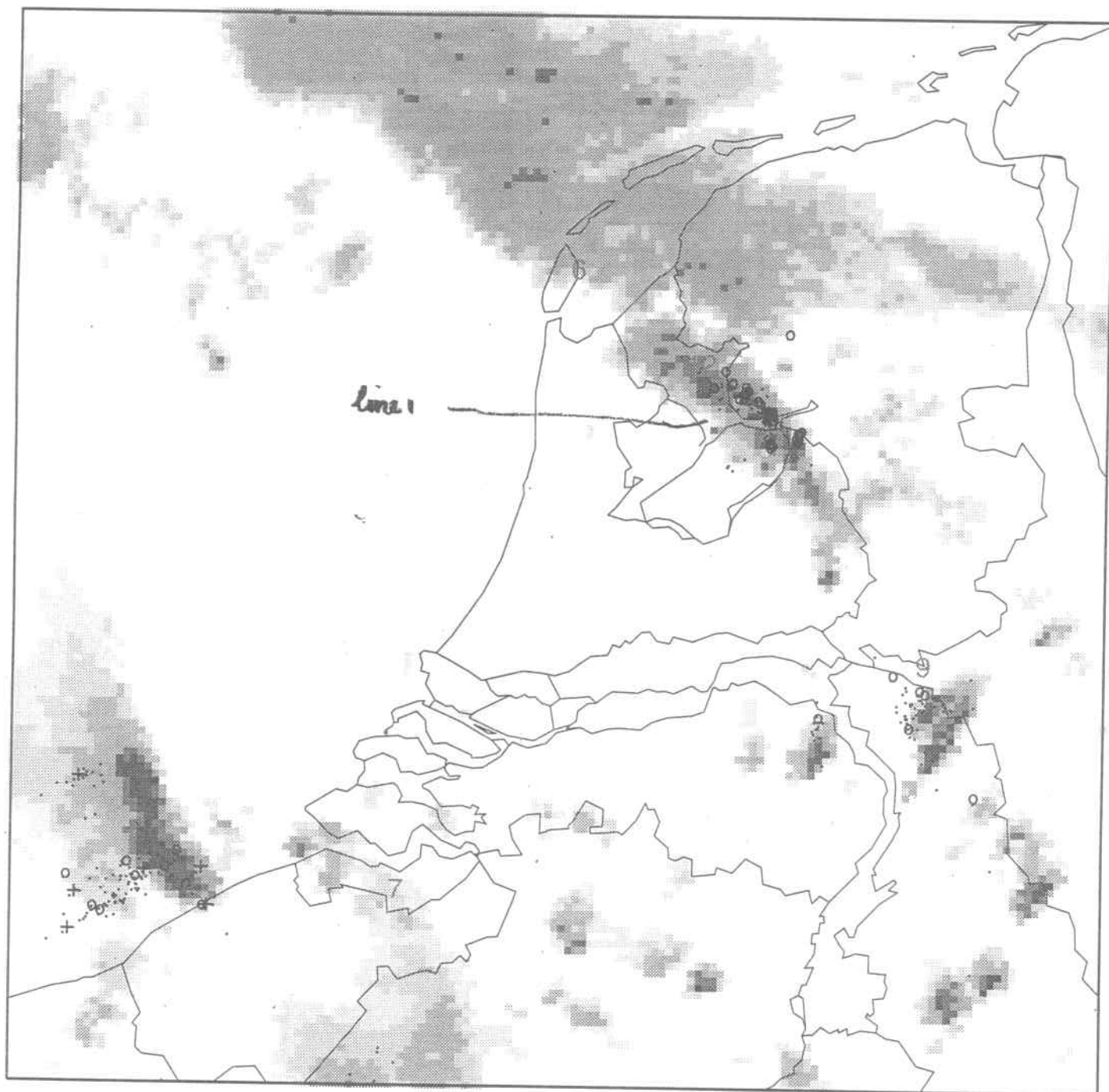


Plotted: 150 intracloud(.) 41 negative cloud-to-ground(o) 14 positive cloud-to-ground(+)
in a time span of 15 min centered on radar time

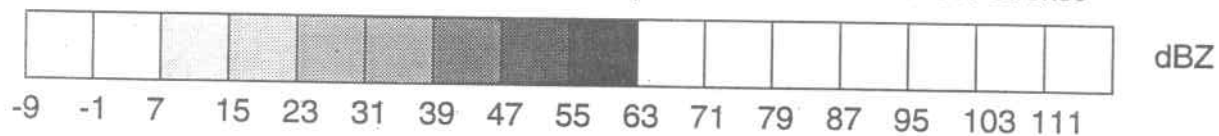
Percentage: 26.8 % cloud-to-ground 6.8 % positive from a total of 205 strokes



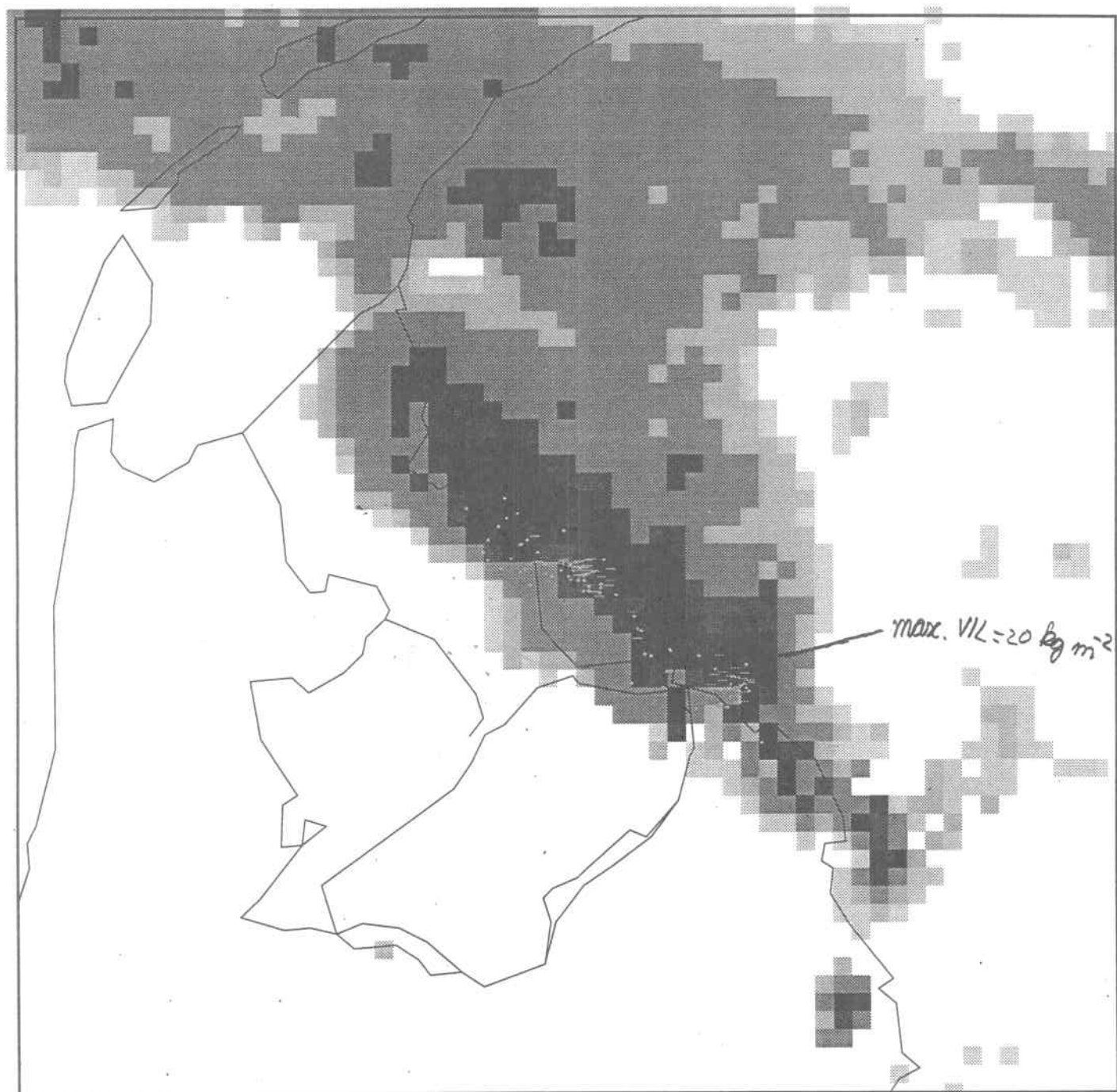
SAFIR CG + IC Reflectivity 990602 12:45 UTC



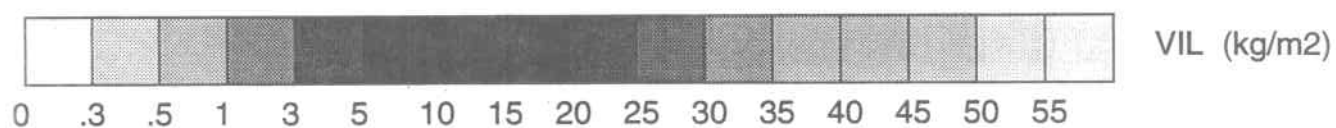
Plotted: 247 intracloud(.) 64 negative cloud-to-ground(o) 6 positive cloud-to-ground(+)
 in a time span of 3 min centered on radar time
 Percentage: 22.1 % cloud-to-ground 1.9 % positive from a total of 317 strokes



SAFIR CG + IC Vert. Integr. Liquid 990602 12:49 UTC



Plotted: 82 intracloud(.) 63 negative cloud-to-ground(-) 3 positive cloud-to-ground(+)
in a time span of 3 min centered on radar time
Percentage: 44.6 % cloud-to-ground 2.0 % positive from a total of 148 strokes



Figuur 45 (linker pagina). *Vertically Integrated Liquid-beeld van de lijn om 12:49h UTC.*

Over het geheel genomen is het percentage verticale ontladingen gedaald van circa 45% tot 25% van het totaal rond 14 UTC. De CAPE zal in de loop van de tijd met de dagelijkse opwarming toegenomen zijn.

De bliksempiek komt iets eerder dan de neerslagproductiepiek. De zone >40 dBZ neemt na 13:30h nog toe doordat in de stratiforme zone steeds hogere waarden voorkomen.

12:30-16:00h (warme sector)

Zie voor dit tijdvak ook figuren 37 t/m 39 op pagina 57-59 met synops, radar en bliksem van 15,16 en 17 UTC, en de grafieken op pagina 71-78.

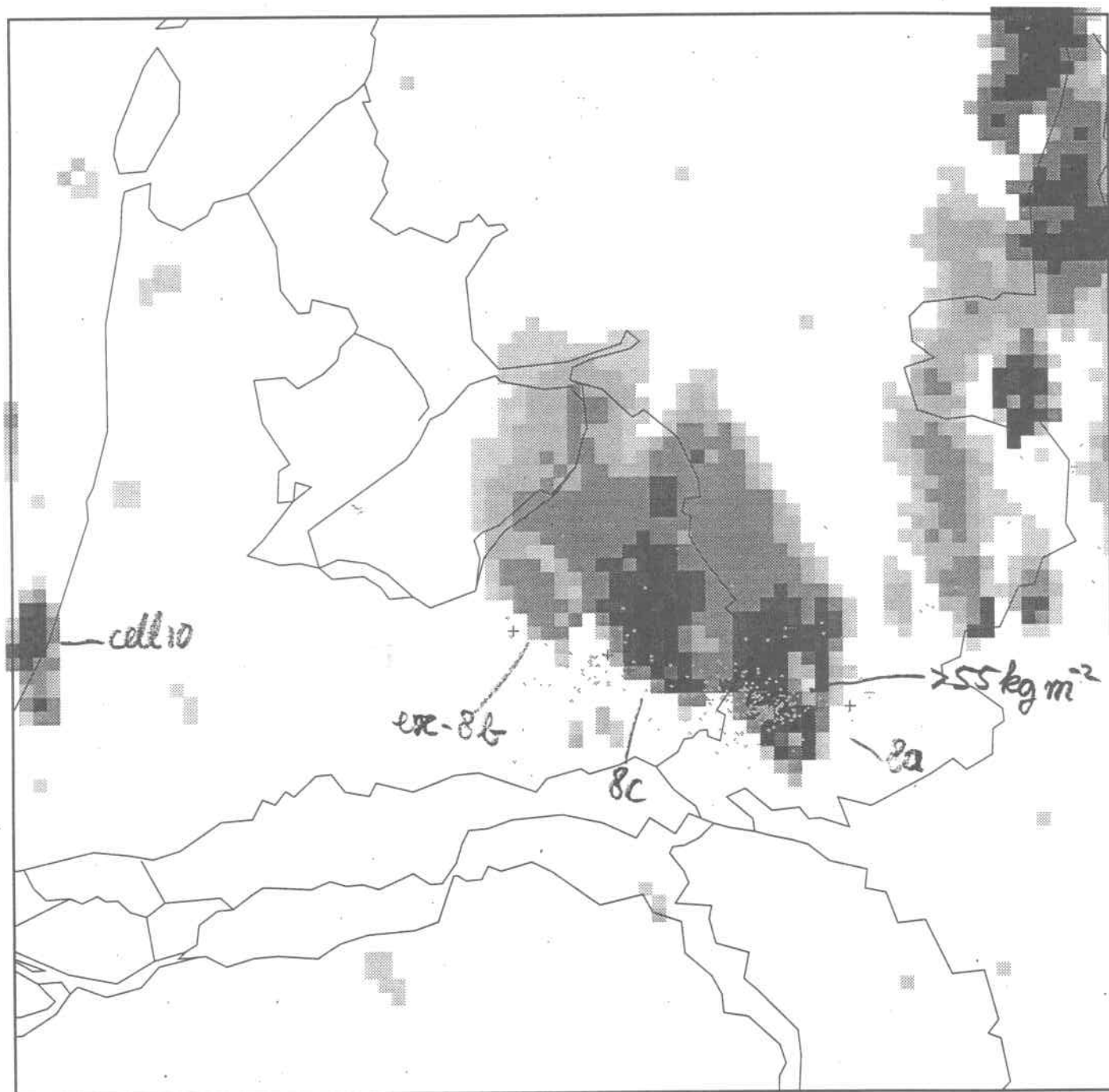
Omstreeks 12:30h begint er in Duitsland, België en het zuidoosten van Nederland convectorie in de warme sector te ontstaan. De nog kleine cluster die actief wordt boven Noord-Brabant vanaf 13:15h is hier onderzocht. Tussen de meest oostelijke cel en de westelijke cel van de cluster ontstaat om 13:30h een nieuwe cel, cel 8b. Bij deze cellen is het aandeel van verticale ontladingen lager dan bij de ochtendcellen: meestal onder de 15%. De oostelijke cel bereikt maximaal 3 ontladingen per minuut en leeft ongeveer een uur. De echotoppen komen tot 10 kilometer. Om 14:00h sterft de westelijke cel uit. Cel 8b bereikt dan zijn maximale grootte maar nog niet de maximale bliksemactiviteit. De VIL is op dat moment 25 kg m^{-2} , echotoppen 9 kilometer en er wordt schade veroorzaakt door hagel in de gemeente West Maas en Waal, waar de cel dan boven ligt. Op dat moment komen er al ruim 10 ontladingen per minuut voor met op dat tijdstip 19% wolk-aarde en 8% positief.

Cel 8b ligt om 14:30h aan de westkant van de cluster en heeft een maximale activiteit bereikt van 25 per minuut. De oostelijke cel heeft plaats gemaakt voor een nieuwe cel, 8a. Deze is ontstaan nadat deze oostelijke cel een soort stationair restant van een oude cel heeft ingehaald, waarna een opleving plaatsvond. Tussen cel 8b en 8a is cel 8c ontstaan. Het geheel ligt om 14:30h net ten noorden van de rivieren bij de Veluwe. De cellen liggen vrij dicht bij elkaar en rondom de antenne van Deelen waar een soort "straaleffecten" optreden, zodat er vooral tot 15:00 wel enige onzekerheid bestaat over het toewijzen van ontladingen aan de juiste cel en de precieze locatie.

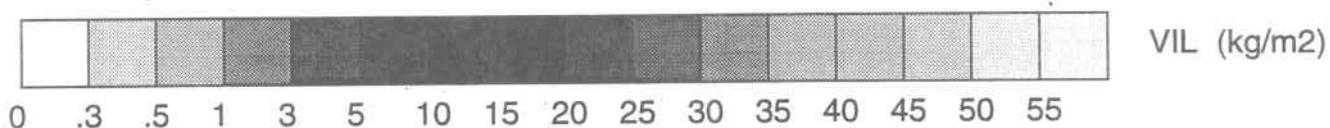
Cel 8b aan de westkant lost op, terwijl cel 8a en c opbloeien tot een omvang van 50-60 pixels >40 dBZ. Dit gaat ongeveer gelijk op met de bliksemactiviteit. Die neemt bij cel 8a na 14:30h zeer sterk toe tot 65 ontladingen per minuut. De piek gaat precies samen met het tijdstip van de 4 cm grote hagel en de zeer zware windstoten in de omgeving van Barchem. Tijdens de piek om 15:00h is het aandeel wolk-aarde slechts 6%, waarvan de helft positief is. De VIL is op dat moment hoger dan 55 kg m^{-2} (zie figuur 46) en de echotoppen komen tot 14 kilometer hoogte.

Figuur 46 (op volgende pagina). *Vertically Integrated Liquid-beeld van het complex (cel 8c links en cel 8a rechts) om 14:49h UTC. De activiteit concentreert zich aan de achterzijde van de VIL-kernen.*

SAFIR CG + IC Vert. Integr. Liquid 990602 14:49 UTC



Plotted: 286 intracloud(.) 12 negative cloud-to-ground(-) 9 positive cloud-to-ground(+)
 in a time span of 3 min centered on radar time
 Percentage: 6.8 % cloud-to-ground 2.9 % positive from a total of 307 strokes



Om 15:15h is de activiteit weer drastisch afgenomen naar 30 per minuut, terwijl nu cel 8c een piek bereikt van 56 ontladingen per minuut. Daarbij zijn vergelijkbare bliksemverhoudingen te vinden. De cel ligt boven Deventer waar hagel en windstoten schade veroorzaken (lees onder kopje Waarnemingen).

Tussen 14:15h en 15:00h is de cluster als geheel enigszins van vorm veranderd. Cel 8a (de oostelijke) is iets achtergebleven bij cel 8c qua treksnelheid. De cluster krijgt een meer ZO-NW oriëntatie, met aan de noordwestkant een stratiforme neerslagzone. Daarin komen dicht bij cel 8c enkele wolkontladingen voor. Mogelijk is cel 8a een supercell gedurende een deel van zijn leven. Dit is echter niet goed vast te stellen zonder Doppler windinformatie en dwarsdoorsneden. Wel moet de opwaartse snelheid aanzienlijk geweest zijn om hagelstenen van meer dan 4 cm doorsnede vast te houden. De windschade werd waarschijnlijk door microburst veroorzaakt, wat in principe bij elk type bui kan optreden.

Om 15:15h ontstaat er een nieuwe cel aan de zuidoostkant van de cluster. Cel 8a zwakt af en iets later gebeurt hetzelfde met 8c. Aan de noordwestzijde wordt de stratiforme pluim steeds groter. Tegen 16:00h is cel 8a opgehouden met bestaan en cel 8c produceert meer verticale ontladingen (11%). Een half uur later is de cel ingezakt.

12:00-18:00h (koufront)

Op het koufront ontstaat in het westen en noorden de meeste convectie. Al aan het begin van de periode ligt er een zwaar uitziend complex op de Noordzee vlak voor de kust van België. Ook deze heeft een veeg van stratiforme neerslag aan de noordwestzijde van de convectieve zone. Dit complex is niet behandeld vanwege het bliksempatroon wat er straalachtig uit ziet en omdat het leven van de cluster al veel eerder begonnen is. Om 13:15h is de totale activiteit daarop wel 40 ontladingen per minuut en afnemend. Er is rond de 10% verticaal en 2-3% positief. Ten oosten van het complex ontstaat om 12:30h een bui (cel 9). Deze bereikt om 14:00h een piek (8 per minuut) en is om 14:30h door het complex ingehaald. Hij heeft echotoppen die vrij laag zijn, 9 kilometer, maar de VIL is met 35 kg m^{-2} hoog. De cel blijft constant in grootte. Opvallend is dat de cel een meer noordelijke richting heeft dan de andere cellen. Hij beweegt mee met de stroming vlak voor het koufront, die zuidoostelijk is.

Om 15 UTC wordt een nieuwe losse cel (nr. 10) aan de oostkant van de oude cluster actief met om 15:30h tien ontladingen per minuut met 30% wolk-aarde ontladingen, 2% positieve ontladingen van het totaal. De piekactiviteit van cel 10 bedraagt 10 per minuut.

Om 15:15h ontstaat de losse cel 11 op het koufront met echotoppen die groeien naar 11 kilometer. Hierin komen relatief veel wolkontladingen voor (vooral vóór de piek om 16:00h, met minder dan 10% verticaal). Om 15:45h, vlak voordat de cellen een aaneengesloten lijn vormen, komen bij cel 11 bij 15 ontladingen per minuut meer positieve dan negatieve ontladingen voor.

Naast cel 10 vormt zich aansluitend een actieve cel aan de rechterkant (niet meegeteld) met een aparte VIL-kern.

Om 16 UTC hebben de cellen zich in een smalle lijnvorm aaneengesloten boven Hoorn NH. In de plaats Wognum wordt schade aangericht door windstoten of een kleine windhoos. Cel 11 ligt daar dan bijna boven terwijl die zijn piekactiviteit bereikt heeft.

Cel 11 dooft uit in de lijn terwijl zuidoost ervan nieuwe cellen opbloeien. Het bliksempatroon blijft verdeeld tussen een noordwestelijk deel en een zuidwestelijk deel. Van de lijn is geen grafiek gemaakt.

Om 16:45h dooft het noordwestelijk deel iets uit, terwijl het zuidelijk deel erg productief is (in de orde van 30 per minuut) boven de Noordoostpolder. De lijn is breder geworden en vertoont een lichte kromming, wat mogelijk wijst op zware windstoten.

De zuidelijke cel vertoont van 17:15h tot 17:45h aan de zuidkant een haakvorm van vrij hoge reflectiviteit, zonder bliksemactiviteit. Omstreeks 18 UTC kwam deze bui bij Eelde aan, waar gewag werd gemaakt van "enorme wallclouds" aan de achterkant van de bui. Om 17:45h groeit de lijn aan de voorzijde van de haak, terwijl de haak oplost. Een haakvormige echo komt regelmatig voor bij supercells. De visuele waarneming past in het beeld, maar de omstandigheden (vooral de hoeveelheid windschering en heliceiteit) geven in principe weinig aanleiding voor die aanname. Het zou ook een restant van oudere cellen kunnen zijn.

Het aandeel wolk-aarde ontladingen is vanaf 17:15h afgenomen van 12% naar rond de 8%, met wel 4 tot 6% positief. Om 16:45 is de VIL daar 25 kg m^{-2} .

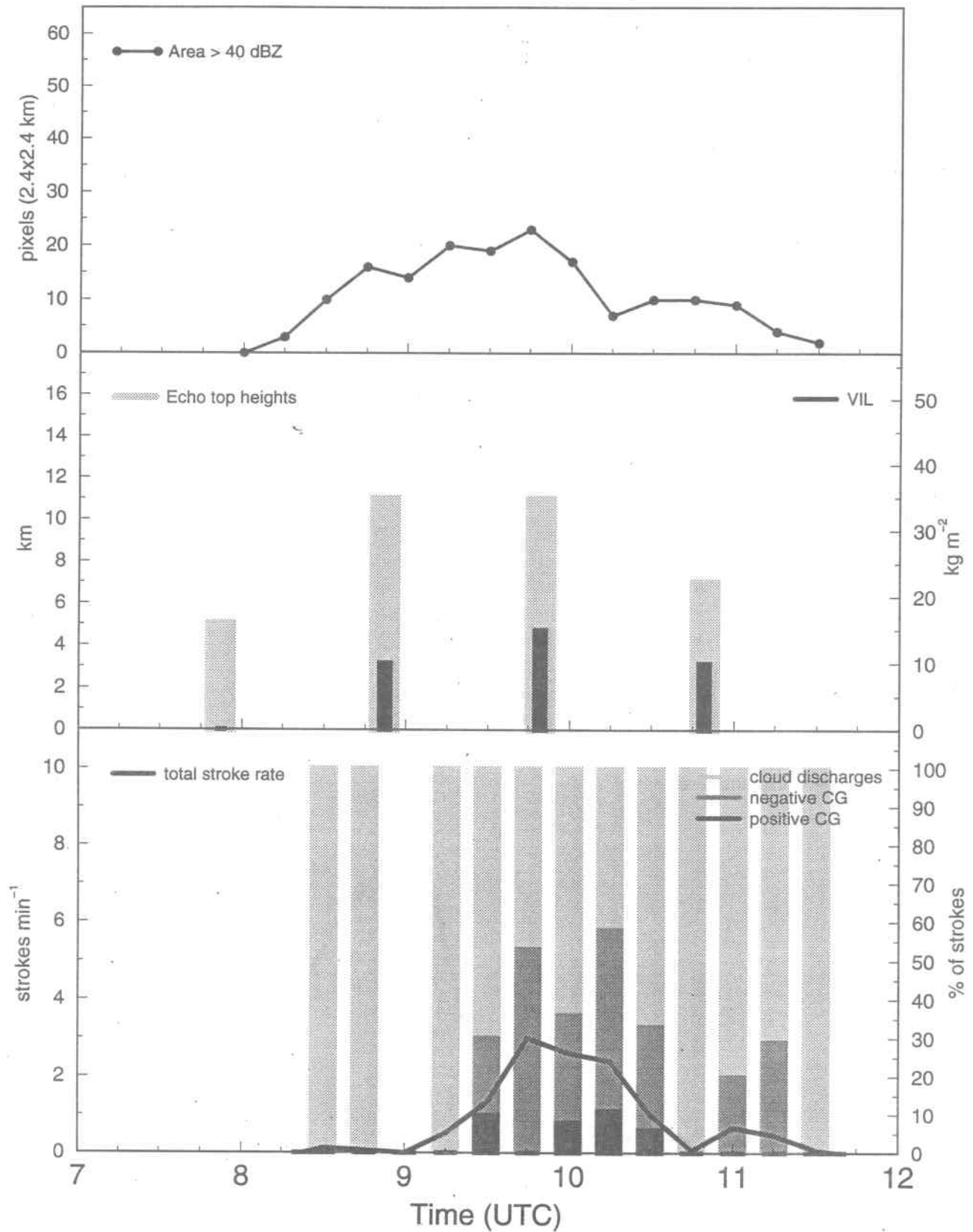
Om 18:00h is de zuidelijke cel sterk in activiteit afgenomen, het noordelijk deel heeft nog enige activiteit. De lijn trekt over Groningen waar de activiteit verder afneemt, maar dit komt in ieder geval deels door de verminderde detectie aldaar.

Een trogje achter het koufront zorgde voor nog enkele lichte buien in de avond.

Figuren 47 t/m 54 (pagina's 71 t/m 78). Grafieken van het verloop van de radar- en bliksemkenmerken bij de onderzochte onweersbuien.

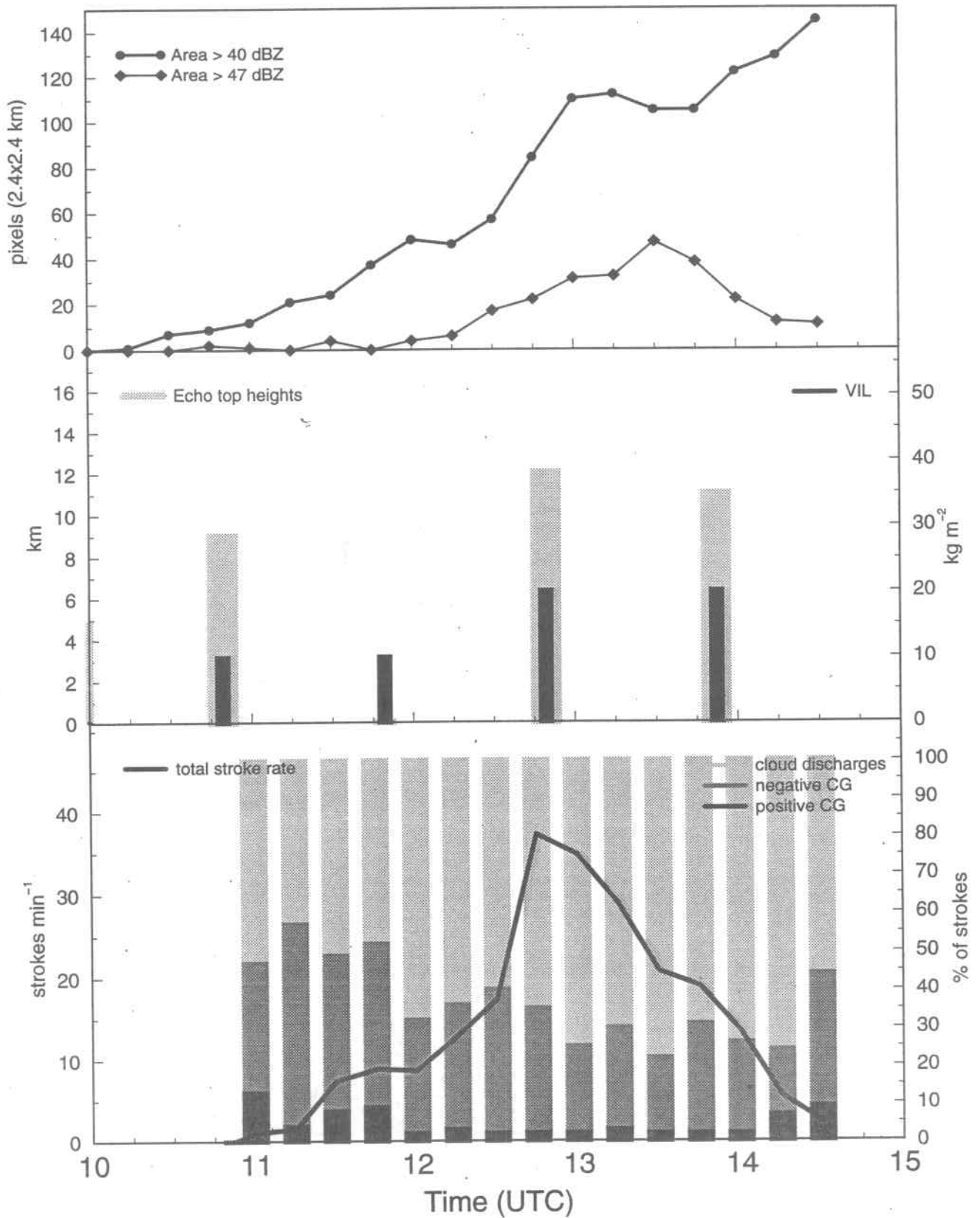
Cell 2 – June 2 1999

radar and lightning characteristics



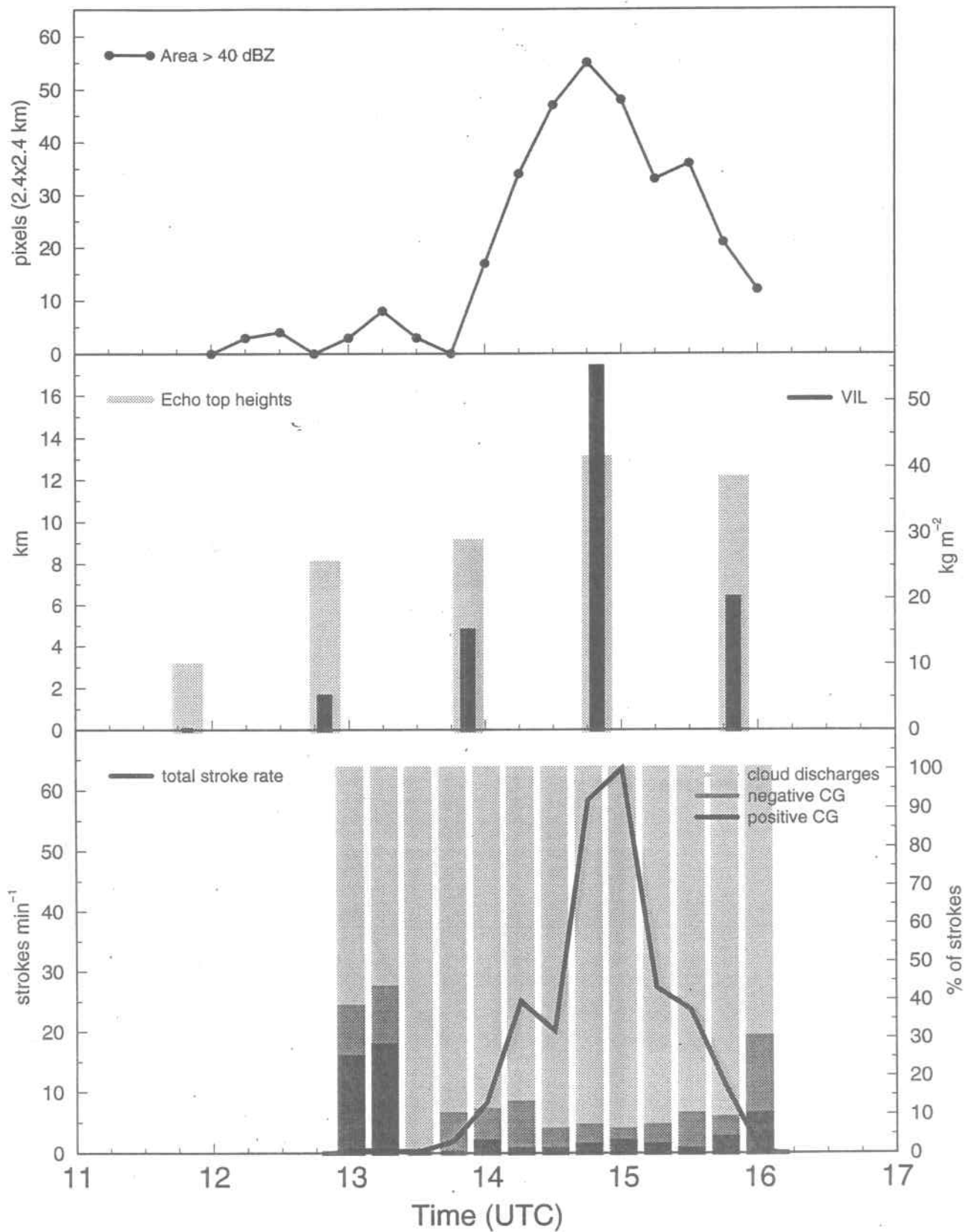
Line 1 – June 2 1999

radar and lightning characteristics



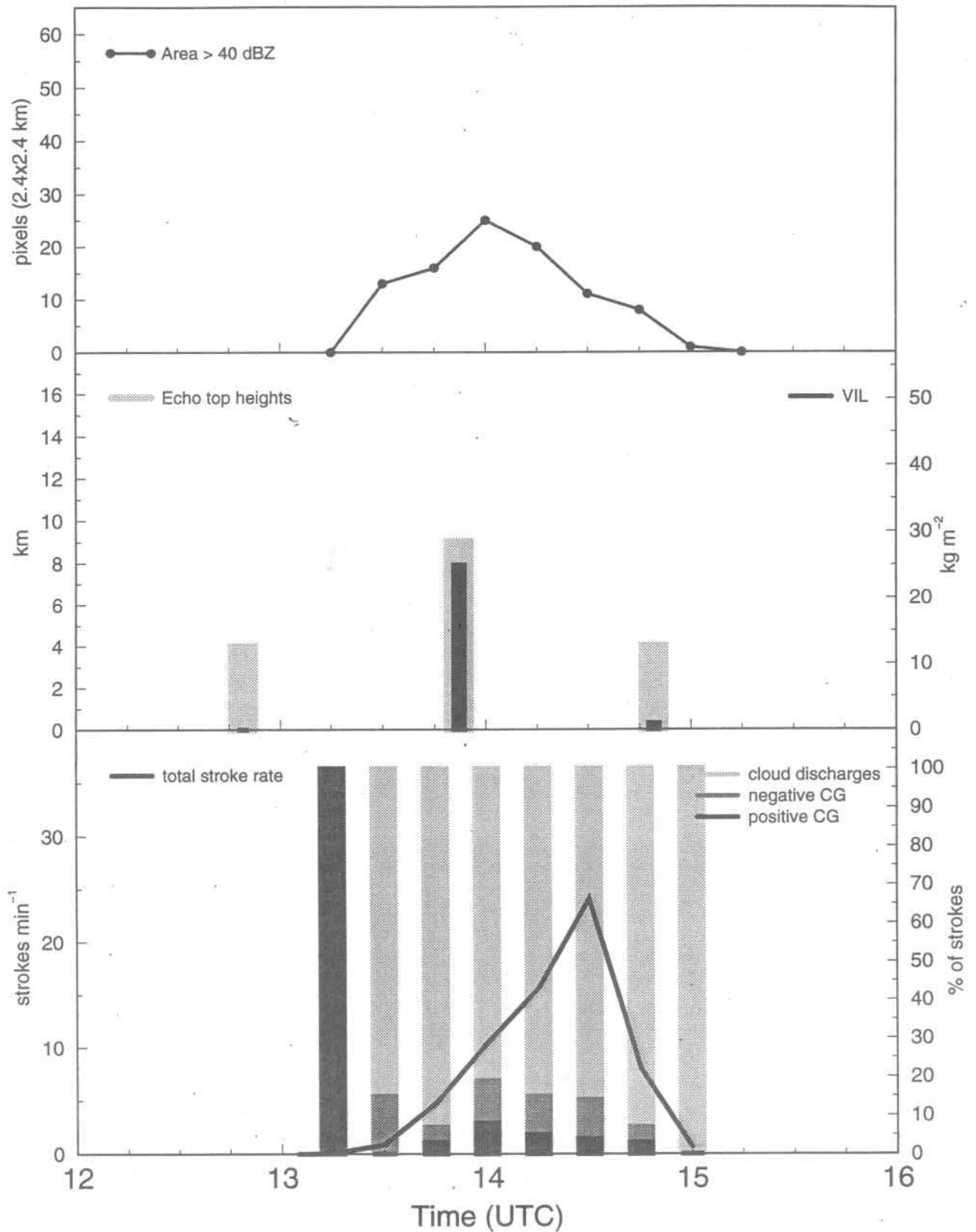
Cell 8a – June 2 1999

radar and lightning characteristics



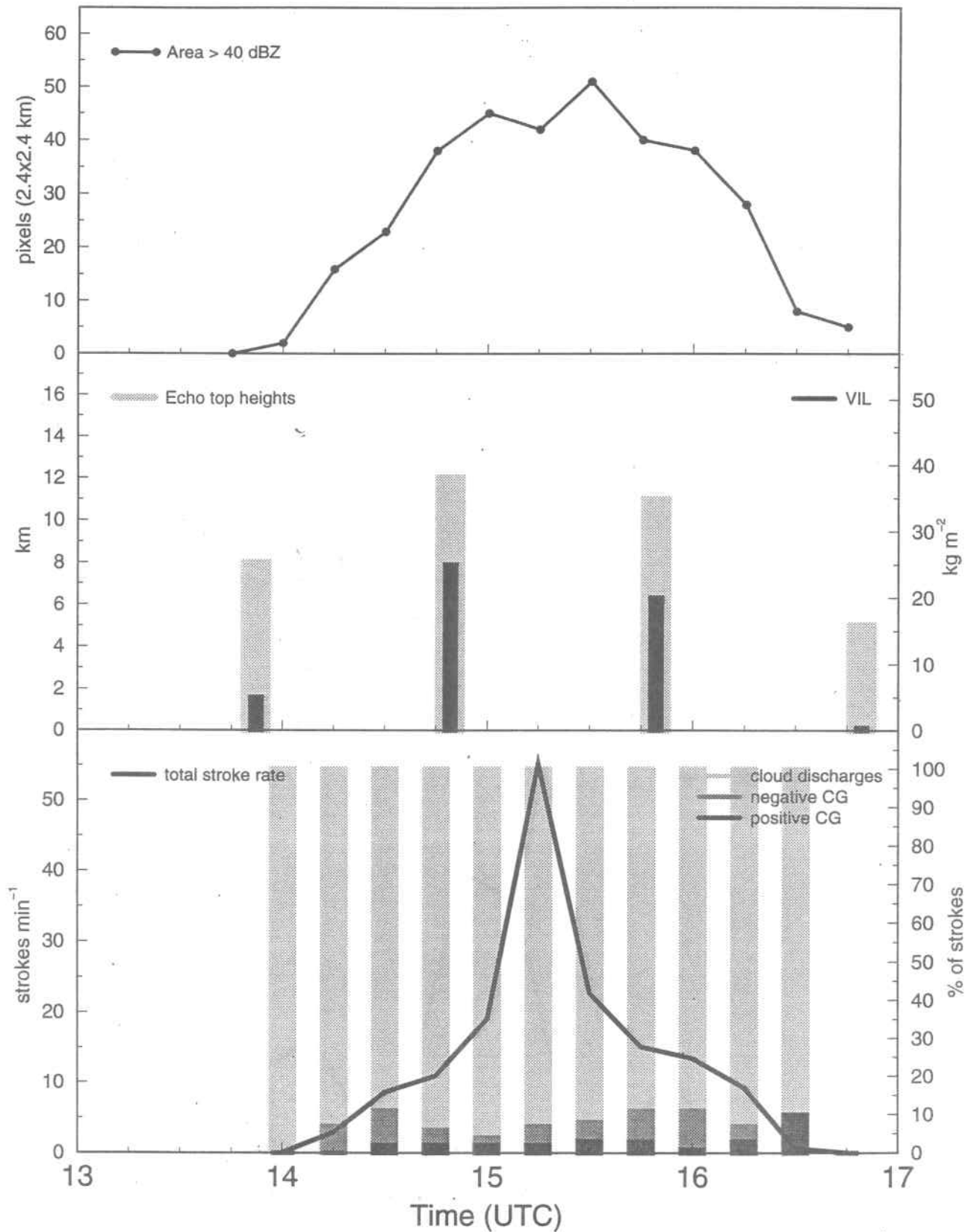
Cell 8b – June 2 1999

radar and lightning characteristics



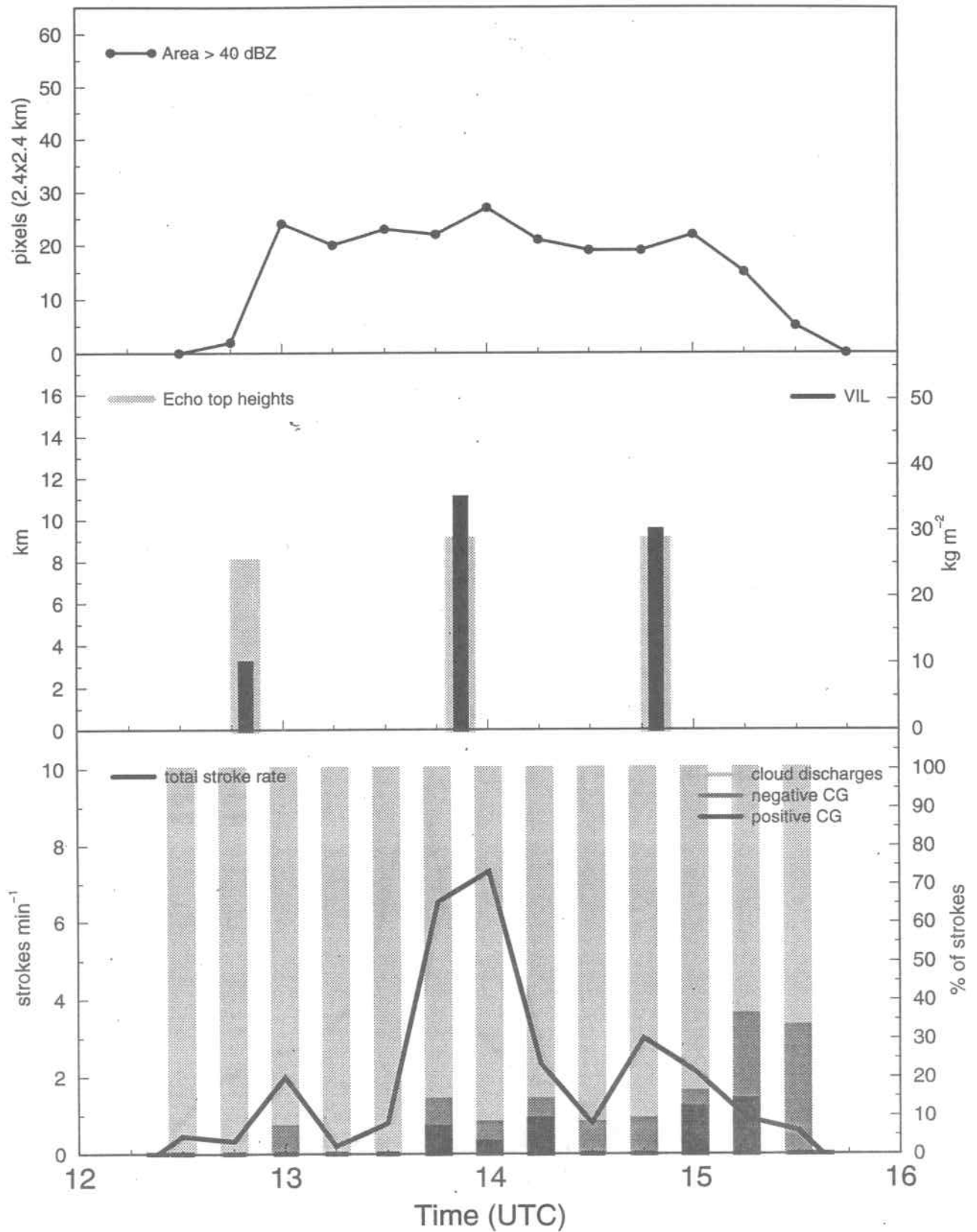
Cell 8c – June 2 1999

radar and lightning characteristics



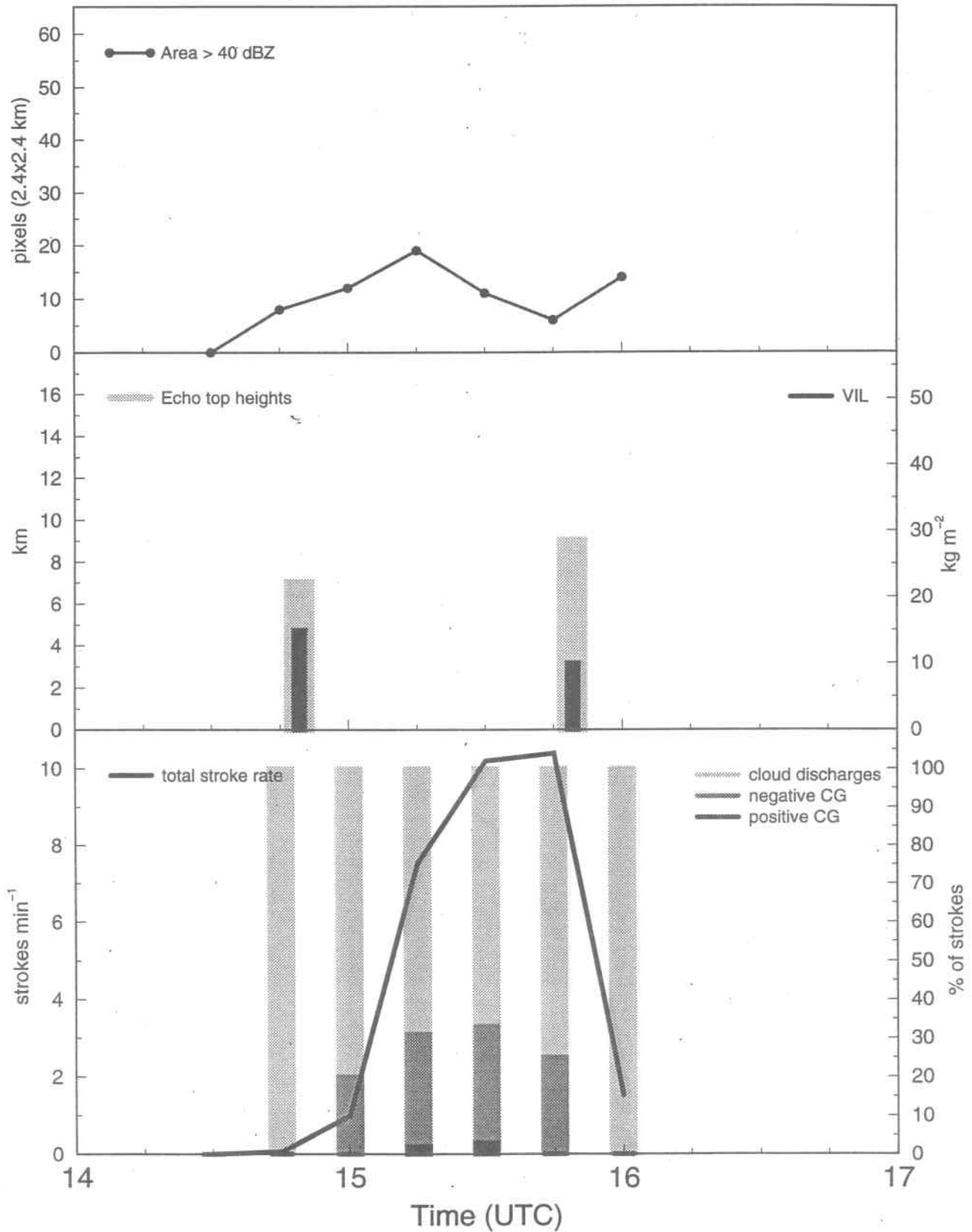
Cell 9 – June 2 1999

radar and lightning characteristics



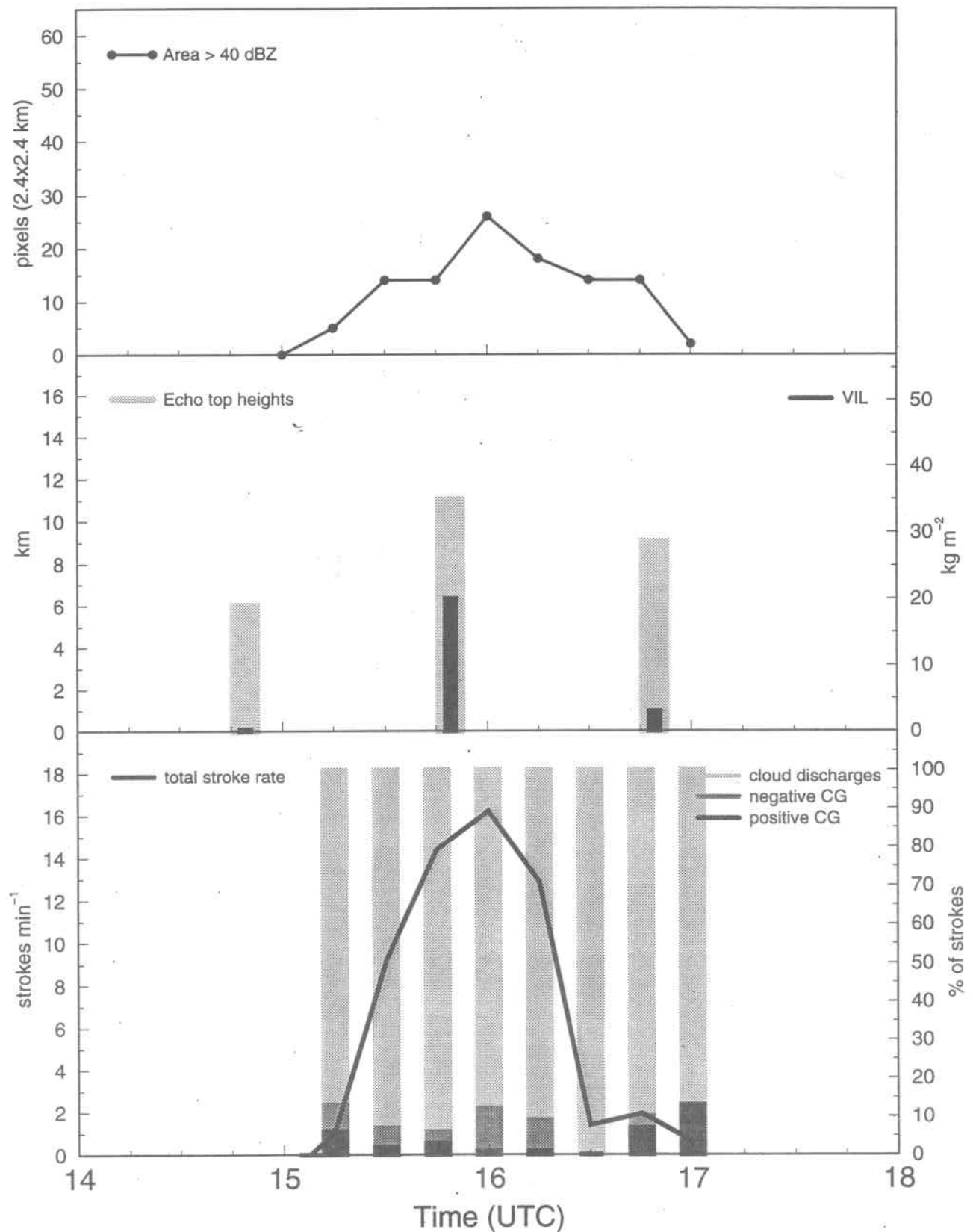
Cell 10 – June 2 1999

radar and lightning characteristics



Cell 11 – June 2 1999

radar and lightning characteristics



3.3.5 Samenvatting van de opvallendste verschijnselen van deze case:

Ochtend, warmtefront:

- ❖ De frontale ochtendbuien (zoals cel 2 en de lijn) hebben een hoog percentage wolk-aarde ontladingen, dat bovendien over het algemeen toeneemt aan het einde van het leven van de cel.
- ❖ De relatieve bliksemactiviteit van de ochtendbuien is laag (bijv. 1/10 ontlading per pixel $> 40 \text{ dBZ min}^{-1}$, bij de lijn hoger, 1/2 ontlading per pixel $> 40 \text{ dBZ min}^{-1}$).
- ❖ Bij de lijn komen de negatieve ontladingen het meeste voor aan de voorzijde. (op het hoogtepunt van de bliksemproductie)
- ❖ Dit is juist precies aan de achterzijde van de zone met hoge VIL.
- ❖ De wolkontladingen bevinden zich het meest verspreid door de convectieve zone.
- ❖ Een verhoogde concentratie positieve ontladingen komt voor bij het deel van de lijn dat een stratiform gebied om zich ontwikkelt en uitsterft.

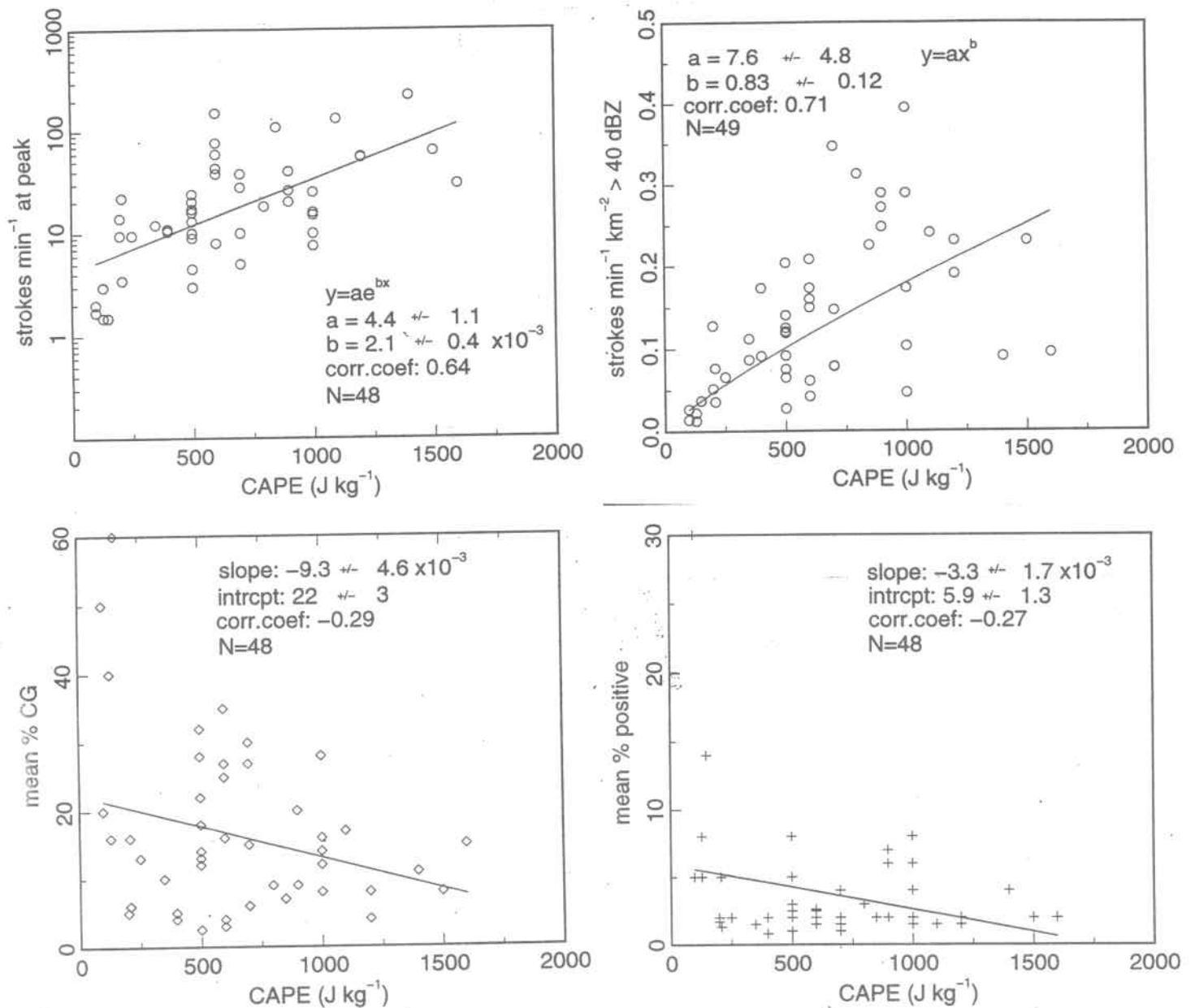
Middag, warme sector:

- ❖ Hoge totale activiteit (cel 8a en 8c circa 60 per minuut)
- ❖ Ten opzichte van de totale activiteit zijn er relatief weinig verticale ontladingen, terwijl een normaal percentage positieve ontladingen voorkomt ($< 10\%$ wolk-aarde en 2% positief). Van de verticale ontladingen zijn er dus relatief veel positief. Positieve ontladingen komen op sommige momenten meer voor dan negatieve ontladingen, bij hoge activiteit.
- ❖ Erg hoge VIL ($> 55 \text{ kg m}^{-2}$ bij cel 8a) en echotoppen (13-14 km), grote cellen.
- ❖ De piekactiviteit valt samen met grote hagel en (zeer) zware windstoten aan de grond. Er is bij cel 8a (Barchem) ook een tijdelijk verhoogd percentage positieve ontladingen. Bij cel 8b gaat dit iets anders, daar treedt hagelschade op tijdens stijgende activiteit met relatief veel positieve ontladingen.
- ❖ De bliksemproductie per pixel $> 40 \text{ dBZ}$ is hoog: meer dan 1 ontlading per pixel per minuut.
- ❖ Tijdens de piek van cel 8c ligt de activiteit aan de zuidwestkant van de VIL.

Middag, koufront:

- ❖ Er komen aanzienlijke verschillen voor in het gehalte wolk-aarde, zo produceert cel 10 wel 30% en cel 9 zo'n $10\text{-}15\%$ verticaal, terwijl de echotoppen, ontstaansplaats en -wijze hetzelfde lijken. Cel 10 heeft helaas geen VIL-meting tijdens de piek wat eventueel een verklaring zou kunnen bieden.
- ❖ Cel 11 heeft een hogere piekactiviteit (16 min^{-1}) dan cel 9 en 10 (8 en 10 min^{-1}), maar is ook groter. De echotoppen zijn ook hoger maar de VIL is kleiner dan cel 9 (of hooguit even groot).
- ❖ De windschade in Wognum treedt op als cel 11 langs trekt, die ongeveer rond piekactiviteit is en iets ervoor nog meer positieve dan negatieve ontladingen en relatief veel wolkontladingen produceerde. Dit is ook het moment dat de cellen zich aaneensloten in de lijn.
- ❖ De actieve zuidelijke cel van de lijn met de haakvorm vertoont geen activiteit in de haak, behalve even om 17 UTC. De cel heeft een relatief hoog percentage van positieve ontladingen, 4 tot 6 procent. De cel produceert dan meer positieve ontladingen dan negatieve ontladingen.

- ❖ De bliksemproductie per pixel >40 dBZ is hoger dan die van 's ochtends maar lager dan die van de cluster in Oost-Nederland.



Figuur 55. Totale piek-bliksemactiviteit, relatieve bliksemactiviteit en gemiddelde percentages verticale ontladingen en positieve ontladingen van het totaal aantal ontladingen tegen de convectief beschikbare potentiële energie (CAPE).

4. Algemene relaties

4.1 Relaties tussen omgevingskenmerken en bliksemactiviteit

Voor elke onweersbui zijn de omgevingskenmerken verzameld, waarna ze in grafieken vergeleken kunnen worden met de bliksemactiviteit.

Zie figuren 55-59.

Hieronder wordt met "relatieve bliksemactiviteit" bedoeld: de activiteit gedeeld door de oppervlakte van het deel van een onweersbui dat een reflectiviteit heeft hoger dan 40 dBZ (dat komt ongeveer overeen met de convectieve zone).

4.1.1 Onstabilititeit

De onstabilititeit is hier bekeken in de vorm van de Convectively Available Potential Energy (CAPE) en de Boyden index. Ook de K-index is een maat voor de onstabilititeit, maar deze is meer afhankelijk van de vochtigheid op het 850 en 700 hPa-niveau. Deze wordt onder het kopje Vocht behandeld. De Boyden index is daarentegen niet afhankelijk van de vochtigheid en zegt niets over de onstabilititeit hoger (boven 700 hPa) in de atmosfeer.

Piekactiviteit en de relatieve bliksemactiviteit:

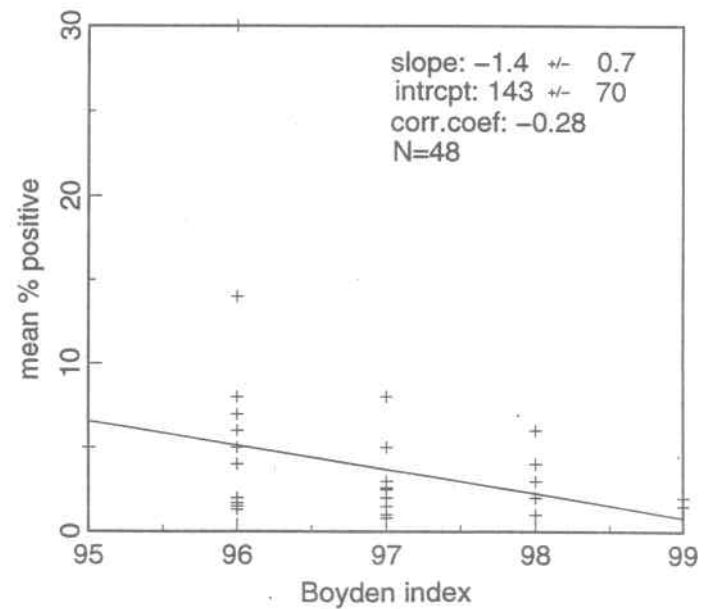
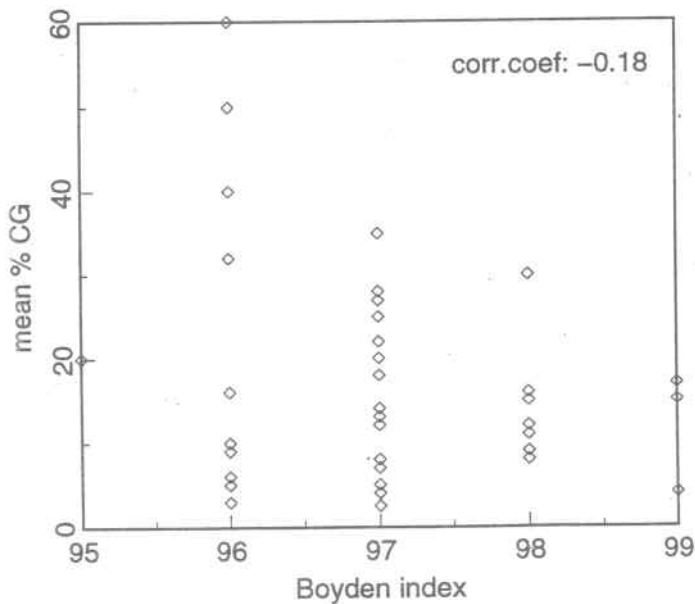
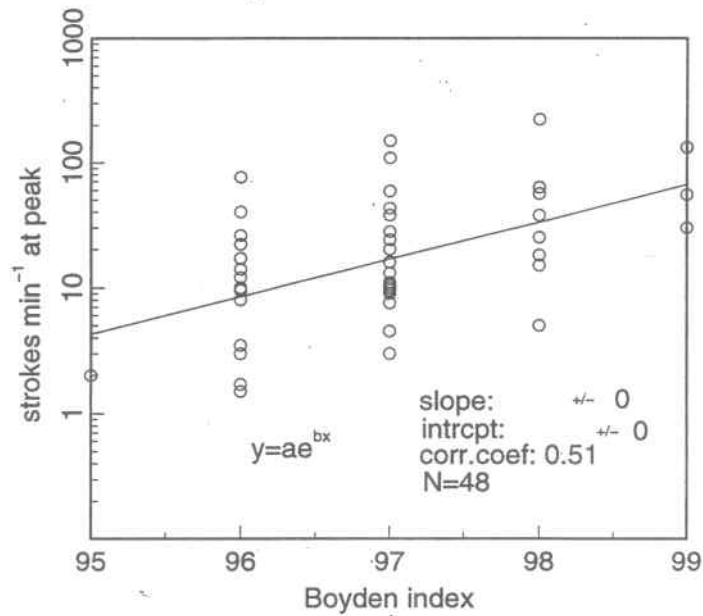
In figuur 55 en 56 is te zien is dat de piekactiviteit redelijk gecorreleerd is met de CAPE en de Boyden index (correlatie coëfficiënt 0.64 respectievelijk 0.51). De buien worden duidelijk actiever als de onstabilititeit toeneemt.

Er is wel een grote spreiding te zien, bijvoorbeeld bij een Boyden index van 97 loopt de bliksemactiviteit uiteen van 0 tot 150 strokes per minuut. Voor een bepaalde mate van onstabilititeit kunnen de locale omstandigheden voor individuele cellen nog verschillen, waardoor de in theorie beschikbare onstabilititeit niet volledig vrij kan komen. Het kan ook zijn dat locale omstandigheden juist versterkend kunnen werken. Daarbij kan men denken aan bijvoorbeeld verhoogde convergentie op fronten of oude uitstroomgrenzen (voordelig); afsnoering van de instroom door koude uitstroom in de buurt; teveel inmenging van droge lucht in de stijgstroom; afremming van de stijgstroom door grote neerslaghoeveelheden; locale inversies of windschering.

De maximaal behaalde bliksemactiviteit is voor een bepaalde waarde van onstabilititeit waarschijnlijk meer van belang.

Bij een hogere onstabilititeit neemt de relatieve bliksemactiviteit toe, de correlatiecoëfficiënt met CAPE is 0.71. Dit is de beste correlatie die hier gevonden is.

Kanttekening: In menige studie is de toewijzing van een hoeveelheid CAPE een discutabel punt, zo ook in deze studie (zeker voor een individuele cel). Enige subjectiviteit is niet uit te sluiten.



Figuur 56. Totale piek-bliksemactiviteit en gemiddelde percentages verticale ontladingen en positieve ontladingen van het totaal aantal ontladingen tegen de Boyden index.

Verhouding tussen wolkontladingen, verticale ontladingen en positieve ontladingen:

Het verband tussen het gemiddelde percentage wolk-aarde ontladingen met de onstabieleit is minder goed. Bij de CAPE is de spreiding iets kleiner dan bij de Boyden index.

Bij een lagere onstabieleit is de spreiding groter. Bij een hogere CAPE of Boyden index neemt de spreiding in het percentage wolk-aarde af, wat wil zeggen dat er een tendens is naar het produceren van meer wolkontladingen bij hogere onstabieleit. Voor het percentage positieve ontladingen ten opzichte van het totale aantal ontladingen geldt hetzelfde als voor het percentage verticale ontladingen van het totaal in het algemeen. Binnen de groep inslagen is er in de verhouding tussen positieve en negatieve inslagen dan ook geen trend te ontdekken bij toenemende onstabieleit.

4.1.2 Temperatuur op 700 hPa

De meeste behandelde onweersbuien hebben temperaturen tussen -2 en +5 graden op 700 hPa. Hierbinnen is de variatie in bliksemactiviteit groot. Dit zorgt voor matige trends. Zie figuur 57.

Piekactiviteit en de relatieve bliksemactiviteit:

De piekactiviteit is in deze studie slecht gecorreleerd met de temperatuur op 700 hPa (corr. 0.19).

Wessels (1998) vond een toename van de totale dagelijkse bliksemactiviteit en de 5 minuten ruimtelijke concentratie daarvan als T700 toeneemt. Ook daarin zit spreiding, maar de conclusie is dat de maximaal haalbare bliksemactiviteit toeneemt met de 700 hPa-temperatuur.

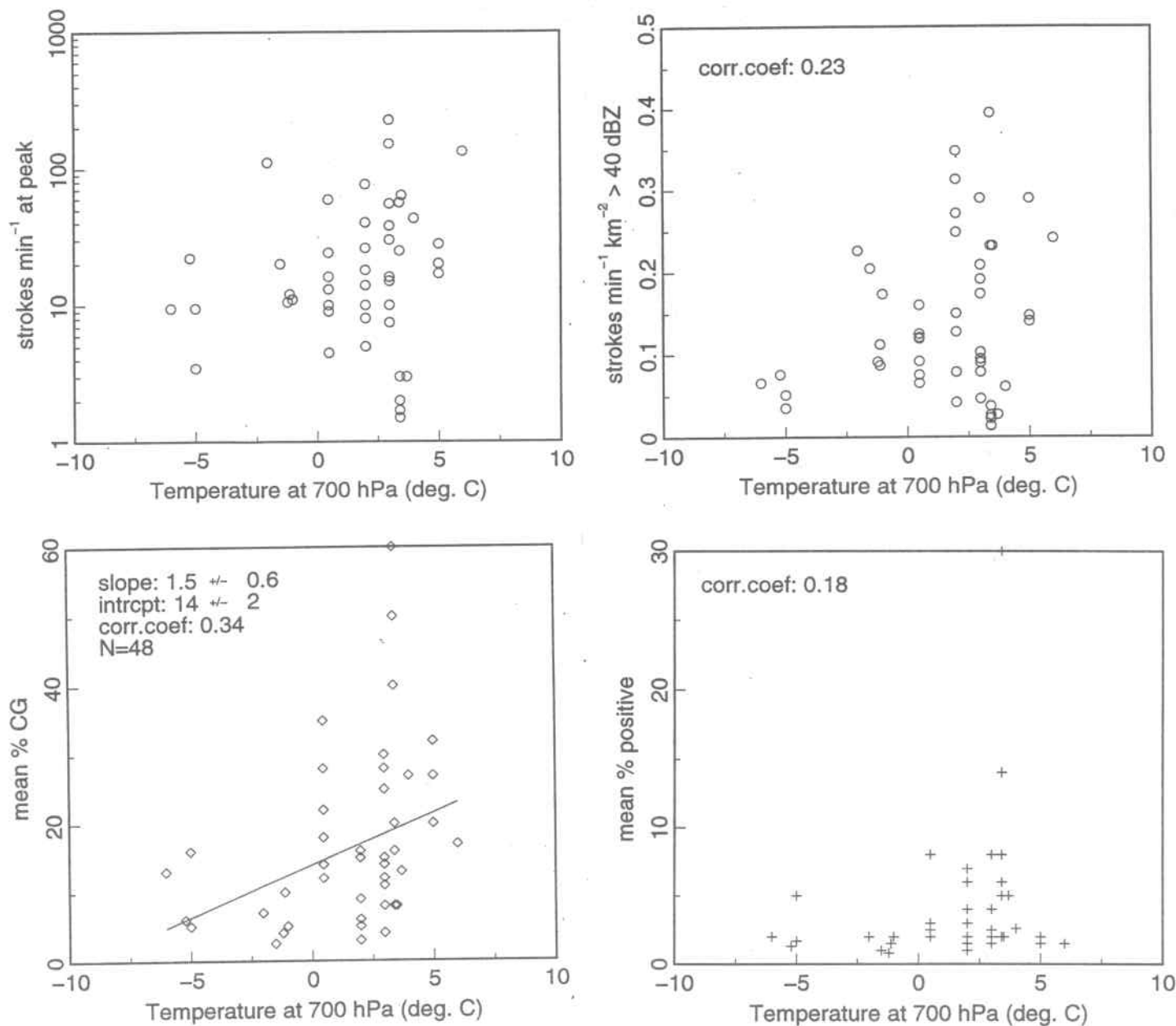
Ook het verband met de relatieve bliksemactiviteit, zoals gevonden in deze studie, is slecht.

Verhouding tussen wolkontladingen, verticale ontladingen en positieve ontladingen

Dit verband met de 700 hPa-temperatuur is het minst zwak (corr. 0.34). Er komen in deze dataset relatief meer verticale ontladingen voor naarmate de temperatuur op 700 hPa hoger is.

In het onderzoek van Wessels (1998) waarin ook winters onweer werd meegenomen werd de algemene trend gevonden dat het (dagelijks) percentage verticale ontladingen afneemt met de temperatuur op 700 hPa, met veel spreiding. Het hoogst haalbare aandeel wolkontladingen op dagbasis komt voor bij temperaturen grofweg tussen -5 en 0 graden Celsius.

De dataset in dit onderzoek bevat alleen zomerse onweersbuien met slechts weinig datapunten onder de 0 graden Celsius. De waarde van de hier gevonden trend is twijfelachtig.



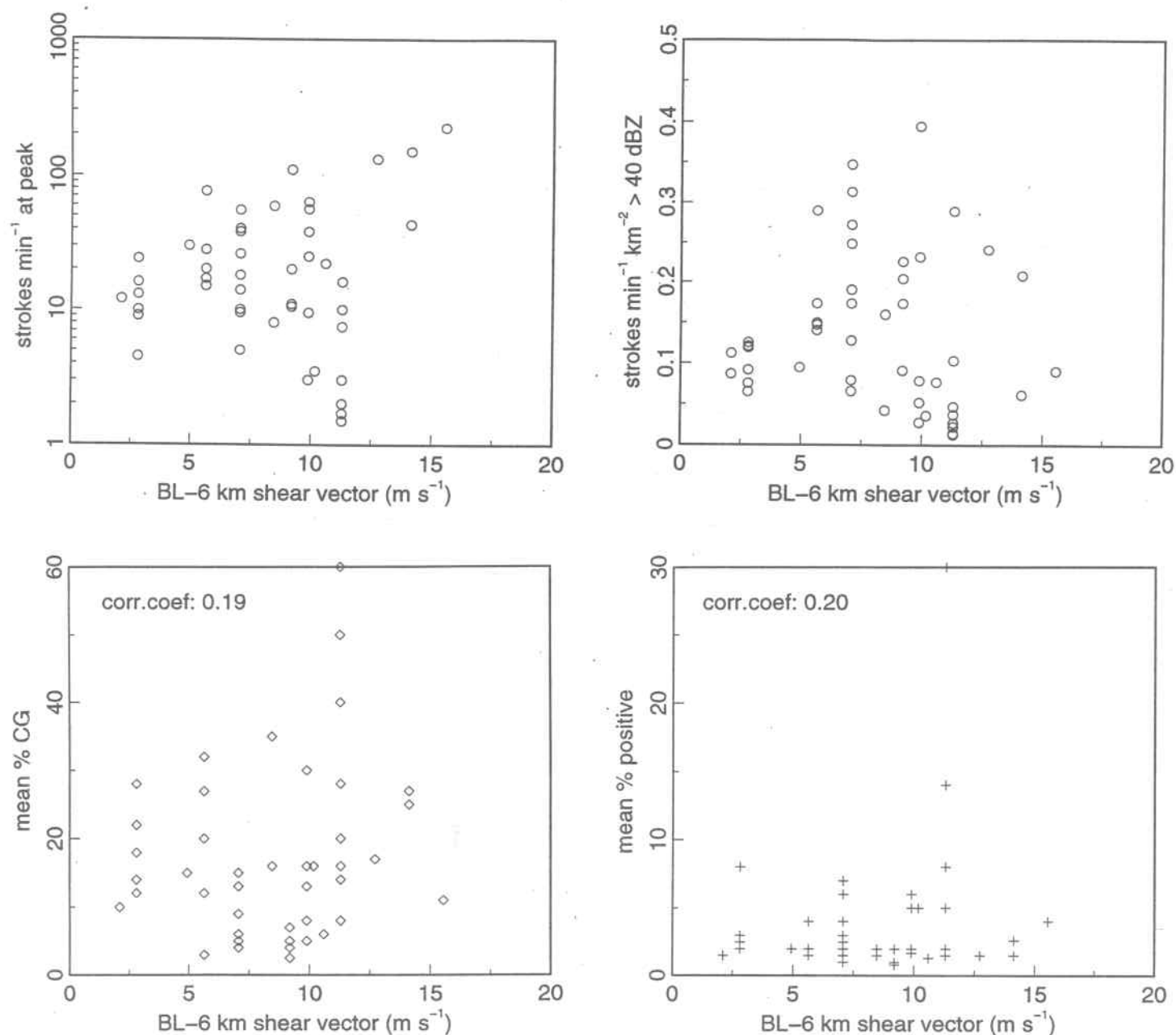
Figuur 57. Totale piek-bliksemactiviteit, relatieve bliksemactiviteit en gemiddelde percentages verticale ontladingen en positieve ontladingen van het totaal aantal ontladingen tegen de temperatuur op het 700 hPa-niveau.

4.1.3 Windschering

Piekactiviteit en de relatieve bliksemactiviteit:

De piekactiviteit is in het algemeen groter naarmate de grenslaag-6 km windscheringsvector groter is (corr. 0.41). Er komen echter enkele punten met een lage piekactiviteit in voor. Voor die punten was de CAPE laag.

De relatieve bliksemactiviteit vertoont geen relatie met windschering.



Figuur 58. Totale piek-bliksemactiviteit, relatieve bliksemactiviteit en gemiddelde percentages verticale ontladingen en positieve ontladingen van het totaal aantal ontladingen tegen de grenslaag-6 km windscheringsvector (BRN shear).

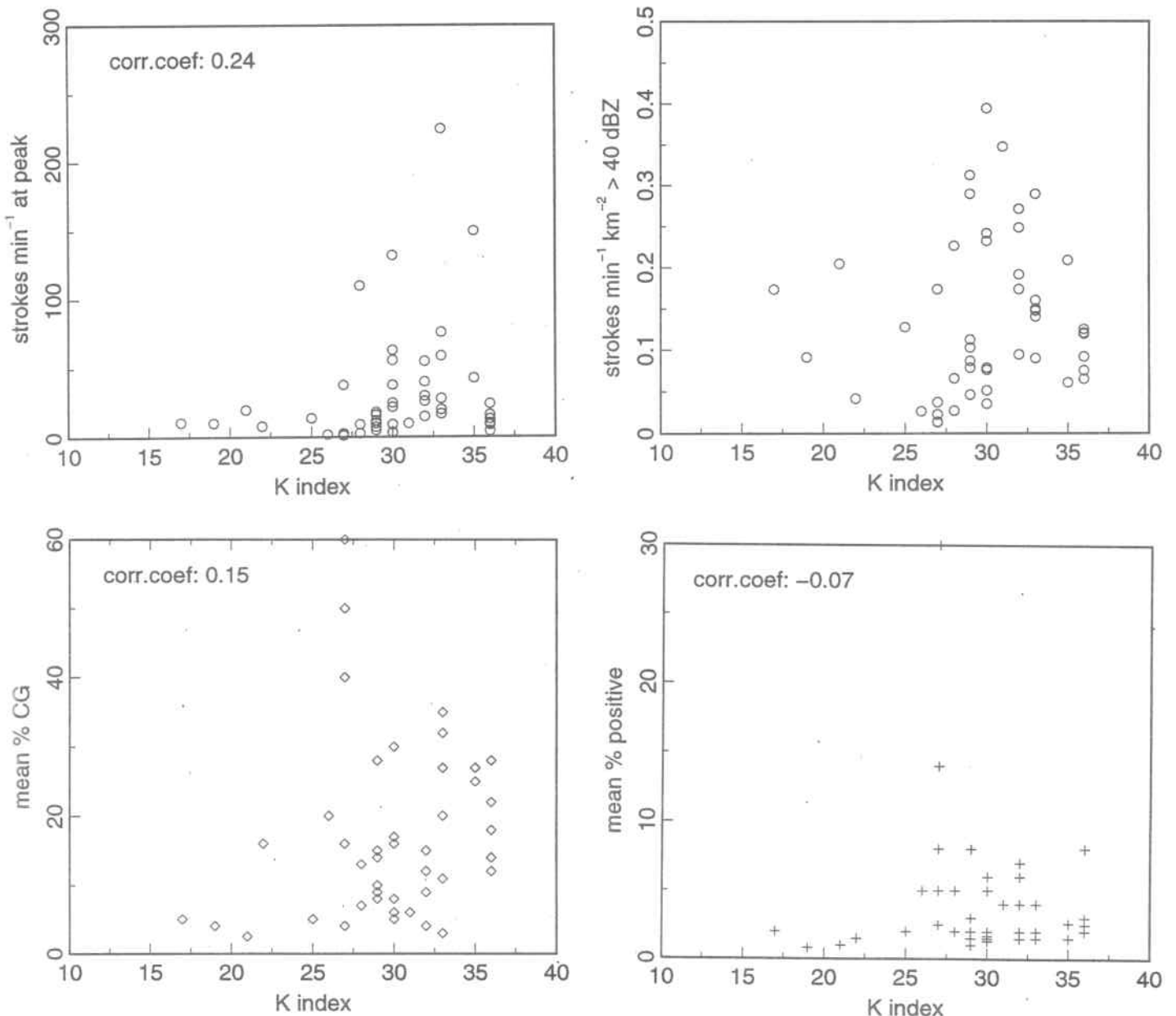
Verhouding tussen wolkontladingen, verticale ontladingen, positieve ontladingen

De verhoudingen tussen de bliksemsoorten blijken niet duidelijk door de windschering beïnvloed te worden (corr. 0.20). Zie figuur 58.

4.1.4 Vocht

Hiervoor is er gekeken naar de K-index, waarin het vocht op 850 en 700 hPa inbegrepen is. Zie de figuur hieronder.

De relaties tussen bliksemactiviteit en de K-index zijn matig of slecht. Er zijn weinig cellen bij een K-index kleiner dan 25 en de spreiding is erg groot. Omdat de K-index erg van luchtvochtigheid afhangt lijkt dit aan te geven dat de mate van verzadiging niet van invloed is op de bliksemactiviteit (in de gevallen waar ook inderdaad onweer optreedt). Maar het trekken van deze conclusie is twijfelachtig omdat de K-index gevoelig is voor kleine veranderingen in temperatuur en dauwpunt op de beide niveaus, waardoor de index niet representatief hoeft te zijn voor de vochtigheids-toestand of de onstabiliteit. Inmenging van droge lucht in een stijg- of daalstroom is van invloed op de grootte van de verticale bewegingen en fysische processen zoals condensatie en verdamping van hydrometeoren en de daarmee verbonden ladingsscheidingsprocessen.



Figuur 59 (linker pagina onderaan). Totale piek-bliksemactiviteit, relatieve bliksemactiviteit en gemiddelde percentages verticale ontladingen en positieve ontladingen van het totaal aantal ontladingen tegen de K-index.

4.1.5 Soort onweersbui

De verschillende typen zijn in de parameterruimte van CAPE en windschering uitgezet (figuur 60), omdat deze factoren van groot belang zijn bij de organisatie van onweersbuien.

Het blijkt dat de verschillende typen buien zich niet duidelijk in een bepaald gebied van de CAPE en windscheringgrafiek ophouden. Het bereik van CAPE loopt voor de onderzochte onweersbuien van $100\text{--}1600\text{ J kg}^{-1}$ ($\text{m}^2\text{ s}^{-2}$), de windschering van $2\text{--}16\text{ m s}^{-1}$. Grote clusters en complexen komen globaal voor bij hogere CAPE ($>500\text{ J kg}^{-1}$) en windscheringswaarden ($>5\text{ m s}^{-1}$) dan andere soorten onweersbuien. Kleinere clusters komen globaal voor als de CAPE onder de 1000 ligt. De Boyden index is bij kleine clusters 96 of 97.

Het Bulk Richardson getal ligt voor bijna al deze buien ongeveer tussen 5 en 40, wat voor supercells zou pleiten (Weisman en Klemp 1982). Echte duidelijke supercells zijn in dit onderzoek niet gevonden, met uitzondering van minisupercells (of "low topped" supercells) op 24 september. Dit bevestigt de conclusie van Straka en Rasmussen (1998) dat het Bulk Richardson getal in de praktijk weinig nut heeft voor het voorspellen van het type onweersbuien (zie ook paragraaf 2.3.3). Een andere mogelijkheid is dat de in dit onderzoek bepaalde CAPE systematisch te laag is.

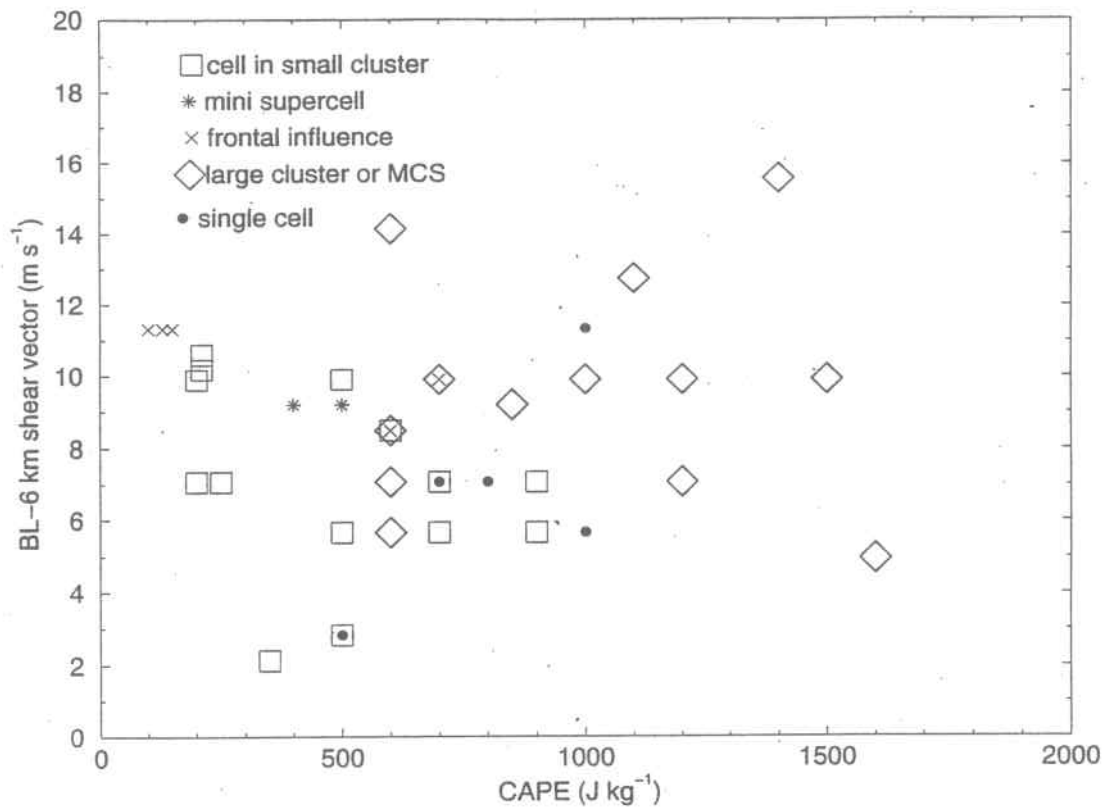
De bliksemactiviteit laat zich onderscheiden in twee groepen, de grote clusters en complexen aan de ene kant en de individuele cellen (los of in een cluster) aan de andere kant. De grote clusters en complexen hebben een hogere en wijd uiteenlopende totale bliksemactiviteit, wat niet verwonderlijk is omdat het convectieve deel groter is en meer varieert tussen de complexen onderling. De typische individuele cellen hebben een kleinere spreiding in activiteit.

Van de individueel beschouwde cellen hebben losse cellen een gemiddelde activiteit van 11 (maximaal circa 20) ontladingen per minuut bij een gemiddelde grootte van 16 pixels (90 km^2) $>40\text{ dBZ}$. De cellen in clusters produceren gemiddeld 15 (maximaal circa 30) ontladingen per minuut bij een gemiddelde grootte van 24 pixels (135 km^2) $>40\text{ dBZ}$. Dit levert voor beide celtypen gemiddeld 0.11 strokes per minuut per $\text{km}^2 >40\text{ dBZ}$ op, tijdens de piekactiviteit. Dit varieert echter wel sterk.

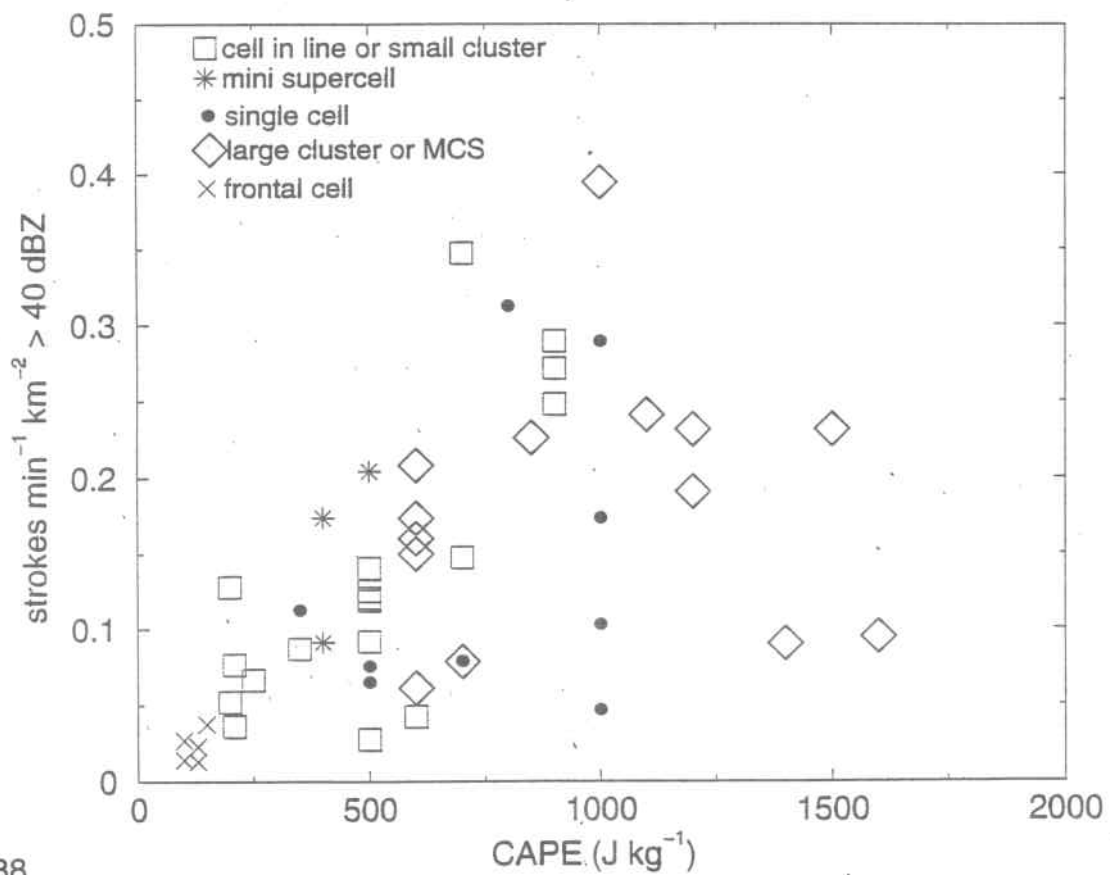
De verhouding tussen enerzijds wolkontladingen en verticale ontladingen en anderzijds positieve en negatieve ontladingen wisselt sterk binnen elk onweersbuitype.

Figuur 60. (volgende pagina). Boven: parameterruimte van CAPE en windschering voor de verschillende celtypen. Onder: relatieve bliksemactiviteit voor verschillende celtypen.

Cell types in the CAPE–shear parameter space



Lightning production for cell types



4.1.6 Conclusies

- ❖ De maximaal haalbare piekactiviteit neemt toe met de mate van onstabiliiteit en de hoeveelheid verticale windschering.
- ❖ De activiteit per km² van de convectieve zone neemt alleen toe met toenemende onstabiliiteit.
- ❖ Het maximaal haalbare percentage verticale ontladingen neemt af met toenemende onstabiliiteit. Bij lage onstabiliiteit kunnen hoge en lage percentages beide voorkomen.
- ❖ De windschering is niet significant van invloed op het percentage verticale ontladingen. Iets dergelijks geldt voor het aandeel van positieve ontladingen.
- ❖ De verhouding positief/negatief vertoont geen enkele relatie met onstabiliiteit, windschering, temperatuur en vocht.
- ❖ De gegevensset van dit onderzoek heeft te weinig variatie in 700 hPa temperatuur om betrouwbare uitspraken te kunnen doen.
- ❖ De K-index (met vocht) is niet goed gecorreleerd met bliksemactiviteit, ook te weinig variatie en is bij de bepaling waarschijnlijk te afhankelijk van lokale verschillen.
- ❖ Gemiddelde bliksemactiviteit (*: in deze studie waargenomen):

	Gem.piek- activiteit (strok. min ⁻¹)	Maximale piekact. (strok. min ⁻¹)	Gem. opp. >40 dBZ op piek (km ²)
Losse cel	11	20	90 (16 pixels)
Cel in cluster/lijn	15	30	135 (24 pixels)
Grote cluster of complex	>30	230 *	Sterk variabel

- ❖ Op basis van de indeling in celtypen in deze studie zijn er geen speciale bliksemverhoudingen of een bepaald verloop van activiteit verbonden aan de verschillende celtypen.

Bij de eindconclusies wordt een meer anecdotische waarneming uit deze studie vermeld, die ook betrekking heeft op het type onweersbui.

4.1.7 Discussie

Bij een grotere onstabiliiteit en bij meer windschering zijn de onweersbuien vaak groter, wat de verklaring is voor de toename van de piekactiviteit, die over de hele cel of cluster gemeten is.

De activiteit per oppervlakte-eenheid van de convectieve zone is een betere maat, omdat daarmee het effect van de grootte van een cel of complex geëlimineerd wordt. Zoals hier blijkt neemt de relatieve bliksemactiviteit alleen toe met de onstabiliiteit (CAPE). De mate van onstabiliiteit is bepalend voor de kracht van de stijgstroom. De hogere stijgsnelheden bij grotere onstabiliiteit maken effectievere botsingen mogelijk

waardoor er meer lading gescheiden wordt. Dit resulteert daardoor in een hogere productie per eenheid van de convectieve zone.

Het afnemen van het maximale percentage verticale ontladingen met toenemende onstabieleit komt waarschijnlijk doordat krachtiger stijgstroomen de ladingscentra naar hogere niveaus in de bui doen verschuiven. (bijv. Lang *et al.*, 2000; MacGorman *et al.*, 1989). Op grotere hoogte, bij lagere luchtdruk is het doorslagveldsterkte kleiner en het onderste ladingscentrum bevindt zich verder van de grond, zodat zich absoluut en relatief meer wolkontladingen voordoen.

Zoals hier is waargenomen doen hoge percentages wolkontladingen zich bij elke mate van onstabieleit voor. Een bepaalde hoeveelheid CAPE hoeft echter niet gerealiseerd te worden, zodat ook zwakkere stijgstroomen (met relatief meer wolkaarde ontladingen) kunnen voorkomen. Bij lagere CAPE is de activiteit ook gering, zodat absoluut gezien het aantal wolkontladingen klein is.

Er is waarschijnlijk een ander mechanisme dat zorgt voor een relatief hoge productie van wolkontladingen.

Het gemiddelde percentage positieve ontladingen van het totaal aantal ontladingen is minder gecorreleerd met de onstabieleit, maar volgt eenzelfde dalende trend als het algemeen percentage wolkaarde ontladingen. Voor de positieve ontladingen geldt dus waarschijnlijk hetzelfde mechanisme als voor negatieve ontladingen.

In enkele onderzoeken (zie MacGorman en Rust, 1998 p.289-290) werd gevonden dat een hogere windschering meer positieve ontladingen veroorzaakt. Dit heeft echter betrekking op winterse onweersbuien. In vergelijking met zomerse onweersbuien is bij winterse onweersbuien de stijgstroom minder sterk, waardoor bij eenzelfde windschering de bui gaat overhangen in de richting van de bovenwind. Dit kan positieve lading in het aambeeld (dat 's winters tot lagere hoogten reikt) blootstellen aan de grond, wat tot een hoger percentage positieve ontladingen zou leiden.

De toename van de bliksemactiviteit met de temperatuur op 700 hPa die door Wessels (1998) werd gevonden is te verklaren door: 1) warme lucht bevat gemiddeld meer vocht dan koele lucht, waardoor er meer hydrometeoren kunnen ontstaan die meedoen aan de ladingsscheiding, en 2) bij een hogere 700 hPa-temperatuur, als maat voor de gemiddelde temperatuur van de troposfeer, ligt de tropopause gemiddeld hoger waardoor intensievere convectie mogelijk is.

De 700 hPa-temperatuur heeft invloed op de verticale verdeling van de verschillende soorten hydrometeoren en de ladingscentra. Het eerste ladingscentrum ligt typisch op 2-3 km hoogte. Dit kan de verhouding tussen wolkontladingen en verticale ontladingen beïnvloeden, maar er zijn ongetwijfeld andere factoren in het spel.

4.2 Relaties tussen radarkenmerken en bliksemactiviteit

4.2.1 Grootte van de convectieve zone

Het verband tussen piekactiviteit en de grootte van het gebied van de bui met een reflectiviteit groter dan 40 dBZ is significant: de correlatiecoëfficiënt bedraagt 0.77. Zie figuur 61.

Bij de verhoudingen tussen wolk- en verticale ontladingen en het percentage positieve ontladingen zijn de trends niet significant. Bij positieve ontladingen lijkt het er echter op dat bij de grotere cellen en complexen ($> 200 \text{ km}^2$) naar verhouding minder positieve ontladingen voorkomen (meestal rond 3%). Bij de kleinere cellen kunnen ook hoge waarden voorkomen tot ongeveer 15%. De uitblikser van 15% bij ca. 300 km^2 is een meting uit het eindstadium van de grote buienlijn van 24 september. De grafiek is in feite schijn: bij grote clusters en complexen kunnen bepaalde cellen afwijkende percentages vertonen, terwijl andere cellen in die cluster de activiteit domineren. Daardoor worden afwijkingen onzichtbaar in de percentages.

Bij een hogere relatieve bliksemactiviteit van de convectieve zone neemt het maximaal haalbare percentage wolk-aarde ontladingen af. Hiervoor geldt weer dat een naar verhouding hoge wolkontladingsactiviteit bij elke waarde voor kan komen. Dit is niet verwonderlijk omdat de relatieve bliksemactiviteit goed samenhangt met de CAPE, waarbij hetzelfde effect optreedt.

De grootste omvang van de convectieve zone valt samen met de tijd van de bliksempiek. Het gemiddelde is 1-2 minuten na de bliksempiek, meestal variërend rond 0 van -15 tot +15 minuten.

4.2.2 Echotoppen

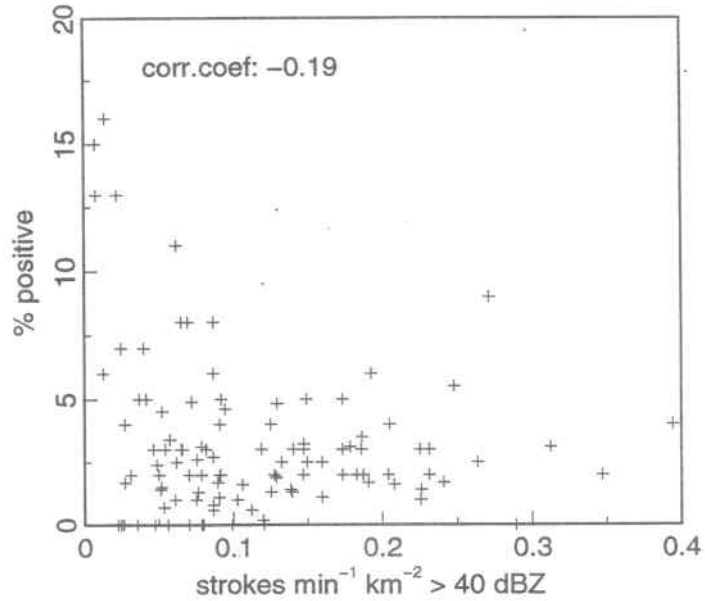
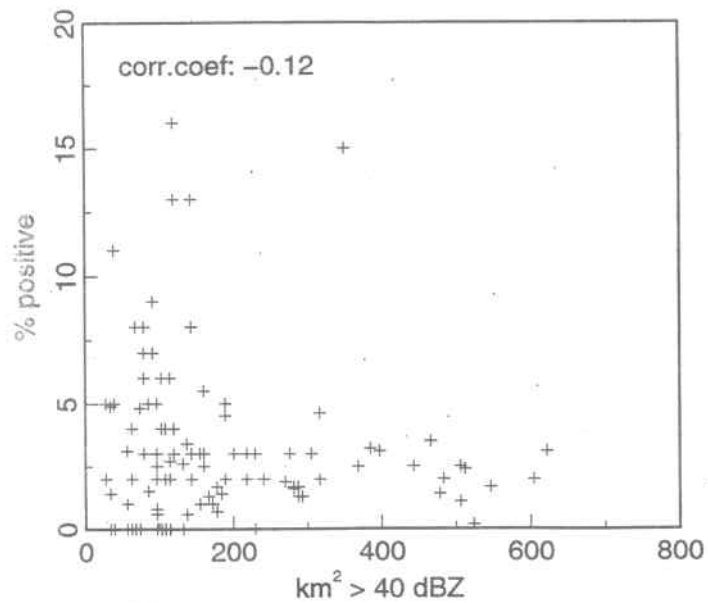
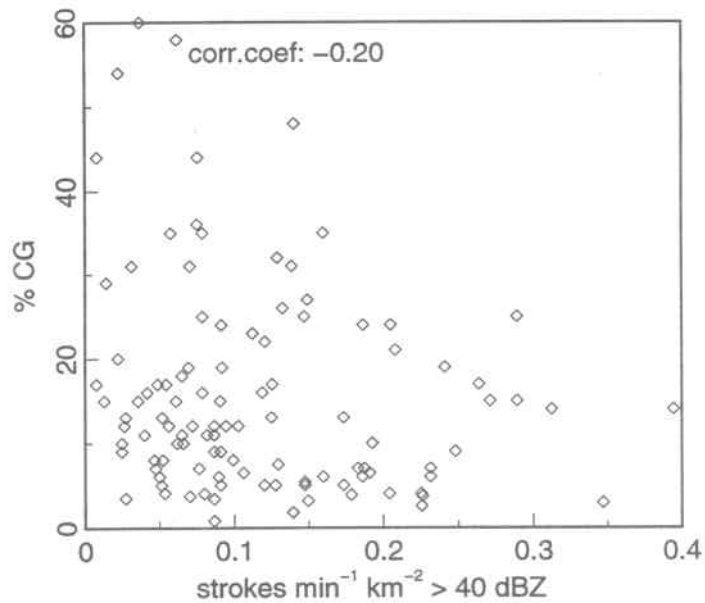
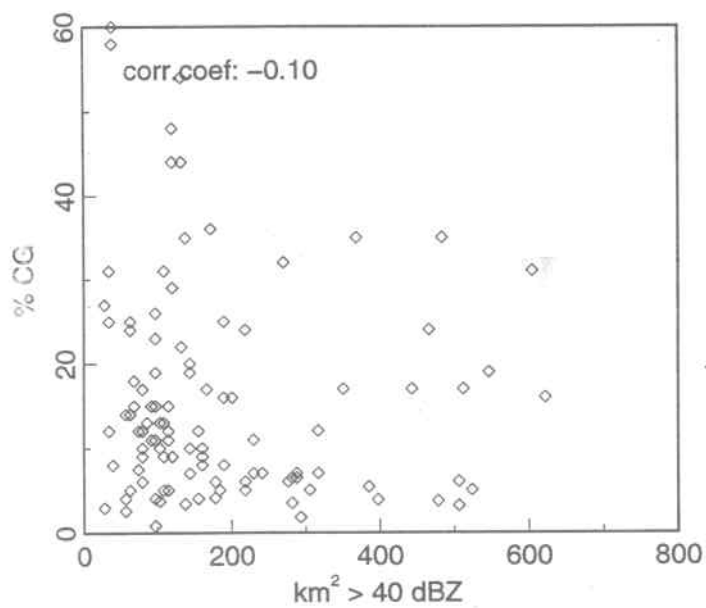
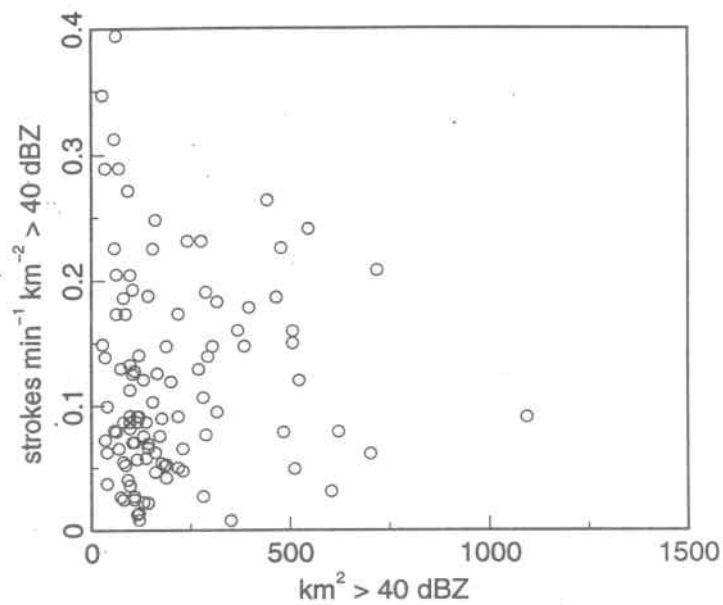
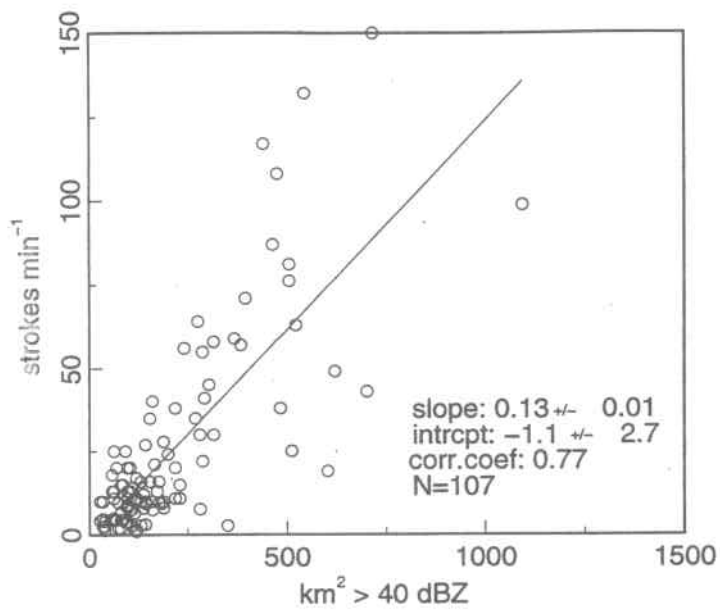
De piekactiviteit neemt toe met hogere echotoppen (corr. 0.67), maar de spreiding bedraagt een factor 10 tot 100 (figuur 62).

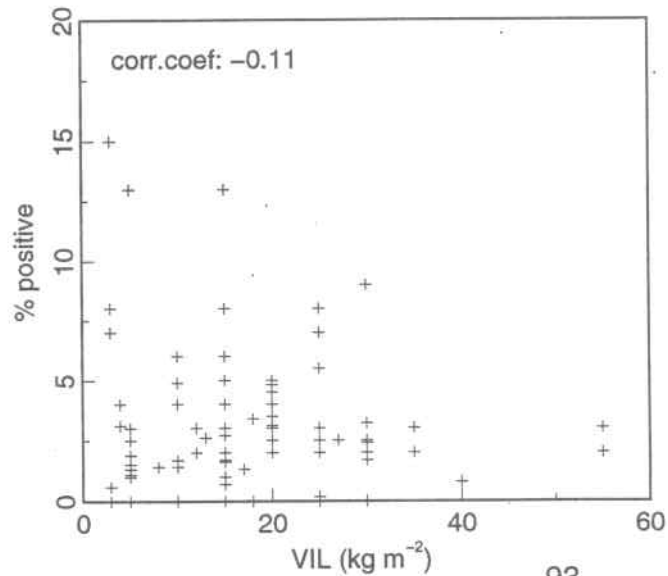
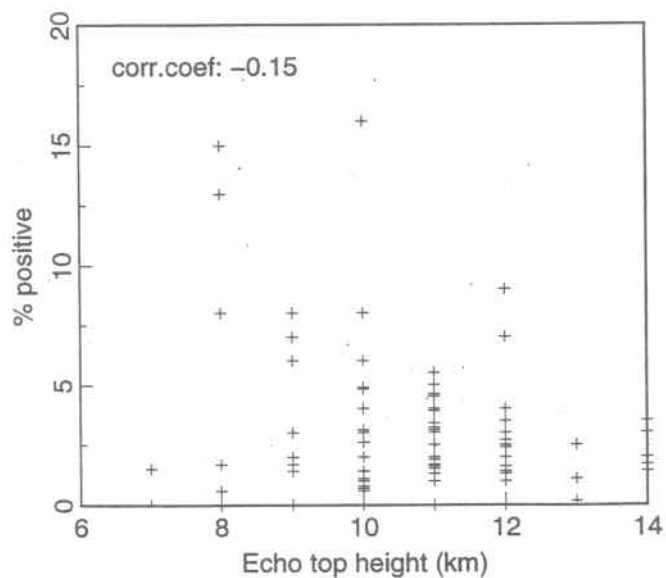
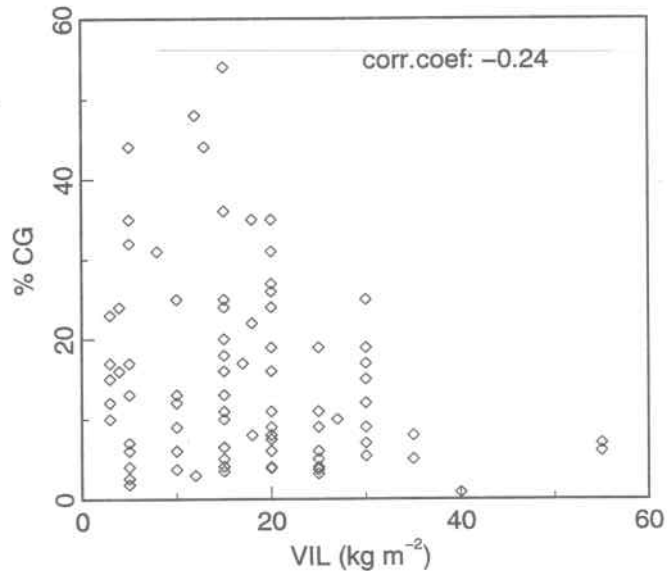
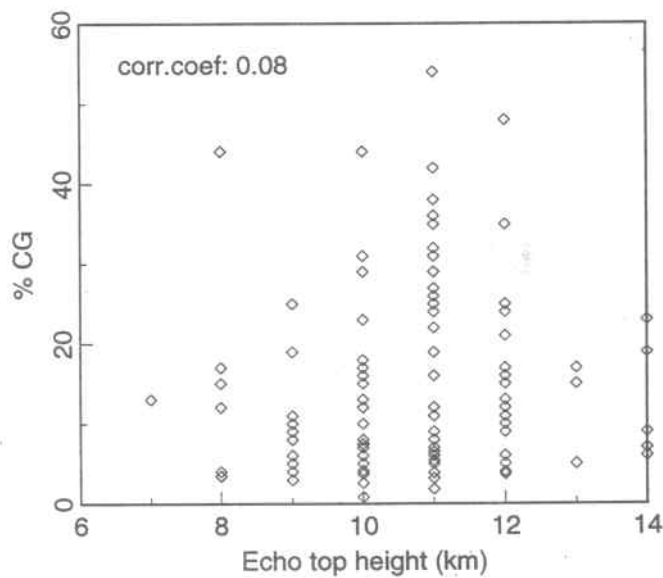
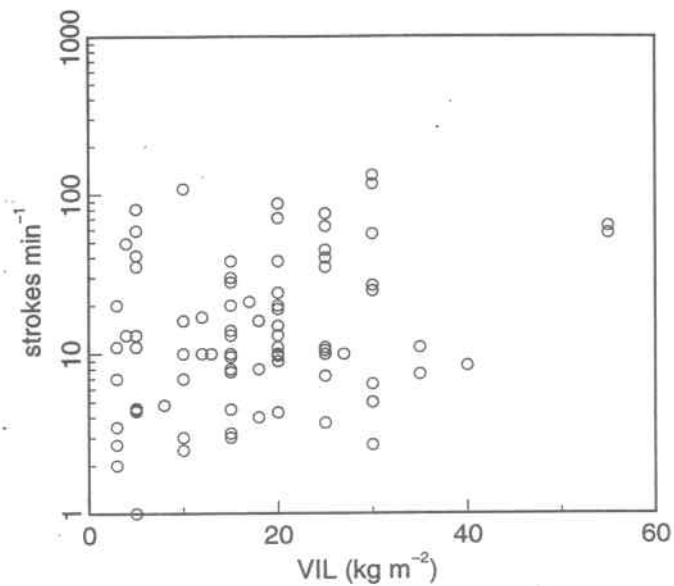
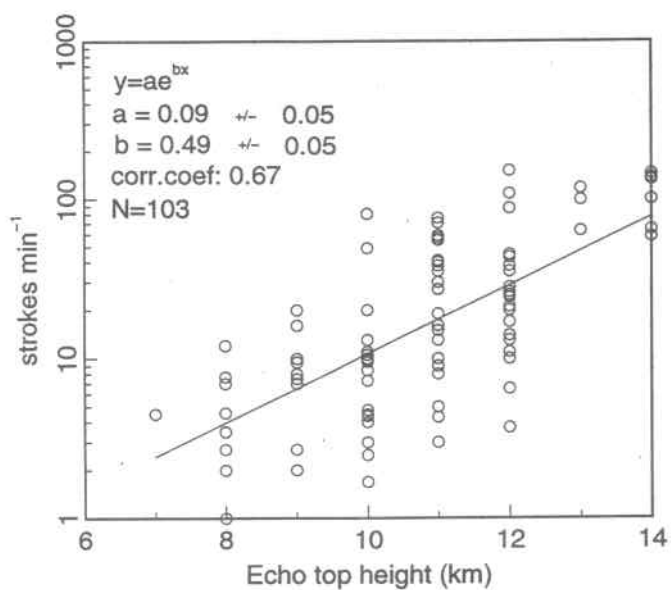
De relatieve bliksemactiviteit (niet getoond) en percentages CG en positief zijn niet goed gecorreleerd met de echotoppen.

De maximale echotophoogte valt gemiddeld zo'n 7 minuten voor de bliksempiek, praktisch dus 0-15 minuten. De echotoppen zijn in deze studie bepaald tot op 1 km nauwkeurig en wisselen niet veel, waardoor de grafiek over het algemeen vrij vlak is.

Figuur 61 (volgende pagina). Totale piek-bliksemactiviteit en gemiddelde percentages verticale ontladingen en positieve ontladingen van het totaal tegen de grootte van het gebied van de onweersbui met reflectiviteiten groter dan 40 dBZ, en het percentage verticaal en positieve ontladingen van het totaal aantal ontladingen tegen de relatieve bliksemactiviteit.

Figuur 62 (pagina 93). Totale piek-bliksemactiviteit en gemiddelde percentages verticale ontladingen en positieve ontladingen van het totaal tegen Echotophoogte en Vertically Integrated Liquid.





4.2.3 Vertically Integrated Liquid

De waarde van VIL vertoont geen enkele samenhang met de piekactiviteit en de relatieve bliksemactiviteit (deze laatste is hier niet getoond). De enige, maar zwakke tendens is dat er relatief vaker hoge percentages wolkontladingen voorkomen bij hogere VIL-waarden (corr. 0.24).

Van de cellen waarvan kwartierlijkse volumedata beschikbaar was is het tijdsverschil tussen VIL-piek en activiteitspiek bepaald.

De piekactiviteit volgt meestal kort na het maximum van VIL: gemiddeld 9 minuten na de VIL-piek. Dit is echter afgeleid uit kwartierlijkse data, zodat gesproken moet worden van 0-15 minuten. De spreiding hierin is klein, er zijn slechts weinig gevallen dat VIL na de bliksempiek een maximum bereikt.

4.2.4 Tijdsduur tussen begin, piek en eind van de bliksemactiviteit

In een poging een karakteristiek verloop van de bliksemactiviteit te schetsen ten opzichte van de levenscyclus van een onweerscel zijn, naast de gemiddelde activiteit, ook de gemiddelde tijdsduren tussen begin, piek en eind van de bliksemactiviteit bepaald uit de grafieken. Het valt op dat de bliksemactiviteit van het gros van de individuele cellen vrij gestaag toeneemt, een piek bereikt en weer afneemt, tot een laag activiteitsniveau of geheel uitgedoofd. Meestal is de piek vrij symmetrisch.

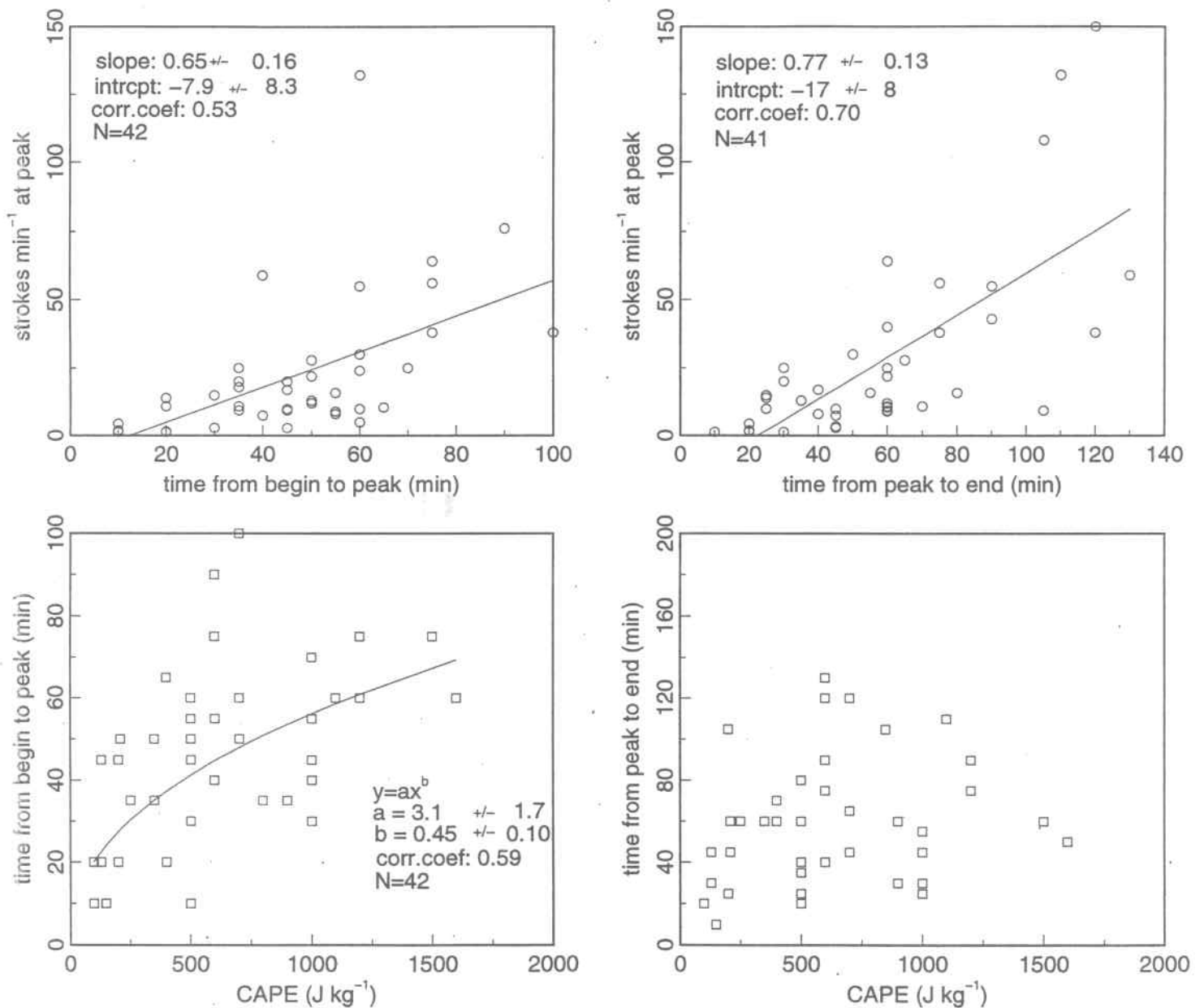
Voor sommige cellen kon het tijdverschil tussen begin en piek (of piek en eind) niet worden bepaald, omdat het begin of eind buiten het detectiebereik lag of omdat er bijvoorbeeld nieuwe cellen aan vast groeiden die de activiteit overnamen. Dit kan de gemiddelde waarde iets beïnvloeden.

Losse cellen bereiken gemiddeld na 40 minuten hun piek, cellen in lijnen of kleine clusters na 45 minuten. Dit verschil is niet significant, gezien de onzekerheden bij de bepaling van de verschillen uit de grafieken. Grote clusters en complexen (totaal) bereiken na gemiddeld 70 minuten hun maximale bliksemactiviteit.

Gemiddeld vindt de toename van bliksemactiviteit plaats met 0.65 ± 0.16 strokes min^{-2} , maar de toename is meestal niet lineair. Zie figuur 63 bovenaan.

De tijd van de piek tot het einde laat een beter verband zien (corr. 0.70) met de piekactiviteit dan die tussen begin en piekactiviteit (corr. 0.53). De afname tot (ongeveer) het einde van de bliksemactiviteit duurt ongeveer even lang of iets langer dan de toename van begin tot piek: gemiddeld 40 minuten voor losse cellen, 55 minuten voor cellen in lijnen of kleine clusters en 90 minuten voor grote clusters en complexen (totaal).

Het tijdsverschil is ook tegen CAPE uitgezet (figuur 63 onderaan). Daarbij blijkt een positief verband met de tijd van aanvang tot piekactiviteit (corr. 0.59), maar geen verband met de tijd van piek tot het einde van de bliksemactiviteit.

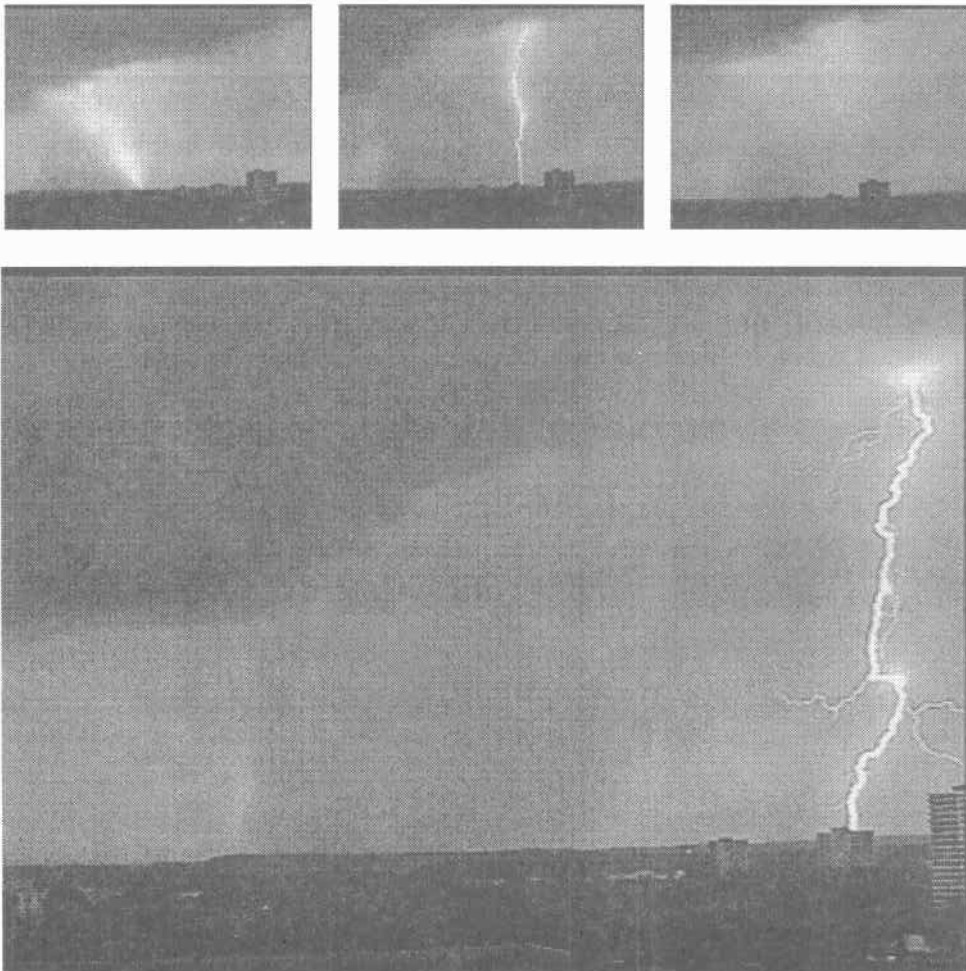


Figuur 63. Totale piek-bliksemactiviteit tegen de tijd tussen begin- en piekactiviteit en de tijd tussen piek- en eindactiviteit. Daaronder de begin-piek en piek-eind-tijden tegen CAPE.

4.2.5 Ruimtelijke samenhang tussen bliksemactiviteit en radarkenmerken

De bliksemactiviteit bevindt zich bij alle behandelde cases voor het overgrote deel in het regengebied van de bui, waarvan slechts een klein deel in lagere reflectiviteiten voorkomt dan 40 dBZ. In veel gevallen gaat het bereiken van een neerslagintensiteit van 10 mm h^{-1} (40 dBZ) aan de grond behoorlijk gelijk op met de aanvang van onweersactiviteit (zie de levensloopgrafieken). De bliksemactiviteit dooft vaak iets (0-45 minuten) eerder uit dan de reflectiviteit van 40 dBZ.

De hoogste concentratie ontladingen bevindt zich vaak onder of in de buurt van de hoogste echotoppen. Er zijn weinig onweersbuien in deze studie die duidelijk ontladingen in het aambeeld produceren, waaronder geen neerslag de grond bereikt. Meestal komen er wel enkele ontladingen buiten het neerslaggebied voor, maar is de afstand tot de neerslag klein, of is dit te wijten aan de locatienauwkeurigheid of verplaatsing van de onweershaard (vooral bij snel trekkende buien). Ontladingen die buiten het neerslaggebied voorkomen hoeven niet uit het aambeeld op grotere hoogte te komen. Dichter bij de neerslag komt samenhangend met de instroom en stijgstroom vaak een regenvrije wolkenbasis voor waaruit het soms bliksemt. Visuele waarnemingen laten vaak zien dat verticale ontladingen en kleine wolkontladingen dicht aan de rand van zware neerslag voorkomen (zie ook figuur 64).



Figuur 64. Ontladingen aan de rand van zware neerslag. De videobeelden zijn gemaakt op 29 mei 1999, Wageningen rond 19:30h UTC (in deze studie niet onderzocht).

Duidelijk zijn ontladingen (meest wolkontladingen) gedetecteerd bij het complex van 25/26 augustus (zie figuur 27 op pagina 46). Bij een zeer actief complex op 30 mei 1999 (waarvan geen levensloopgrafieken) boven Noord-Brabant treden van 12:45h tot 13:15h aan de voorzijde tot op 15 km van de neerslagzone enkele wolkontladingen, positieve ontladingen en sporadisch enkele negatieve ontladingen op. Deze bevinden zich onder het uitgestrekte aambeeld zoals te zien op het echotoppenbeeld (figuur 66).

Iets aan de rechterkant (zuidoostkant) van de zware neerslagkern bij de minisupercells van 24 september 1999 komen ook veel wolkontladingen voor. Maar bij één van die cellen kwamen er ook enkele wolkontladingen (vooral eenpunts) voor buiten het aambeeld, terwijl de cel in principe door een goed detectiegebied trok. Men moet voorzichtig zijn met uitspraken over bliksems die volgens SAFIR ver buiten de neerslag en zeker die buiten het aambeeld liggen. Dit geldt zeker buiten het meest ideale detectiegebied. Ook moet rekening gehouden worden met de trek van buien. Om trekverschijnselen in het bliksempatroon te elimineren moet een korte bliksempriode (bijvoorbeeld 3 minuten) bij het radarbeeld geselecteerd worden. Ontladingen in het aambeeld zijn mogelijk een aanwijzing voor sterk stijgende bewegingen tot in het aambeeld.

Op 6 september en 19 juli 1999 zijn er in de droge zone tussen de cellen onder de wolkenbasis of het aambeeld ook ontladingen te vinden.

De bliksemactiviteit vertoont goede gelijkenis met het VIL-patroon. Hoge bliksemconcentraties komen voor in de buurt van hoge VIL. Het verband van de VIL-waarde met de bliksemproductie is niet duidelijk. Bij enkele gevallen (8 augustus, 25/26 augustus, 2 juni) kwam het geregeld voor dat de bliksemactiviteit aan de achterzijde van de VIL-kern voorkwam. Een mogelijke verklaring daarvoor is advectie van lading met de bui-relatieve bovenwind vanuit de kern. Deze buien trekken ook vrij snel. Bij langzamer trekkende buien zoals op 6 september 1999 is de bliksemconcentratie gecentreerd op de VIL-kern. Bij snel trekkende buien is de VIL minder betrouwbaar, omdat de bui zich teveel verplaatst gedurende de grote volumescan, die 3 minuten duurt. Dit kan van invloed zijn.

Een in deze studie vaak waargenomen verschijnsel is dat als een cel of deel van een cluster uitsterft er vaak enkele ontladingen overblijven, vaak met positieve ladingsoverdracht (zie ook de levensloopgrafieken).

Verder is het in deze studie waargenomen dat de verschillende soorten ontladingen meestal niet speciaal in een bepaald deel van de onweersbui voorkomen, behalve bij cellen in verschillende levensfasen als onderdeel van clusters en complexen.

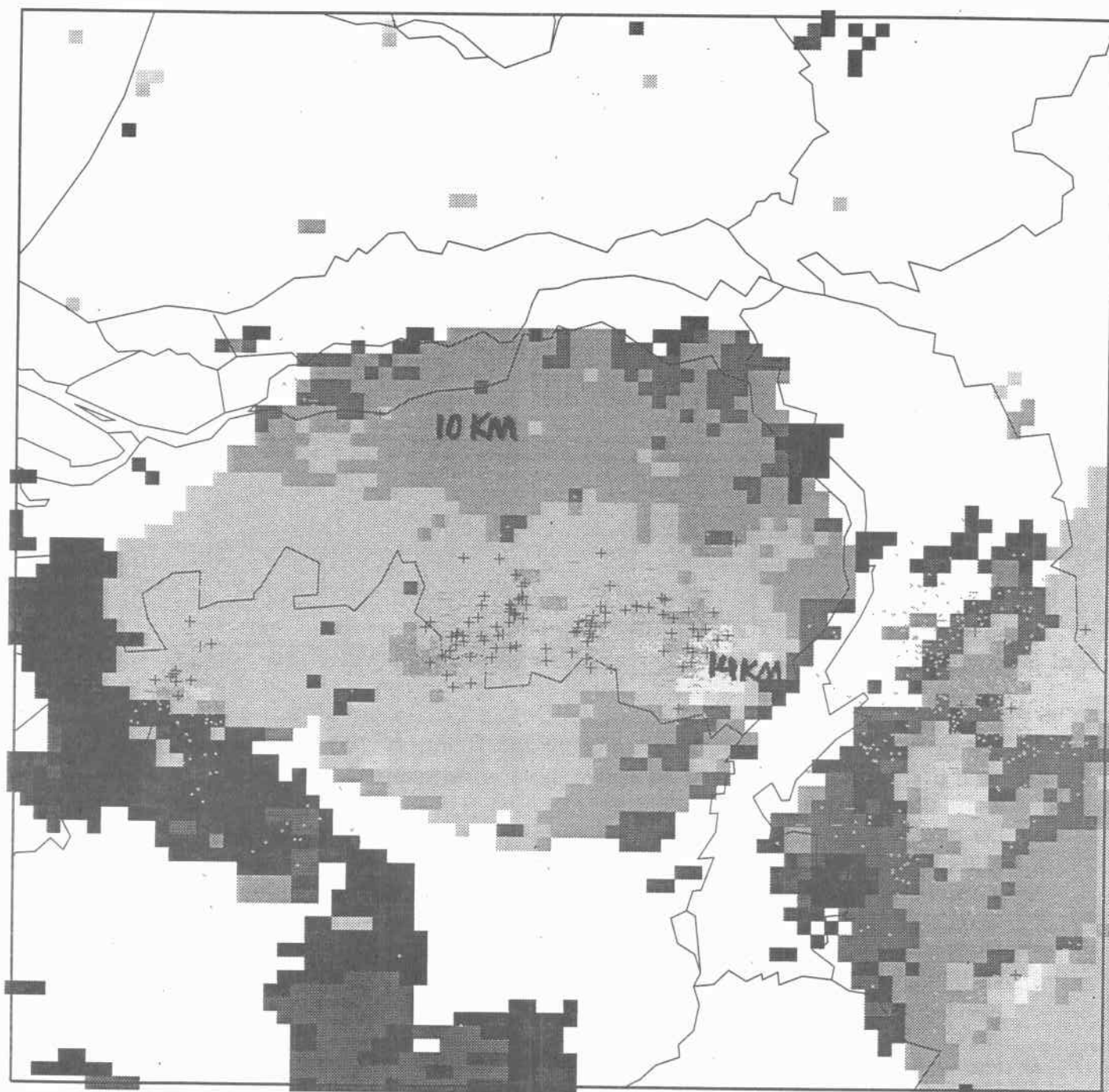
Figuur 65 (volgende pagina). PseudoCAPPI-beeld van 30 mei 1999 om 13:15h UTC, met ontladingen duidelijk buiten de neerslag aan de voorzijde van een zware onweersbui.

Figuur 66 (pagina 99). Het echotoppen-beeld van 30 mei 1999 om 12:52h UTC laat zien dat de ontladingen in of onder het aambeeld voorkomen.

Percentage: 5.1 % cloud-to-ground 2.2 % positive from a total of 2585 strokes



SAFIR CG + IC Echo Top Heights 990530 12:52 UTC



Plotted: 3327 intracloud(.) 59 negative cloud-to-ground(-) 120 positive cloud-to-ground(+)
in a time span of 15 min centered on radar time

Percentage: 5.1 % cloud-to-ground 3.4 % positive from a total of 3506 strokes



Echotop heights (km)

4.2.6 Conclusies

- ❖ De totale bliksemactiviteit neemt duidelijk toe met de grootte van de convectieve zone van een onweersbui.
- ❖ De totale bliksemactiviteit neemt toe met de echotophoogte. De relatieve bliksemproductie is niet gecorreleerd met de echotophoogte (figuur niet getoond).
- ❖ De hoeveelheid VIL heeft geen invloed op de totale bliksemactiviteit en ook niet op de relatieve bliksemactiviteit (figuur niet getoond). Het negatieve verband met het percentage CG is zwak.
- ❖ VIL en echotophoogte van een cel pieken gemiddeld in het 15 minuten-vak voor de bliksemactiviteitspiek.
- ❖ De maximale grootte van de convectieve zone valt samen met de activiteitspiek.
- ❖ Bij hogere CAPE is het tijdsverschil tussen aanvang en piek van bliksemactiviteit gemiddeld langer, maar er is geen verband met piek-eindtijd.
- ❖ Het gros van de individuele cellen bereikt slechts één bliksemactiviteitspiek.
- ❖ De gemiddelde tijden van het begin tot de piek en van piek tot eind van de bliksemactiviteit zijn als volgt:

	Gem. tijd begin-piek (minuten)	Gem. tijd piek-eind (minuten)
Losse cel	40	40
Cel in cluster/lijn	45	55
Grote cluster of complex	70	90

- ❖ Het bereiken van een neerslagintensiteit van 10 mm h^{-1} (40 dBZ) aan de grond gaat behoorlijk gelijk op met de aanvang van onweersactiviteit (zie de levensloopgrafieken).
- ❖ De bliksemactiviteit dooft vaak iets (tot 45 minuten) eerder uit dan de reflectiviteit van 40 dBZ.
- ❖ Verreweg de meeste ontladingen komen voor in het 40 dBZ-gebied, in de buurt van de hoogste echotoppen en VIL-kernen.
- ❖ Gedurende de levensloop van een onweersbui schommelt het percentage verticale ontladingen soms sterk. Dit is met de hier gebruikte radarparameters (geen Doppler windinformatie en neerslagtype-identificatie) niet goed te verklaren.
- ❖ Het lijkt erop dat bij lage bliksemactiviteit (meestal <3 ontladingen per minuut), met name aan het einde van de bui, procentueel meer verticale ontladingen voorkomen, meestal zijn daarvan ook meer positief van ladingsoverdracht.

4.2.7 Discussie

De duidelijke samenhang tussen de grootte en timing van het gebied met een reflectiviteit hoger dan 40 dBZ en de bliksemactiviteit is ook gevonden door Keighton *et al.* (1991) voor een zwaar onweerscomplex, hoewel zij alleen verticale ontladingen tot hun beschikking hadden. Een nog betere relatie werd gevonden met reflectiviteiten hoger dan 50 en 55 dBZ op 6 km hoogte. Op middelbare hoogte wordt de lading gescheiden, dit verloopt effectiever bij hogere dichtheden van hydrometeoren. De reflectiviteit op middelbare hoogte daalt na verloop van tijd naar het aardoppervlak. De bliksemactiviteit zou dan iets voorlopen op de omvang van het gebied met reflectiviteit groter dan 40 dBZ aan de grond, maar in deze studie blijkt dat niet significant. In sommige gevallen blijft de bliksemactiviteit daarbij juist achter.

De echotophoogten zijn niet helemaal los te beschouwen van de hoeveelheid CAPE en de temperaturen in de hogere troposfeer. De CAPE zorgt duidelijk voor een hogere bliksemproductie. Als er meer CAPE is betekent dit dat een luchtbel in het algemeen verder door kan stijgen. Voor een gegeven echotophoogte kan de hoeveelheid CAPE eronder echter wel variëren.

In deze studie is geen trend gevonden tussen de echotophoogte en het percentage wolkontladingen. Onweersbuien met hogere toppen produceren dus gemiddeld niet meer wolkontladingen dan die met lagere toppen.

Vertically Integrated Liquid neemt gemiddeld toe met toenemende CAPE (grafiek niet getoond), maar er is geen verband met de piekactiviteit en de relatieve bliksemactiviteit, zoals bij CAPE wel het geval is. Watson *et al.* (1995) hebben het voorkomen van wolk-aarde ontladingen ten opzichte van VIL en echotophoogten onderzocht, maar hun aanpak was anders: zij telden het aantal ontladingen per VIL- en echotopklasse. De bliksemactiviteit in ontladingen per minuut of de bliksemdichtheid per onweersbui was niet onderzocht, zodat deze studie niet bruikbaar bleek om te vergelijken.

De aanwezigheid van een grote hoeveelheid hydrometeoren in een verticale kolom zou volgens de verwachting over het algemeen de efficiëntie van het ladingsscheidingsproces moeten verhogen. Het gebrek aan verband tussen VIL en bliksemactiviteit is wel te verklaren: een puntmeting van de maximale VIL kan eenzelfde waarde opleveren voor een kleine cel en een uitgebreid complex. Dit geldt ook voor echotoppen, maar een puntmeting van de echotop is representatiever voor de rest van een cel of complex dan een puntmeting van VIL. Een beter verband zou worden verwacht voor de relatieve bliksemactiviteit, maar dit blijkt niet. Ruimtelijk is de bliksemactiviteit duidelijk geconcentreerd in (of in de nabijheid van) VIL-kernen, maar verband tussen de waarde van VIL in zo'n kern en de daarbij horende bliksemactiviteit is er nauwelijks. Waarschijnlijk is de zogenaamde "VIL-weight", de totale vloeibaar/vast waterinhoud van een cel, beter gecorreleerd met de totale bliksemproductie. Het is ook beter om de locale bliksemdichtheid (aantal ontladingen per minuut per km²) in een onweersbui te vergelijken met de VIL en echotophoogte op dat punt, in plaats van de totale bliksemactiviteit en de relatieve bliksemactiviteit gemiddeld over een cel te vergelijken met een puntwaarneming van VIL en echotoppen, zoals in deze studie gedaan is.

Aangezien de bliksemactiviteit en het type ontladingen in ieder geval beïnvloed worden door de hoogte en onderlinge afstand van ladingscentra, en het nog niet

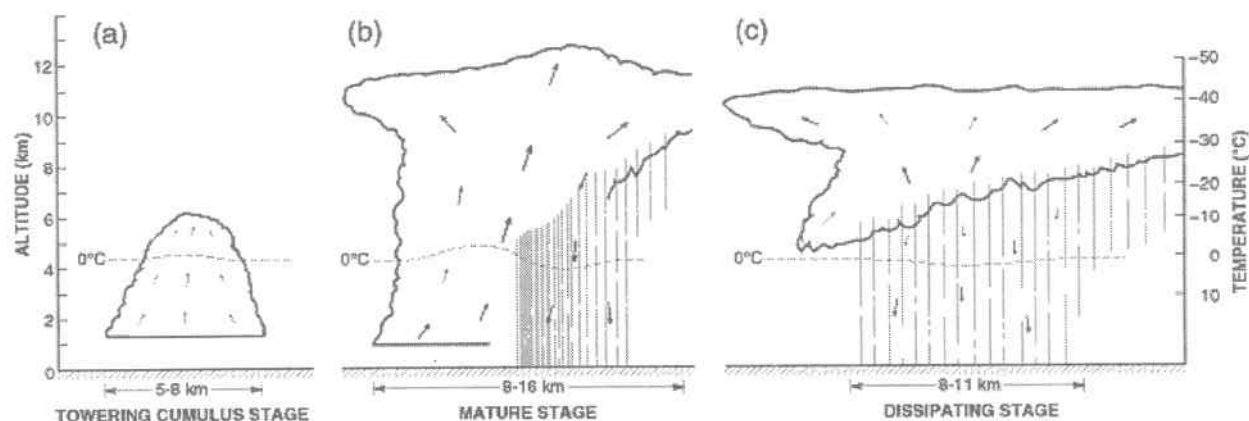
duidelijk is hoe de positie van ladingscentra afhangt van de verticale reflectiviteitsverdeling en temperatuurniveaus in combinatie met de stijgstroomsnelheid, is het moeilijk om conclusies te trekken. VIL is slechts een globale parameter die afhangt van het verticale reflectiviteitsprofiel: bij een bepaalde waarde van VIL kunnen zich bijvoorbeeld hoge neerslagdichtheden (bijv. >55 dBZ) onder in de bui bevinden, of hoger in de bui, of minder grote neerslagdichtheden door de gehele hoogte van de bui. Ook kan het merendeel van VIL uit ijs bestaan in plaats van vloeibaar water. De verticale verdeling van de dichtheid van hydrometeoren hangt op haar beurt weer af van diverse (omgevings)factoren, zoals de met de hoogte variërende stijgstroomsnelheid, vochtigheid en temperatuur van de lucht en advectie van neerslag uit nabijgelegen celkernen.

CAPE heeft wel enig verband met de tijd dat het duurt voordat een cel zijn piekactiviteit bereikt, maar niet met de tijd om van de piek naar ongeveer nul te dalen. CAPE is van invloed op de piekactiviteit en er is een minimumtijd waarin die te bereiken is, afhankelijk van de stijgsnelheden die van de realisatie van CAPE afhangen. Als eenmaal de piek is bereikt krijgen dalende bewegingen de overhand, waar CAPE niets mee te maken heeft.

De langere tijden van begin tot piekactiviteit en van piek tot eind bij grote clusters en complexen (in vergelijking tot de individuele cellen) komt door de ontwikkeling van zo'n complex. Het begint met een cel, waarna er steeds meer bijgroeien. De maximale activiteit wordt bereikt bij de maximale convectieve omvang. De afbraak daarvan duurt ook langer, de bliksemactiviteit blijft totdat de laatste cel uitgestorven is.

4.2.8 Typisch verloop van de totale bliksemactiviteit gedurende de levenscyclus van een onweerscel

Een van de onderzoeksvragen is hoe de bliksemactiviteit typisch verloopt gedurende de levenscyclus van een onweersbui. De levenscyclus van een typische onweerscel is gedocumenteerd in 1949 gedurende het Thunderstorm Project door Byers en Braham (publicatie niet beschikbaar).



Figuur 67. Ontwikkelingsstadia van een typische cel. (Byers en Braham 1949)

Een cel doorloopt enkele fasen (zie ook figuur 67):

In het *cumulus-stadium* groeit een enkele stijgstroom, die de cel geheel vult, tot grote hoogten. Daarbij vormen zich eerst wolkendruppeltjes, waarna deze aangroeien door condensatie en botsingen. Zo ontstaat er neerslag, die begint te vallen zodra de hydrometeoren zo zwaar zijn geworden dat de valsnelheid groter is dan de opwaartse snelheid in de stijgstroom. Door de vallende druppels en de door verdamping afgekoelde lucht ontstaan daalstromen.

Op de radarbeelden is er gedurende dit stadium nog niets te zien op lagere hoogte, maar een bel van neerslag is al te vinden op middelbaar niveau. De cel kan in dit stadium al wel worden waargenomen op een echotoppenbeeld.

De bliksemactiviteit is, zoals hier waargenomen, nog steeds afwezig.

Het *volwassen stadium* begint als neerslag de grond bereikt. Gedurende dit stadium neemt de stijgsnelheid verder toe, waarbij de celtop verder omhoog groeit. De grootste stijgsnelheden komen typisch vroeg voor in het volwassen stadium. Tijdens dit stadium bereikt de cel zijn maximale hoogte en neemt het horizontale gebied met neerslag toe. Daalstromen, die begonnen zijn op middelbare en lage niveaus, breiden zich horizontaal en verticaal uit. Als de daalstroom de grond bereikt, spreidt deze zich horizontaal over het aardoppervlak uit, met windstoten aan de voorste begrenzing.

Op de pseudoCAPPI-beelden is nu ook neerslag aanwezig, die snel toeneemt in reflectiviteit en omvang. De bliksemactiviteit begint op gang te komen rond het moment dat de 40 dBZ-reflectiviteit op laag niveau wordt waargenomen. De eerste paar ontladingen zijn doorgaans wolkontladingen. Daarbij is het in deze studie bij enkele gevallen waargenomen dat deze eerst een kleine horizontale omvang hebben, maar daarna groeien. De totale activiteit stijgt gestaag, net als de echotophoogte en Vertically Integrated Liquid. De activiteitspiek wordt na gemiddeld 40 minuten bereikt, tijdens de grootste omvang van de cel op lage hoogte, tijdens of net na de piek van VIL en echotoppen. Op basis van de 15 minuten-bliksemdata blijkt niet dat de piek van wolk-aarde ontladingen enige tijd na de piek van wolkontladingen komt, zoals onder andere Williams *et al.* (1989) wel vonden. In deze studie piekten volgens het SAFIR-systeem de wolkontladingen en de verticale ontladingen tegelijkertijd. Er valt meestal geen duidelijke verandering in het aandeel verticale ontladingen te bespeuren rond de piek. Hierbij moet wel worden bedacht dat in deze studie de wolk-aarde ontladingen als strokes geteld zijn, in plaats van flashes in de meeste literatuur. Als de gemiddelde multipliciteit verandert gedurende de levensloop van een cel zouden eventueel de verhoudingen kunnen veranderen.

Het *oplossingsstadium* begint als het horizontale gebied van de daalstroom volledig de laagste niveaus van de cel beslaat, ondertussen nog steeds uitbreidend.

Stijgstroomen kunnen zich nog voordoen in de hogere niveaus van de cel, maar deze worden niet meer gevoed door lucht van beneden, waardoor ze verzwakken.

Daardoor houdt het proces van condensatie en neerslaggroei langzamerhand op. Dit zorgt op zijn beurt voor een afname van de daalstroomsterkte.

Op de radar is te zien dat de omvang en de reflectiviteit van de cel op lage hoogte weer afneemt en ook de VIL neemt snel af, meestal is dat het moment waarop de activiteit het grootst is. De echotoppen zakken langzaam in. Na gemiddeld 40 minuten na de piek is de activiteit er wel uit. In dit laatste stadium blijven er relatief meer verticale ontladingen over, waarvan vaak ook meer positief. Dit is bijvoorbeeld

ook waargenomen door Fuquay (1982). Een mogelijke verklaring is dat door verdwijning van negatieve lading onder in de onweersbui de positief geladen bovenkant wordt blootgesteld aan de grond. Mogelijk vallen er ook positief geladen ijsdeeltjes uit het aambeeld naar lagere niveaus.

Het verloop van het aandeel verticale ontladingen gedurende de levensloop wisselt van cel tot cel en kan hier niet worden verklaard. Voor wat de ladingsscheidingsprocessen betreft, ligt het nogal complex. Zo wordt verondersteld (Lang *et al*, 2000; MacGorman en Rust 1998) dat (onder andere) de volgende aspecten belangrijk of van invloed zijn op de activiteit van wolkontladingen:

- stijgsnelheden
- concentratie en type hydrometeoren
- hoogte van ladingscentra
- onderlinge afstand tussen ladingscentra

Hier is waargenomen dat de hoogste totale bliksemactiviteit zich niet tijdens de grootste stijgende bewegingen voordoet (dan vinden er slechts enkele wolkontladingen plaats), maar wel op of net na het moment dat de cel het meeste water bevat en het hoogst is. Op dat moment vinden er nog steeds stijgende bewegingen plaats, minder sterk maar over een hoge, goed met water/ijs gevulde kolom lucht, zodoende effectiever in bliksemproductie.

5. Eindconclusies en aanbevelingen

Het doel van deze studie was inzicht te geven in het verloop en de ruimtelijke verdeling van de totale bliksemactiviteit gedurende de levensloop van diverse typen onweersbuien.

Hierbij is gebruik gemaakt van de KNMI-radars in De Bilt en Den Helder en het SAFIR bliksemdetectiesysteem van het KNMI en de Koninklijke Luchtmacht. Verder zijn er grond- en bovenluchtwaarnemingen gebruikt om de onweersbuien in hun synoptische context te onderzoeken.

De onderzoeksvragen waren:

- Wat zijn de algemene relaties tussen omgeving, type en radarkenmerken van een onweersbui en de bliksemactiviteit?
- Hoe verloopt de bliksemactiviteit gedurende de levensloop van onweersbuien en hoe is die ruimtelijk verdeeld?
- Is er op basis van de radar- en omgevingskenmerken van een onweersbui te voorspellen hoe de bliksemactiviteit zich ontwikkelt?

De antwoorden op de eerste twee vragen die in deze studie zijn gevonden worden hieronder opgenoemd. Daarbij wordt met *relatieve bliksemactiviteit* de activiteit per km^2 van het deel van de bui met een reflectiviteit groter dan 40 dBZ (ongeveer de convectieve zone) bedoeld.

- ❖ De maximaal haalbare piek van totale bliksemactiviteit neemt toe met de mate van onstabiliteit en de hoeveelheid verticale windschering.
- ❖ De totale bliksemactiviteit hangt nauw samen met de grootte van de convectieve zone. Dit levert een gemiddelde bliksemproductie van 0.13 strokes per minuut per km^2 met een reflectiviteit hoger dan 40 dBZ, in de convectieve zone van onweersbuien. Ook neemt de activiteit toe met hogere echotoppen, maar daarbij is de spreiding groter.
- ❖ Er is geen verband tussen de grootte van VIL en de activiteit of de relatieve bliksemproductie.
- ❖ De (maximaal haalbare) relatieve bliksemactiviteit neemt alleen toe met de onstabiliteit (CAPE). Zo mag bij 1000 J kg^{-1} gerekend worden op maximaal ongeveer 0.3-0.4 strokes per $\text{km}^2 >40 \text{ dBZ min}^{-1}$ in de convectieve zone.
- ❖ Het maximaal haalbare percentage verticale ontladingen neemt af met toenemende onstabiliteit. Bij lage onstabiliteit kunnen hoge en lage percentages beide voorkomen. Voor VIL geldt hetzelfde verband.
- ❖ De windschering is niet significant van invloed op het percentage verticale ontladingen. Iets dergelijks geldt voor het aandeel van positieve ontladingen.
- ❖ De verhouding tussen positieve en negatieve ontladingen vertoont geen enkele relatie met onstabiliteit, windschering, temperatuur en vocht en de radarparameters (de grafieken zijn daarvan niet getoond)
- ❖ In de dataset is te weinig variatie in temperatuur op 700 hPa en K-index om daar conclusies aan te verbinden.
- ❖ VIL en echotophoogte van een cel pieken gemiddeld in het 15 minuten-vak voor de bliksemactiviteitspiek.

- ❖ De maximale grootte van de convectieve zone valt samen met de activiteitspiek.
- ❖ Bij hogere CAPE is het tijdsverschil tussen aanvang en piek van bliksemactiviteit gemiddeld langer, maar er is geen verband met piek-eindtijd.
- ❖ De hoogste relatieve bliksemactiviteit wordt meestal rond de piekactiviteit bereikt.
- ❖ Het gros van de individuele cellen bereikt slechts één bliksemactiviteitspiek. De gemiddelde tijden en activiteit van de celtypen is samengevat in de volgende tabel (de onderste betreft gehele clusters in plaats van individuele cellen):

	Gem. tijd begin-piek (minuten)	Gem. tijd piek-eind (minuten)	Gem.piek- activiteit (strok. min ⁻¹)	Maximale piekact. (strok. min ⁻¹)	Gem. opp. >40 dBZ op piek (km ²)
Losse cel	40	40	11	20	90 (16 pixels)
Cel in cluster/lijn	45	55	15	30	135 (24 pixels)
Grote cluster of complex	70	90	>30	230 *	Sterk variabel

* maximaal waargenomen in deze studie

- ❖ Het bereiken van een neerslagintensiteit van 10 mm h⁻¹ (40 dBZ) aan de grond gaat ongeveer gelijk op met de aanvang van onweersactiviteit (zie de levensloopgrafieken). Of het benaderen of overschrijden van deze drempel in de convectieve zone van onweersbuien altijd onweer tot gevolg heeft is niet te zeggen, omdat hier geen onweerloze buien behandeld zijn.
- ❖ De bliksemactiviteit dooft vaak iets (tot 45 minuten) eerder uit dan de reflectiviteit van 40 dBZ.
- ❖ Verreweg de meeste ontladingen komen voor in het 40 dBZ-gebied, in de buurt van de hoogste echotoppen en VIL-kernen.
- ❖ Gedurende de levensloop van een onweersbui schommelt het percentage verticale ontladingen soms sterk. Dit is met de hier gebruikte radarparameters (geen Doppler windinformatie en neerslagtype-identificatie) niet goed te verklaren.
- ❖ De waarneming dat meestal eerst wolkontladingen een piek bereiken en daarna de verticale ontladingen (Williams *et al.*, 1989) wordt in dit onderzoek niet bevestigd. Voor de meeste cellen geldt dat de maxima van wolk- en wolk-aardeontladingen tegelijkertijd plaatsvinden (zie levensloopgrafieken).
- ❖ Bij lage bliksemactiviteit (meestal <3 ontladingen per minuut, bij een groter systeem soms hoger), met name aan het einde van de bui, komen procentueel meer verticale ontladingen voor, meestal zijn daarvan ook meer positief van ladingsoverdracht.

De onderzochte onweerssituaties vonden plaats in een CAPE-bereik van circa 150-1600 J kg⁻¹, gemiddeld 630 J kg⁻¹ en een BL-6 km shear vector-bereik van 2-16 m s⁻¹, gemiddeld 7 à 8 m s⁻¹.

Let wel: in deze studie is met *kwartierlijkse* data gewerkt. Over een tijdvak van bijvoorbeeld 3 minuten kunnen percentages en het aantal ontladingen per minuut afwijken (bijv. 8% positieve ontladingen over 15 minuten gemiddeld, 11% positief over 3 minuten gemiddeld, bij hoge activiteit, zoals waargenomen op 2 juni 1999)

Ook zijn hier *strokes* geteld in plaats van *flashes*. Als de gemiddelde multiplicitéit verandert in de loop van de tijd kunnen vergelijkingen met onderzoeken die *flashes* hebben onderzocht bemoeilijkt worden.

Op de derde onderzoeksvraag, de bruikbaarheid voor de voorspelling van de bliksemactiviteit en de ontwikkeling van onweersbuien op basis van radar- en omgevingskenmerken, zal nu worden ingegaan.

Op de termijn van 24 uur tot even voor het onweer zal de meteoroloog de omgevingskenmerken en synoptisch-dynamische omstandigheden onderzoeken op de mogelijkheid van het ontwikkelen van onweersbuien en het potentieel van die buien. Daarbij is een progtemp (verwacht temperatuur- en dauwpuntprofiel op basis van de modeluitvoer) een handig hulpmiddel. Ook worden kunnen kaarten van stabiliteitsparameters worden gebruikt. Op zeer korte termijn kunnen de actuele radiosonde-oplatingen uit de aanvoerrichting worden gebruikt, gecorrigeerd voor de verwachte maximumtemperatuur en eventuele veranderingen door verticale bewegingen.

Op basis van de in dit onderzoek waargenomen relaties tussen omgevingskenmerken en activiteit kan op zijn minst een (vrij grove) schatting worden gemaakt van het potentieel van de verwachte onweersbuien. Het is echter de vraag of er echt nuttige informatie wordt toegevoegd die de ervaren meteoroloog zelf nog niet heeft. Vaak is de spreiding behoorlijk groot, misschien te groot om van nut te zijn bij het opstellen van een weersverwachting.

Een eerste verwachting van het type onweersbuien kan worden gedaan op basis van CAPE en windschering, en het feit of er dynamische forcering door een front of trog optreedt.

Van alle omgevingsparameters zijn CAPE en de grenslaag-6 km windscheringsvector (BRN shear) het beste gecorreleerd met de bliksemactiviteit. Na een bepaling van CAPE (met vervanging van de onderste meting met de verwachte maximumtemperatuur en dauwpunt en menging van de onderste 50 hPa) kan uit de grafieken globaal een gemiddelde en maximale activiteit worden bepaald. De tabel met gemiddelde en maximale waarden van activiteit bij de verschillende typen onweersbuien en de tijdsduren tot het activiteitsmaximum en van maximum tot het einde van de bliksempductie geeft een goede indicatie voor de activiteit. Als daarbij de relaties tussen bliksemactiviteit en omgevingskenmerken worden beschouwd kan wellicht een betere indicatie verkregen worden. Het maximum kan bij clusters langer aanhouden, met meerdere pieken, terwijl individuele cellen bijna altijd slechts één activiteitspiek vertonen. Met behulp van CAPE kan een indicatie voor de (maximale) relatieve bliksemactiviteit worden verkregen (gemiddeld over de onweersbui). Locaal kan deze hoger zijn. Dit is van belang voor de verwachting van de lokaal waargenomen activiteit. De grootste bliksempductie per oppervlakte-eenheid vindt in de meeste gevallen plaats als de totale bliksemactiviteit van de bui een hoogtepunt bereikt. Als er eenmaal een onweersbui is ontstaan dan is de totale bliksemactiviteit te schatten aan de hand van het aantal pixels of km^2 met een hogere reflectiviteit dan 40 dBZ (of 10 mm h^{-1}). Hogere echotoppen daarbij leiden gemiddeld tot een hogere activiteit. Het tijdsverschil van minder dan 15 minuten tussen de maximale VIL, echotop en de bliksemactiviteitspiek is te kort om bruikbaar te zien in de verwachting. Omdat individuele cellen (los of in een cluster) doorgaans slechts één cyclus vertonen is het waardevol de radar- en bliksemkenmerken van cellen te volgen in de

tijd (in grafiekvorm), zodat snel een overzicht kan worden verkregen welke cellen nog toegenomen zijn in activiteit en welke afnemen. De VIL is een prima parameter gebleken voor het volgen van cellen. De hoogste dichtheid aan ontladingen bevindt zich in de buurt van VIL-kernen en de hoogste echotoppen.

Een voorspelling van het type ontladingen is vooralsnog erg onzeker. Bij een hogere CAPE bestaat een relatief groter deel van de activiteit uit wolkontladingen. Een hoog percentage wolkontladingen (of een lage productie van verticale ontladingen) kan er echter veroorzaakt worden door hoge stijgstroomsnelheden, waardoor de ladingscentra naar grotere hoogten verschuiven (Lang *et al.*, 2000). Hoewel het hier niet systematisch is onderzocht is wel de indruk verkregen dat onweersbuien met relatief veel wolkontladingen en vooral een hoge activiteit vaak zwaar weer (hagel of zware windstoten) voortbrengen, terwijl dat minder het geval lijkt bij onweersbuien die veel (negatieve) verticale ontladingen produceren.

Verder is het (meer anecdotisch) opgevallen dat de onweersbuien met relatief weinig negatieve ontladingen en grote hagelstenen ook een typische structuur hebben: een zware cel aan de zuidkant van een gebiedje met lagere reflectiviteiten, of aan het zuideinde van een lijn. Dit kwam bijvoorbeeld voor op 6 juni 1998, 10 mei 1999, 2 juni 1999, 8 augustus 1999 en 24 september 1999. Dit lijkt iets op de configuratie van een supercell. Bij supercells is de hoek tussen de oriëntatie van het stratiforme neerslaggebied (ook wel Forward Flank Downdraft genoemd) en de trekrichting kleiner is dan bij de onweersbuien van 6 juni 1998, 2 juni en 8 augustus 1999. Een dergelijke configuratie leidt blijkbaar eveneens tot grote stijgsnelheden, getuige de grote hagel, maar is misschien niet gunstig voor het ontstaan van rotatie en tornado's. Het is daarom voor de meteoroloog raadzaam om bedacht te zijn op zware hagel als er dergelijke onweersbuien op de radar verschijnen.

Aanbevelingen

In deze studie zijn er nog andere interessante ideeën opgedoken die hier niet uitgebreid onderzocht konden worden. De volgende zaken zijn interessant voor verder onderzoek:

- De bruikbaarheid van de resultaten van dit onderzoek zou in de weerkamer onderzocht kunnen worden.
- Meer onweersbuien onderzoeken die voorkomen bij hoge CAPE en windschering.

De hier onderzochte onweersbuien kwamen voor in voor Nederland typische waarden van CAPE en windschering. Het zou interessant zijn om dit onderzoek te herhalen in een gebied waar hogere waarden voorkomen. Meestal komen er bij hogere CAPE en windschering uitgebreidere systemen voor, waarin individuele cellen moeilijk afzonderlijk te volgen zijn. Daarom is een aanpak waarin maximale dichtheden van ontladingen gerelateerd worden aan CAPE het beste.

- Bliksemdichtheden (het aantal ontladingen per minuut per km²) onderzoeken en relateren aan bijbehorende radarwaarden op dat punt.

Het is beter om de lokale bliksemdichtheid (aantal ontladingen per minuut per km²) in een onweersbui te vergelijken met de VIL en echotophoogte op dat punt, in plaats van de totale bliksemactiviteit en de relatieve bliksemactiviteit gemiddeld over een cel te vergelijken met een puntwaarneming van VIL en echotoppen, zoals in deze studie gedaan is.

- De bliksemactiviteit tijdens, voor en na het optreden van zware hagel.

De indruk bestaat dat bij zware zomerse hagelbuien met forse hagelstenen de totale bliksemactiviteit erg hoog is en vooral relatief weinig negatieve ontladingen voorkomen, bij normale of verhoogde percentages positieve ontladingen. In de literatuur wordt regelmatig gesproken van onweersbuien met zwaar weer (hagel, tornado's) die gedomineerd werden door positieve ontladingen of wolkontladingen (bijv. Stolzenburg 1994; Lang *et al.* 2000).

- Bliksem(soort)dichtheid in relatie tot stijgende bewegingen zoals door de Doppler-radars afgeleid, eventueel met de verticale reflectiviteitsstructuur.

De relatie tussen stijgstroomsnelheden en bliksemactiviteit kan op die manier beter onderzocht worden. Ook kunnen de mechanismen achter de productie van wolkontladingen, positieve en negatieve verticale ontladingen onderzocht worden. In het meest ideale geval is er een Polarisation Diversity radar beschikbaar die het type hydrometeoren kan bepalen, wat nog meer zal ophelderen over de ladings-scheidingsprocessen van onweersbuien.

Het gebruik van Doppler is ook nuttig voor het onderzoeken van de relaties tussen zware windstoten en secundaire celgroei (Schmid *et al.*, 2000), of microburst en de daarbij voorkomende bliksemactiviteit.

- Zonder Doppler- en Polarisation Diversity radarinformatie kan de bliksemactiviteit (type ontladingen) in relatie tot verticale reflectiviteitsstructuur (met aanvullende informatie over temperatuur en CAPE-verdeling) onderzocht worden.
- Voor operationeel gebruik: automatisch volgen van cellen en data in grafieken uitzetten.

Door automatisch cellen te volgen (niet gemakkelijk te realiseren) kan snel een overzicht kan worden verkregen welke cellen nog toegenomen zijn in activiteit en welke afnemen. De VIL is een prima parameter gebleken voor het volgen van cellen, dus kan deze in relatie tot zijn omgeving waarschijnlijk het beste worden gebruikt om cellen te identificeren en volgen. Als cellen eenmaal te volgen zijn kan het verloop van alle radargegevens (echotoppen, maximale VIL, VIL-weight, maximale reflectiviteit, maximale hoogte 40 dBZ, Dopplergegevens etc.) en bliksemgegevens actueel bijgehouden worden.

- Tijdreeksanalyse van bliksemdata (niet kwartierlijks) per cel en over groot aantal cellen

Statistisch onderzoek naar relaties, trends, periodiciteit, tijd en ruimte tussen opeenvolgende ontladingen, verloop hoogste bliksemdichtheid etc., en dan bijvoorbeeld in twee groepen, hoge en lage CAPE. Hieruit zou mogelijk een real-time statistische extrapolatie van bliksemactiviteit kunnen voortvloeien.

6. Referentielijst

Atkins, N.T., en R.M. Wakimoto, 1991: Wet microburst activity over the Southeastern United States: Implications for forecasting. *Wea. Forecast.*, 6, 470-482.

Bluestein, H.B., en D.R. MacGorman, 1998: Evolution of cloud-to-ground lightning characteristics and storm structure in the Spearman, Texas, tornadic supercells of 31 May 1990. *Mon. Wea. Rev.*, 126, 1451-1467.

Branick, M.L., en C.A. Doswell III, 1992: An observation of the relationship between supercell structure and lightning ground-strike polarity. *Wea. Forecast.*, 7, 143-149.

Changnon, S.A., 1992: Temporal and spatial relations between hail and lightning. *J. Appl. Meteor.*, 31, 587-604.

Engholm, C.D., E.R. Williams, en R.M. Dole, 1990: Meteorological and electrical conditions associated with positive cloud-to-ground lightning. *Mon. Wea. Rev.*, 118, 470-487.

Fuquay, D.M., 1982: Positive cloud-to-ground lightning in summer thunderstorms. *J. Geophys. Res.*, 87, 7131-7140.

Goodman, S.J., D. Buechler, S. Hodanish, D. Sharp, E. Williams, B. Boldi, A. Matlin, en M. Weber, 1999: Total lightning activity associated with tornadic storms. *Proc. 11th Conf. Atm. Electricity*, 515-518.

Houze, R.A., Jr., B.F. Smull, en P. Dodge, 1990: Mesoscale organisation of springtime thunderstorms in Oklahoma. *Mon. Wea. Rev.*, 118, 613-654.

Kane, R.J., 1991: Correlating lightning to severe local storms in the northeastern United States. *Wea. Forecast.*, 6, 3-12.

Keighton, S.J., H.B. Bluestein, en D.R. MacGorman, 1991: The evolution of a severe meso-scale convective system: cloud-to-ground lightning location and storm structure. *Mon. Wea. Rev.*, 119, 1533-1556

Lang, T.J., S.A. Rutledge, J.E. Dye, M. Venticinque, P. Laroche, E. Defer, 2000: Anomalous low negative cloud-to-ground lightning flash rates in intense convective storms observed during STERAO-A. *Mon. Wea. Rev.*, 128, 160-173.

MacGorman, D.R., D.W. Burgess, V. Mazur, W.D. Rust, W.L. Taylor, en B.C. Johnson, 1989: Lightning rates relative to tornadic storm evolution on 22 May 1981. *J. Atmos. Sci.*, 46, 221-250

MacGorman, D.R. en D.W. Burgess, 1994: Positive cloud-to-ground lightning in tornadic storms and hailstorms. *Mon. Wea. Rev.*, 122, 1671-1697.

MacGorman, D.R. en W.D. Rust, 1998: *The Electrical Nature of Storms*. Oxford University Press, New York, 422 pp.

Markowski, P.M. en J.M. Straka, 2000: Some observations of rotating updrafts in a low-buoyancy, highly sheared environment. *Mon. Wea. Rev.*, 128, 449-461.

Nielsen, K.E., R.A. Maddox, en S.V. Vasiloff, 1994: The evolution of cloud-to-ground lightning within a portion of the 10-11 June 1985 squall line. *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 1809-1817.

Perez, A.H., L.J. Wicker, en R.E. Orville, 1997: Characteristics of cloud-to-ground lightning associated with violent tornadoes. *Wea. Forecast.*, **12**, 428-437.

Rasmussen, E.N., en D.O. Blanchard, 1998: A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters. *Wea. Forecast.*, **13**, 1148-1164.

Richard, P., 1992: Application of atmospheric discharges localisation to thunderstorm nowcasting. *Proc. WMO Tech. Conf. Instruments and Methods of Observation*, World Meteor. Org.

Rutledge, S.A., C. Lu, en D.R. MacGorman, 1990: Positive cloud-to-ground lightning in mesoscale convective systems. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 2085-2100.

Rutledge, S.A., en W.A. Petersen, 1994: Vertical radar reflectivity structure and cloud-to-ground lightning in the stratiform region of MCS's: Further evidence for in-situ charging in the stratiform region. *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 1760-1776.

Schmid, W., H.H. Schiesser, M. Furger, en M. Jenni, 2000: The origin of severe winds in a tornadic bow-echo storm over Northern Switzerland. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 192-207.

Stolzenburg, M., 1994: Observations of high ground flash densities of positive lightning in summertime thunderstorms. *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 1740-1750.

Watson, A.I., R.L. Holle en R.E. López, 1995: Lightning from two national detection networks related to vertically integrated liquid and echo-top information from WSR-88D radar. *Wea. Forecast.*, **10**, 592-605.

Weisman, M.R., en J.B. Klemp, 1982: The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy. *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 504-520.

Wessels, H.R.A., 1998: Evaluation of a radio interferometry lightning positioning system. *KNMI Scientific Report 98-04*.

Williams, E.R., M.E. Weber, en R.E. Orville, 1989: The relationship between lightning type and convective state of thunderclouds. *J. Geophys. Res.*, **94**, 13,213-13,220

7. Bijlage

Synoptische situatie en het type onweersbuien

6 juni 1998

Synoptisch:

Een depressie ligt bij Ierland op de oceaan. Het warmtefront is tegen de avond van de 5de over Nederland naar het noorden getrokken. Daarachter is de stroming zuidwestelijk, erg vochtig en onstabiel en er is vrij veel windschering. In de ochtend van de 6de komt dichte mist voor. Een trog met onweerscomplexen trekt vanuit Noord-Frankrijk naar het noordoosten weg, in de middag gevolgd door een tweede onweersstoring. Daarvooruit is het broeierig en bereikt het kwik nog 25-26 graden.

Type onweersbuien:

Actieve mesoschaal convectieve systemen (die mogelijk voldoen aan de criteria voor een Mesoschaal Convectief Complex [MCC]). De ochtendcomplexen hebben relatief veel negatieve wolk-aarde ontladingen. In de middag enkele complexen met zware hagel en zeer hoge activiteit. Het noordelijke complex lijkt op het conceptuele model van een asymmetrisch MCS (Houze *et al.*, 1990). Het zuidende daarvan is bijzonder actief, met relatief veel wolkontladingen, en produceert hagelstenen van rond 10 cm grootte. Het noordelijk deel heeft relatief meer negatieve ontladingen. Opvallend is dat in de stratiforme gebieden van de complexen volgens het SAFIR-systeem zelden positieve ontladingen worden waargenomen. Wel zijn er enkele wolkontladingen. Zie de figuur 68 op de volgende pagina.

2 juni 1999

Synoptisch:

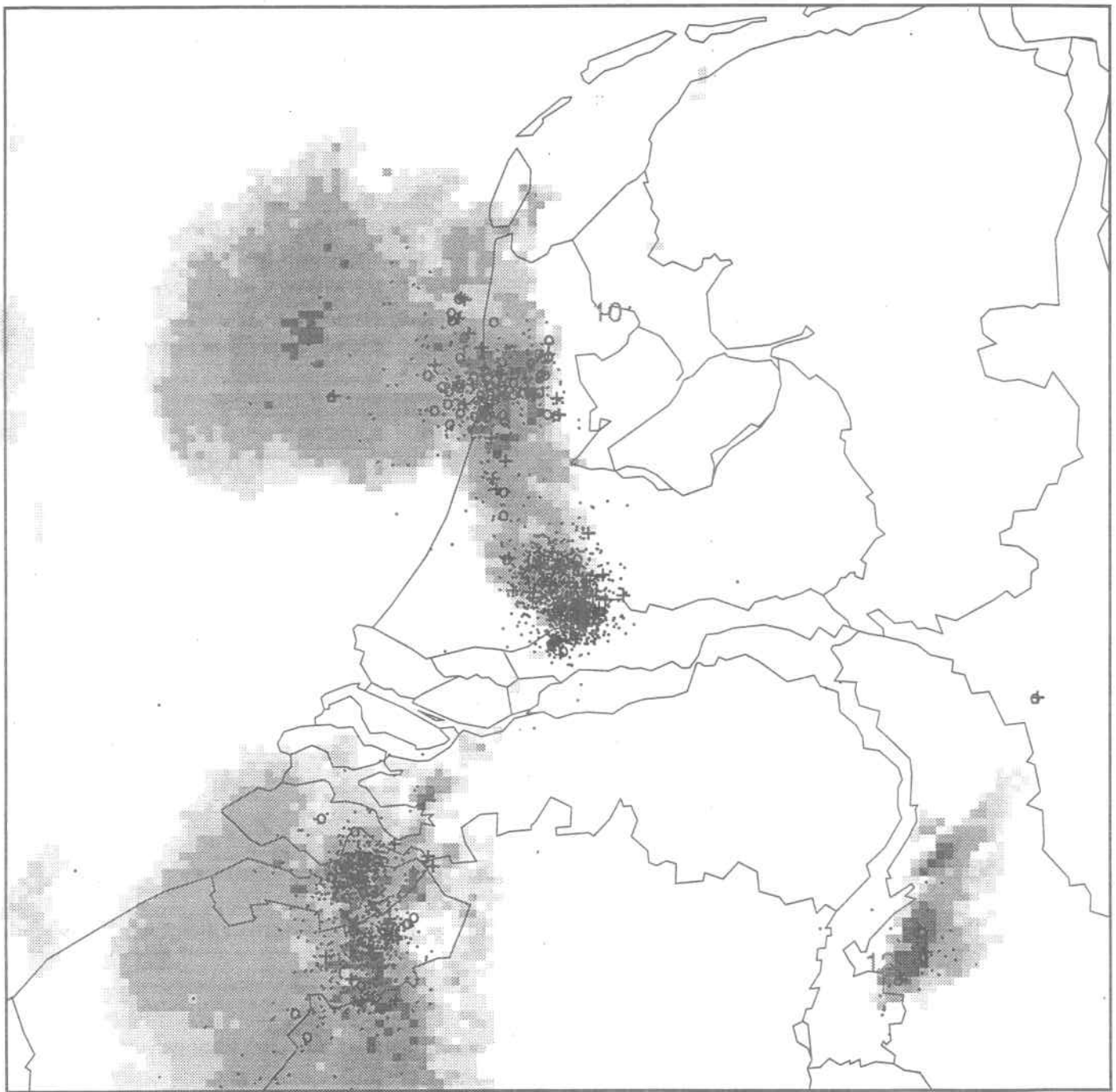
Een depressie trekt van Bretagne naar de Noordzee. 's Ochtends komt het warmtefront over, daarna ligt Nederland in een stukje warme sector met temperaturen van 25-27 graden, in de late middag gevolgd door het koufront met verspreid wat onweersbuien.

Type onweersbuien:

Op het warmtefront 's ochtends ingebedde onweersbuien met relatief veel negatieve verticale ontladingen, in lijnvormige neerslagpatronen. In de warme sector in het oosten en zuidoosten actieve clusters met veel wolkontladingen. Deze veroorzaken lokaal wind- en hagelschade. Aan het eind van de middag op het koufront zware lijnvormige convectie en losse cellen. Een uitgebreide beschrijving van deze situatie is te vinden in hoofdstuk 3.3.

Figuur 68. Een asymmetrisch MCS op 6 juni 1998, waarbij het noordelijk deel relatief veel negatieve ontladingen produceert en het zuidelijk deel (veel actiever) relatief veel wolkontladingen en positieve ontladingen.

SAFIR CG + IC Reflectivity 980606 15:30 UTC



Plotted: 2398 intracloud(.) 146 negative cloud-to-ground(o) 85 positive cloud-to-ground(+)
in a time span of 15 min centered on radar time

Percentage: 8.8 % cloud-to-ground 3.2 % positive from a total of 2629 strokes



-9 -1 7 15 23 31 39 47 55 63 71 79 87 95 103 111

7 juni 1999

Synoptisch:

Een lagedrukgebied is in de nacht van Zuid-Engeland opvullend naar de Noordzee getrokken. In de bovenlucht bleef een koude put hangen. De lucht is vrij vochtig over een diepe laag. Het werd gemiddeld 19 graden.

Type onweersbuien:

Clusters voornamelijk in lijnvorm, waarbij de actiefste cellen ontstaan op de aansluitingen tussen twee lijnstukken.

7 juli 1999

Synoptisch:

Nederland bevindt zich aan de noordoostflank van een hogedrukgebied bij Bretagne in een zwakke westnoordweststroming. Een zwak koufront ligt op de Noordzee en boven Engeland hangt jetcirrus. De maximumtemperaturen lagen rond de 22-23 graden.

Type onweersbuien:

Eerst een losse cel, waarna deze situatie overgaat in een lijn met een actieve cel. Vermoedelijk is er sprake van een zeewindeffect. De cellen trekken erg langzaam. Een uitgebreide beschrijving van deze situatie is te vinden in hoofdstuk 3.1.

19 juli 1999

Synoptisch:

In de vroege morgen trekt een storing naar het noorden met wat onweer. Met een krachtige weststroming trekt een koufront in de middag over Nederland, behorend bij een kleine depressie die om 00 UTC ten westen van Schotland lag. Voor het onweer werd het nog 28-29 graden. In de hogere troposfeer staat er relatief weinig wind.

Type onweersbuien:

Losse cellen met verder naar het oosten en zuiden flinke clusters.

8 augustus 1999

Synoptisch:

Een ongeveer oost-west georiënteerd geoccludeerd front behorend bij een depressie ten westen van Bretagne trekt langzaam over Nederland naar het noorden. Aan de zuidzijde daarvan ontwikkelen zich enkele onweersbuien in de lagedrukvore. De temperaturen komen tot 22 graden.

Type onweersbuien:

Actieve cluster overgaand in lijn met zware cellen. Daarbij komen zware hagel en relatief veel wolkontladingen voor. Gemiddeld zijn er meer positieve dan negatieve ontladingen.

25/26 augustus 1999, avond en nacht

Synoptisch:

Met een zuidelijke stroming worden in de middag van de 25ste temperaturen van 26-29 graden bereikt. In de nacht trekt een actief koufront van een depressie bij Schotland over Nederland. Aan de warme zijde vlak voor het front ontstaan zware onweersbuien. Op veel plaatsen is het voor het onweer broeierig met 23-25 graden.

Type onweersbuien:

Zeer actief complex (klein MCS), gevolgd door chaotisch geclusterde onweersbuien die relatief veel negatieve ontladingen hebben. Een uitgebreide beschrijving van deze situatie is te vinden in hoofdstuk 3.2.

26 augustus 1999, middag

Synoptisch:

Na het nachtelijk gepasseerde koufront wordt met een westelijke stroming vochtige lucht aangevoerd met maxima tot ongeveer 25 graden.

Type onweersbuien:

Enkele buienclusters die in een lijnvorm rangschikken. In Limburg/Duitsland een actieve cluster.

6 september 1999

Synoptisch:

Een onweersstoring trekt vanuit Frankrijk naar het noordoosten. In de middag worden temperaturen tot 26 graden gehaald. Er is weinig windschering.

Type onweersbuien:

Een paar losse cellen en een stationaire lijn met cellen die lang boven een plaats actief blijven. Dit zorgde voor wateroverlast in Oosterhout (NB) waar 95 mm viel. Ook is hagel waargenomen.

15 september 1999

Synoptisch:

Nederland bevindt zich in de warme sector van een depressie met het occlusiepunt bij de Engelse kust. Een warmtefront strekt zich naar het noorden toe uit, terwijl het brede koufront in de loop van de middag vanuit het zuiden over Nederland trekt. Het wordt 21 graden, in het noordoosten nog 24 graden.

Type onweersbuien:

Een actieve cluster aan de noordoostkant van het koufront met veel wolk-aarde ontladingen. Daarachter volgen nog enkele clusters in het noordoosten van Nederland.

24 september 1999

Synoptisch:

Rondom een depressie bij Schotland met de resten van tropische cyloon Floyd wordt met een strakke zuidweststroming warme, vochtige lucht aangevoerd waarin enkele storingen voorkomen. Een koude put boven Engeland en het warme zeewater dragen verder bij aan de onstabiele. De bovenlucht is vrij droog en de windschering is vrij groot ten opzichte van de onstabiele. Er is ook veel heliceit ($250 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$) ten opzichte van de bui.

De temperaturen zijn 's middags gemiddeld rond de 21 graden.

Type onweersbuien:

's Middags enkele losse en geclusterde cellen met relatief veel wolkontladingen. De cellen hebben zeer hoge reflectiviteiten (>55 of 63 dBZ) en hun structuur (sterke echo overhang, kern aan zuidwesteinde) en waarnemingen ervan (tuba's onder regenvrije wolkenbasis) doen vermoeden dat het hier om mini-supercells gaat (zie bijv. Markowski en Straka, 2000). De bliksemactiviteit bestaat gedurende hun gehele levensloop voor het overgrote deel uit wolkontladingen.

's Avonds passeert een actieve brede buienlijn eindigend met duidelijk relatief veel positieve ontladingen.

