

Numerieke weersverwachtingen

Gerard Cats

Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut

1 april 2008

1 Inleiding

De weersverwachting is een belangrijke sturende factor bij vele activiteiten in onze maatschappij, zoals luchtverkeer, weg- en waterverkeer, dijkbewaking, de planning van gas- en electriciteitsproductie, polderbemaling, luchtkwaliteit, toerisme en landbouw. Numerieke methoden spelen een grote rol bij de totstandkoming van de weersverwachting. De bewegingsvergelijkingen van de atmosfeer worden numeriek opgelost om weersverwachtingen tot enkele weken vooruit te maken. Er bestaan mondiale en regionale modellen. Het KNMI draait het HIRLAM numerieke systeem voor regionale verwachtingen tot twee dagen vooruit. De horizontale resolutie daarvan is circa 10 km. Onderzoek richt zich vooral op verder verbetering van het HIRLAM systeem, waarbij veel aandacht nu uitgaat naar het ontwikkelen van methoden om niet alleen het weer, maar ook de betrouwbaarheid van de verwachting te verwachten. In samenwerking met het LIACS wordt gewerkt aan optimalisatie van het computergebruik. Daarnaast draagt het KNMI bij aan de ontwikkeling van HARMONIE, dat de opvolger van HIRLAM moet worden. HARMONIE zal gaan draaien op een resolutie van circa 2 km. Naast het gebruik voor weersverwachtingen worden deze modellen ook gebruikt om in te schatten wat de regionale effecten zijn van klimaatveranderingen.

2 De numerieke methode

In principe voldoet de atmosferische stroming aan een aantal partiële differentiaalvergelijkingen (zie *Intermezzo*.) De vergelijkingen in het *Intermezzo* bevatten een aantal benaderingen. Zo is de atmosfeer niet-samendrukbaar verondersteld. Daardoor kunnen er geen geluidsgolven ontstaan. Verticale snelheden zijn mogelijk, maar de hydrostatische vergelijking veronderstelt

dat de krachten die nodig zijn om ze op te wekken verwaarloosbaar zijn: er zijn geen verticale versnellingen.

De vergelijkingen beschrijven een beginwaardeprobleem: als de beginsituatie bekend is kan de tijdsafgeleide aan het begin worden berekend. De vergelijkingen worden op standaard wijze opgelost. Eerst worden ze gediscrètiseerd naar een rooster in ruimte en tijd. Een stabiliteitsanalyse laat dan zien dat de vergelijkingen voorwaarts in de tijd kunnen worden opgelost, met een zeer kleine tijdstap. Zo heeft het HIRLAM systeem, met zijn resolutie van 10 km, een maximale tijdstap van 30 s. Dat is veel kleiner dan de tijdschaal waarop de meteorologische systemen zich ontwikkelen. Uit de stabiliteitsanalyse blijkt dat de zogenaamde zwaartekrachtsgolven verantwoordelijk zijn voor die beperking van de tijdstap. Dat zijn golven die worden veroorzaakt door dichtheidsverschillen; ze komen ook voor aan wateroppervlakken. Door deze golven uit te filteren, en door het gebruik van slimme discretisatieschema's is het mogelijk de tijdstap te vergroten tot circa 5 minuten. Omdat het model dan minder tijdstappen hoeft door te rekenen wordt het een stuk efficiënter.

De vergelijkingen in het *Intermezzo* beschrijven de situatie niet compleet. Om te beginnen zou je ze moeten oplossen met een zeer hoge ruimtelijke resolutie, met ongeveer een horizontale en verticale roosterpuntsafstand van 1 mm. Dat ligt een factor 10^{24} af van wat computers heden ten dage aankunnen. We mogen er wel van uitgaan dat wij de vereiste computercapaciteit niet zullen meemaken. Bovendien, waar haal je de begintoestand op een dergelijke resolutie vandaan? We lossen dit probleem op door de vergelijkingen te middelen over volumes; bij HIRLAM dus van 10 km bij 10 km. De vergelijkingen zijn echter niet-lineair. Daarom ontstaan er bij dat middelingsproces kruistermen. Eén van de effecten van die kruistermen is turbulentie, de vlaggerigheid van de wind, waardoor impuls vanuit de atmosfeer aan de aarde overgedragen kan worden, en omgekeerd, warmte en vocht vanuit de aarde aan de atmosfeer. Deze turbulentie moet geparametriseerd worden. Dat wil zeggen dat de veranderingen die turbulentie, zelf een verschijnsel op kleine schaal, teweeg brengt op de volume-gemiddelde grootheden, worden uitgedrukt in die volume-gemiddelde grootheden.

Verder moeten de vergelijkingen in het *Intermezzo* worden aangevuld met brontermen. Zo moeten de volgende processen worden beschreven:

- *straling*. Zonnestraling, maar ook langgolvlige straling (σT^4); dit alles hangt sterk af van bewolking. Straling is een bronterm voor de temperatuur.
- *fase-overgangen*. Condensatie leidt tenslotte tot het belangrijke fenomeen

Intermezzo: De vergelijkingen voor de atmosferische stroming

Het HIRLAM systeem lost de behoudswetten voor de atmosfeer op. Het is gedefinieerd in een driedimensionaal (x, y, η) bolcoördinaatsysteem, waarbij de verticale coördinaat η bij de grond de hoogtelijnen volgt, en op grote hoogte langzaam overgaat in een drukcoördinaat. De vergelijkingen zijn:

- de *impulsvergelijking* voor de verandering van de horizontale wind:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} &= (f + \xi) \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \mathbf{V} - \dot{\eta} \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \eta} \\ &\quad - \frac{1}{\mathbf{h}} \left(R_d T_v \nabla \ln p - \nabla (\Phi + \frac{1}{2}(u^2 + v^2)) \right) \end{aligned} \quad (1)$$

- de *thermodynamische vergelijking*, gebaseerd op de wet van behoud van energie, voor de verandering van de temperatuur T :

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} &= -\frac{u}{ah_x} \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{v}{ah_y} \frac{\partial T}{\partial y} - \dot{\eta} \frac{\partial T}{\partial \eta} \\ &\quad + \frac{\kappa T_v \left(\int_{\eta}^1 \nabla \cdot \left(\mathbf{V} \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) d\eta + \mathbf{V} \cdot \nabla p - \int_0^1 \nabla \cdot \left(\mathbf{V} \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) d\eta \right)}{(1 + (\delta - 1)q)p} \end{aligned} \quad (2)$$

- de *vochtvergelijking* voor het behoud van vocht in de atmosfeer, q :

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\frac{u}{ah_x} \frac{\partial q}{\partial x} - \frac{v}{ah_y} \frac{\partial q}{\partial y} - \dot{\eta} \frac{\partial q}{\partial \eta} \quad (3)$$

- de *hydrostatische vergelijking*, die de geopotential, oftewel de potentiële energie in van het zwaartekrachtsveld definiëert:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \eta} = -\frac{R_d T_v}{p} \frac{\partial p}{\partial \eta} \quad (4)$$

- de *continuïteitsvergelijking* voor het behoud van de (droge) massa van de lucht:

$$\frac{\partial}{\partial \eta} \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\mathbf{V} \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\dot{\eta} \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) = 0 \quad (5)$$

In deze vergelijkingen is $\mathbf{V} = \begin{pmatrix} u, v \end{pmatrix}^T$ de horizontale wind vector, p de druk, f de Coriolis (schijn)kracht, ξ is de “vorticititeit”, $\xi = \frac{1}{ah_x ah_y} \left(\frac{\partial(h_y v)}{\partial x} - \frac{\partial(h_x u)}{\partial y} \right)$, $T_v = (1 + (R_v/R_d - 1)q)T$ de virtuele temperatuur, en zijn $R_d = 287.04 \text{ J/kg/K}$, $R_v = 461.51 \text{ J/kg/K}$ de gasconstanten voor droge respectievelijk natte lucht. $\mathbf{h} = \begin{pmatrix} ah_x, ah_y \end{pmatrix}^T$ is de vector van coëfficiënten die het bolcoördinaatsysteem beschrijven (a is de aardstraal), en ∇ is de operator voor de horizontale gradiënt.

meen van neerslag. Maar er komen ook zaken bij kijken als de groei van druppeltjes in een atmosfeer met waterdamp, dus wolkenvorming.

- *oppervlakte processen*. De zee en de aarde brengen vocht en warmte in de atmosfeer, of halen het er juist uit. Op begroeid land regelt de vegetatie via de huidmondjes de verdamping, afhankelijk van bijvoorbeeld de hoeveelheid vocht in de bodem op worteldiepte; die hoeveelheid hangt weer af van bijvoorbeeld de hoeveelheid neerslag in de afgelopen periode. Er moet ook rekening worden gehouden met de toestand van het gewas: de oogst heeft grote invloed op verdamping en ruwheid. In stedelijke gebieden wordt onder andere rekening gehouden met het stookgedrag.
- *chemische reacties*. Voor stralingseigenschappen van de atmosfeer worden in sommige modellen de vorming en verwijdering van ozon bijgehouden.

Al met al zitten er in een numeriek verwachtingsmodel veel afhankelijkheden en terugkoppelingsmechanismen.

3 Beginwaarden en onzekerheden

De vergelijkingen beschrijven dus een beginwaardeprobleem. Om dat te kunnen oplossen moet de begintoestand van de atmosfeer worden beschreven. Dat gebeurt op basis van waarnemingen. Naast klassieke waarneemsystemen spelen satellieten een zeer belangrijke rol, met name boven de oceanen.

Figuur (1) geeft een voorbeeld van satellietopnamen. De ASCAT waarnemingen berusten op De Broglie verstrooiing van radargolven aan 4 cm watergolven. De amplitude en richting van de golven geven informatie over de windsnelheid en -richting, maar helaas niet uniek. Daarom zijn er heel wat bewerkingsslagen nodig voordat de waarnemingen vertaald zijn naar een begintoestand van de atmosfeer. Een belangrijke tak van meteorologisch onderzoek richt zich dan ook op het gebruik van waarnemingen.

Omdat de vergelijkingen niet-lineair zijn worden verstoringen in de begincondities snel versterkt. Het is daarom niet mogelijk om verwachtingen meer dan een dag of 14 vooruit te maken. Door verbeterd gebruik van waarnemingen, meer waarnemingen en modelverbeteringen kan deze termijn nog maar weinig worden opgerekt. De gevolgen van de onzekerheid in de begintoestand manifesteren zich soms al op veel kortere termijn. Een veelgebruikte techniek om die gevolgen te kwantificeren is het herhaald draaien van het model, met steeds iets verstoorde beginvoorwaarden. Omdat dit erg veel

rekentijd vraagt worden de verstoringen van de begintoestand zorgvuldig gekozen. Bovendien wordt het model in het algemeen op een lagere resolutie gedraaid. Op deze manier ontstaat een ensemble van verwachtingen. In plaats van deterministische verwachtingen verkrijgt men zo kansverwachtingen. Een voorbeeld is te zien in Figuur (2).

4 Hoge resolutie

Niet alleen de beginwaarden, maar ook de benaderingen die gemaakt zijn om de bewegingsvergelijkingen op te lossen, veroorzaken fouten in de uiteindelijke verwachting. Er vindt dan ook veel onderzoek plaats naar modelverbeteringen. Voor de hand ligt altijd om de roosterpuntsafstand te verkleinen. Bij de roosterpuntsafstand van HIRLAM, 10 km, gedraagt de turbulentie in de atmosfeer zich nog tweedimensionaal, omdat de dikte van de atmosfeer effectief 10 km is. Bij kleinere roosterpuntsafstand echter gaat de turbulentie zich driedimensionaal gedragen. Zo geldt de hydrostatische vergelijking niet meer, omdat de verticale versnellingen groot kunnen worden. Om toch op hogere resolutie te kunnen rekenen is dus een nieuw model nodig. In samenwerking met een groot aantal Europese landen ontwikkelt het KNMI daarom het HARMONIE systeem. De bedoeling is dat dit systeem een roosterpuntsafstand van circa 2 km gaat krijgen. Een voorbeeld van een recente verwachting met een experimentele versie staat in Figuur (3).

5 Onderzoek in Leiden

Hierboven zijn al een paar onderzoeksgebieden genoemd, te weten verbetering van het gebruik van waarnemingen, kansverwachtingen en hogere resolutie. Met name aan het onderzoek naar hogere resolutie draagt het Leiden Institute of Advanced Computer Science (LIACS) bij. Uitdagingen liggen op de volgende gebieden:

- de *reken snelheid*. Voor hogere resolutie is meer rekenkracht nodig. Kan het model zo worden ingericht dat het optimaal gebruik maakt van supercomputers?
- de *randen*. De resolutiesprong tussen HIRLAM en HARMONIE is groot, een factor 5 in de twee horizontale richtingen, en daarmee ook in de tijdstap. Omdat computers niet snel een factor 125 sneller zullen worden moet het rekengebied worden verkleind. In Figuur (3) is al goed te

zien dat de randen van het domein dicht bij Nederland liggen. Daarom is het belangrijk de behandeling van de randen van het domein te verbeteren.

- *codegeneratie*. Met codegeneratie is het mogelijk Fortran programma's automatisch geschreven te laten worden. Bij sommige van de ontwikkelingen om supercomputers optimaal te gebruiken, of de randen goed te beschrijven, is de programmatuur zo ingewikkeld dat codegeneratie eigenlijk vereist is om goed werkende en onderhoudbare programma's te verkrijgen.

6 Meer informatie op internet

Over numerieke weersverwachtingen:

http://en.wikipedia.org/wiki/Numerical_weather_prediction

Over HIRLAM: <http://www.hirlam.org>

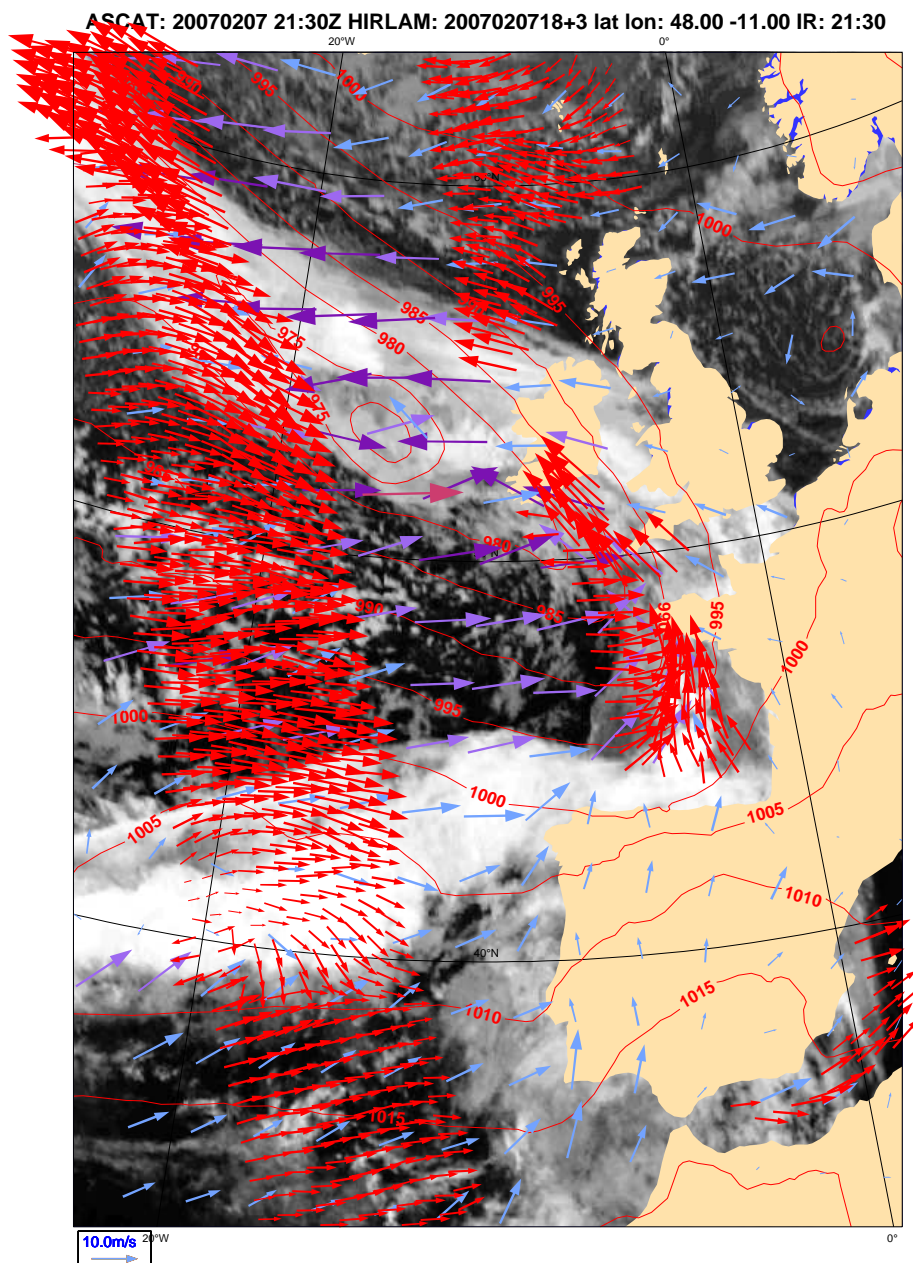
Over codegeneratie: <http://www.cs.fsu.edu/~engelen/ctadel/report.html>

Over het KNMI: <http://www.knmi.nl>

Over het LIACS: <http://www.liacs.nl>

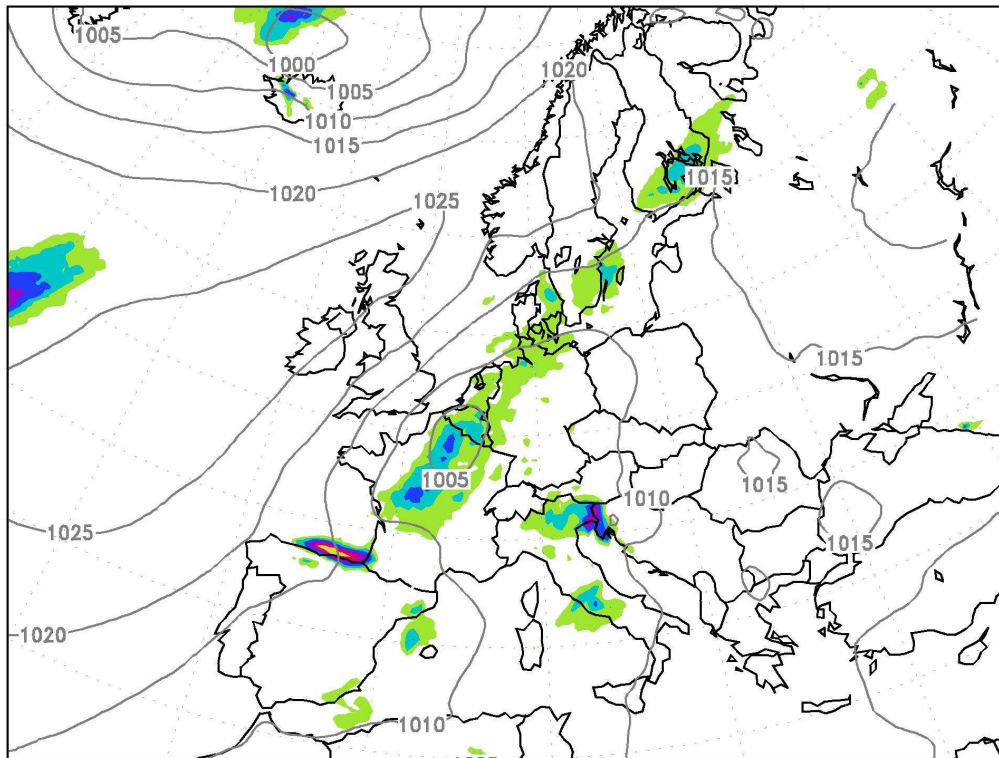
7 Auteur

Gerard Cats is senior onderzoeker bij het KNMI. Zijn specialisme ligt op het gebied van numerieke verwachtingssystemen, aanvankelijk in het gebruik van waarnemingen; later werd dat de optimalisatie van computergebruik.



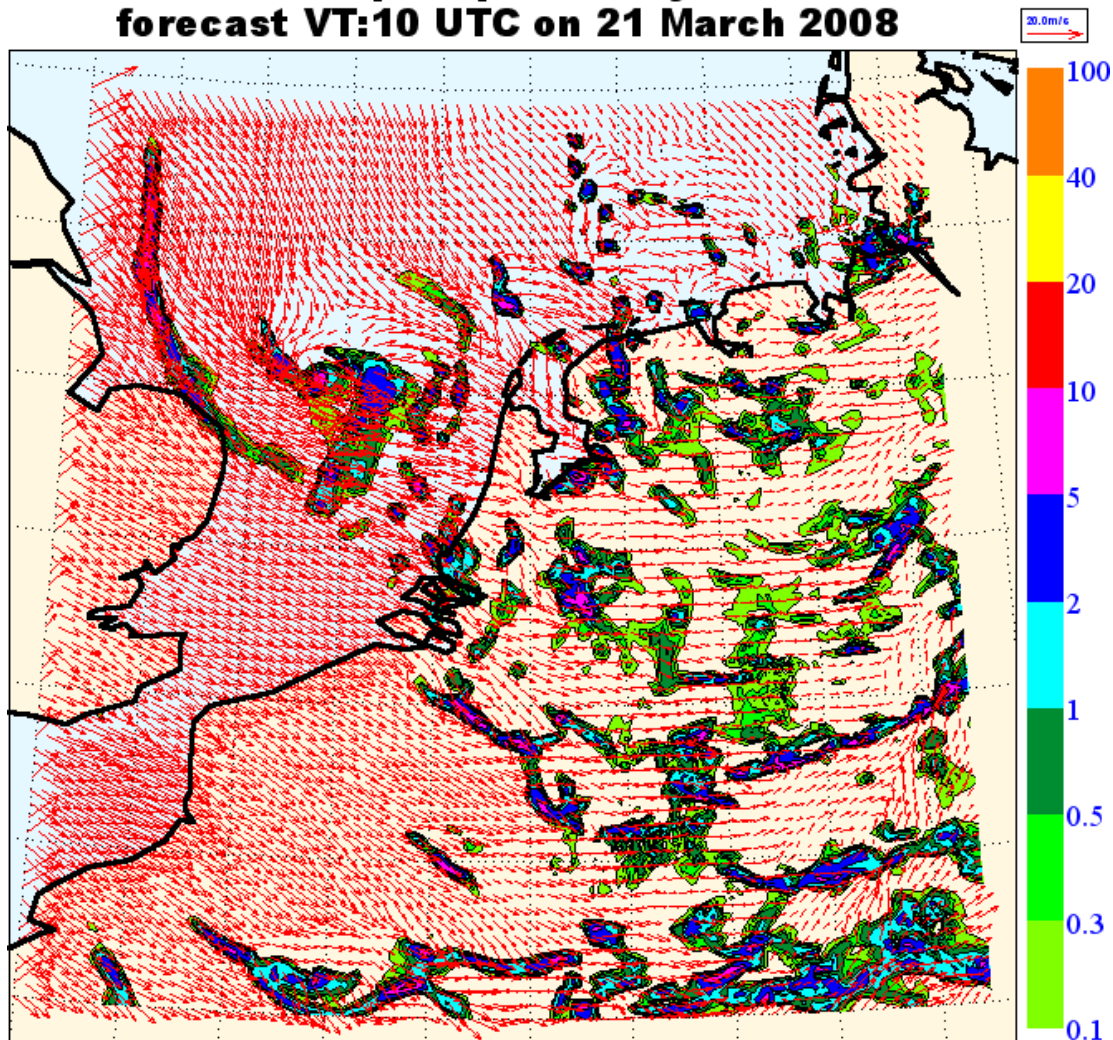
Figuur 1: ASCAT windwaarnemingen op de Atlantische Oceaan op 7 februari 2007, rond 21 uur UTC (rode pijlen). ASCAT is het Europese scatterometer instrument op MetOp, een satelliet van EUMETSAT. De satelliet geeft een windvector per 25 km, maar slechts de helft wordt hier getoond. Blauwe en paarse pijlen tonen de 3-uurs verwachting met HIRLAM. Op de achtergrond staat in zwart/wit een infrarood foto vanuit METEOSAT, de Europese geostationaire weersatelliet.

2007082012+048h: P[precip>5. mm]



Figuur 2: De verwachte kans dat er volgens een ensemble van HIRLAM verwachtingen meer dan 5 mm neerslag valt binnen 6 uur voor een geval in augustus 2007. De originele HIRLAM run gaf geen neerslag in de buurt van Helsinki; het ensemble laat echter zien dat er daar een redelijke kans op neerslag is. Er zijn inderdaad buien geweest in het zuiden van Finland.

HARMONIE t+10 precip intensity and 10m-wind forecast VT:10 UTC on 21 March 2008



Figuur 3: Verwachting van neerslag en wind met HARMONIE, met een roosterpuntsafstand van 2 km. Boven de Noordzee ligt een storing, waarvan de horizontale afmetingen zo klein zijn dat de storing niet terug te vinden was in de overeenkomstige verwachting met HIRLAM (roosterpuntsafstand 10 km). In het bijzonder de krachtige westenwind ten zuiden van de storing veroorzaakte overlast in de haven van Rotterdam. Ook uit satellietfoto's bleek de aanwezigheid van de storing. Boven het vasteland zijn vele kleine buitjes te zien. Door de aard van de bijbehorende instabiliteiten is het onmogelijk deze buien op de juiste plaats en tijd te verwachten. De verwachting moet daarom voor zulke kleine systemen nog steeds geformuleerd worden in termen als “hier en daar een bui”.