

Handmatig aanpassen van een numerieke weersanalyse

Wim Verkley (KNMI)

Het bewaken van weersontwikkelingen zal, in weerwil van de voortschrijdende automatisering van het weersvoorspelproces, een belangrijke taak blijven van de operationeel meteoroloog. Het vervullen van deze taak vereist actuele gegevens over de toestand van de atmosfeer, meteorologische kennis om die gegevens op waarde te schatten, en de mogelijkheid om in te grijpen als die gegevens daartoe aanleiding geven. Dit artikel beschrijft een methode waarmee kan worden ingegrepen in een numerieke weersanalyse. De vraag onder welke omstandigheden een dergelijke ingreep verantwoord is, wordt slechts zijdelings aangestipt; de nadruk ligt op de methode van het ingrijpen zelf.

Waterdamp satellietbeelden

Waterdamp satellietbeelden maken een belangrijk deel uit van de gegevens die de operationeel meteoroloog ter beschikking staan bij het bewaken van weersontwikkelingen. Waterdamp satellietbeelden geven de intensiteit weer van de elektromagnetische straling in het waterdampkanaal. De stralingsintensiteit wordt uitgedrukt in de temperatuur die een zwart lichaam zou hebben dat in het gegeven frequentiegebied dezelfde stralingsintensiteit genereert, en wordt in het satellietbeeld weergegeven met behulp van grijs tinten. Hoge stralingstemperaturen worden weergegeven met donkere grijs tinten en lage stralingstemperaturen met lichte grijs tinten.

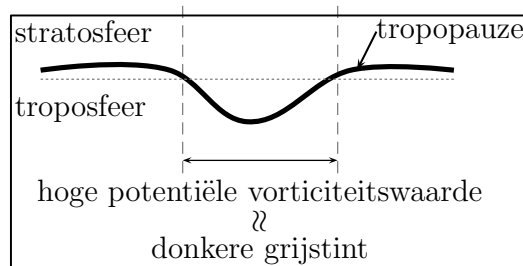
Een eenvoudige interpretatie van waterdamp satellietbeelden is de 'topografische interpretatie'. Hierbij wordt aangenomen dat zich overal in de troposfeer waterdamp bevindt, dat de stratosfeer en de luchtlagen daarboven volledig droog zijn, en dat in het frequentiegebied van het waterdampkanaal de waterdamp zich als een perfect zwart lichaam gedraagt. Onder deze aannamen wordt de straling afkomstig van het land- of zeeoppervlak en van de luchtlagen beneden de tropopauze door de luchtlagen erboven volledig geabsorbeerd, en ontvangt de satelliet alleen de straling die afkomstig is van de tropopauze. In deze interpretatie is de stralingstemperatuur gelijk aan de temperatuur van de tropopauze en daarbij geldt ook, daar in de troposfeer de temperatuur afneemt met de hoogte, dat een lage stralingstemperatuur overeenkomt met een hoge tropopauze, en vice versa. Een donkere (lichte) grijs tint in een waterdamp satellietbeeld wijst dus op een lage (hoge) tropopauze. De topografische interpretatie zoals hier beschreven is een iets verder doorgevoerde vereenvoudiging van de gelijknamige interpretatie uit Weldon and Holmes (1991).

Potentiële vorticeiteit

De tropopauze wordt gekenmerkt door een grote sprong in de potentiële vorticeiteit. Gaande van troposfeer naar stratosfeer is deze sprong van lage naar hoge waarden en zit tussen de 1 en 3 PVU (1 PVU is gelijk aan $10^{-6} \text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{Kkg}^{-1}$). Het oppervlak waarop de potentiële vorticeiteit gelijk is aan 2 PVU wordt de dynamische tropopauze genoemd en is op gematigde breedten een goede benadering van de thermische tropopauze. Potentiële vorticeiteit is, net als potentiële temperatuur en specifieke vochtigheid, onder

bepaalde voorwaarden een materieel behouden grootheid die kan worden gebruikt om weersontwikkelingen te volgen in de tijd. Als we potentiële temperatuur beschouwen op een oppervlak van constante potentiële vorticeit, waarbij de waarde gelijk is aan 2 PVU, volgen we de ontwikkelingen in de dynamische tropopauze. Hier kiezen we ervoor om de potentiële vorticeit te beschouwen op een quasi-horizontaal isentroop oppervlak van constante potentiële temperatuur.

Zien we op een isentroop oppervlak een gebied met relatief hoge (lage) waarden van de potentiële vorticeit dan kunnen we zeggen dat in dit gebied de tropopauze laag (hoog) ligt omdat, zoals hierboven opgemerkt, de potentiële vorticeit toeneemt met de hoogte. Uitgaande van de topografische interpretatie van waterdamp satellietbeelden, waarin grijstinten worden geïnterpreteerd als tropopauzehoogten, volgt dat er tussen waterdamp satellietbeelden en velden van potentiële vorticeit een verband moet bestaan: donkere grijstint - lage tropopauze - hoge waarde van de potentiële vorticeit op een isentroop oppervlak, en omgekeerd. Het verband wordt schematisch voorgesteld door figuur 1.



Figuur 1. Schematische verticale doorsnede van de atmosfeer die het verband laat zien tussen de grijstint in een waterdamp satellietbeeld en de potentiële vorticeit op een isentroop oppervlak. Een lokaal verlaagde tropopauze geeft, omdat in de troposfeer de temperatuur afneemt met de hoogte, een relatief hoge stralingstemperatuur en daarmee een donkere grijstint in een waterdamp satellietbeeld. Tegelijkertijd gaat een lokaal verlaagde tropopauze samen met een relatief hoge waarde van de potentiële vorticeit op een quasi-horizontaal isentroop oppervlak als gevolg van het feit dat de potentiële vorticeit toeneemt met de hoogte.

Op waterdamp satellietbeelden zijn allerlei structuren te zien, waaronder langgerekte scherpe overgangen tussen lichte en donkere grijstinten. Deze situatie doet zich voor bij straalstromen. Het genoemde verband suggereert dat dergelijke scherpe overgangen het resultaat zijn van een sterk hellende tropopauze en in een potentieel vorticeitsveld te zien zouden moeten zijn als langgerekte scherpe overgangen tussen hoge en lage waarden. Op vergelijkbare wijze zouden geïsoleerde donkere gebiedjes in een waterdamp satellietbeeld, te zien bij wervels, moeten corresponderen met geïsoleerde gebiedjes met hoge waarden van de potentiële vorticeit.

Bewaken van analyses

Enige voorzichtigheid bij de topografische interpretatie van waterdamp satellietbeelden is wel geboden omdat het verband tussen waterdamp satellietbeelden en potentiële vorticeit in werkelijkheid complexer is dan de schematische voorstelling in figuur 1. Helwitte vlekken in het waterdampbeeld zijn bijvoorbeeld het gevolg van hoge bewolking en niet van een extreem hoge tropopauze. Met inachtneming van de nodige voorzichtigheid kan het verband dat in figuur 1 is geschetst, worden gebruikt om fouten in een analyse op te sporen. Een scherpe lichtdonker overgang in het satellietbeeld die niet samenvalt met een scherpe gradiënt in de potentiële vorticeit wijst op een fout in

de analyse. Ook andere verschillen, zoals die tussen de positie van geïsoleerde donkere gebiedjes in het waterdamp satellietbeeld en gebiedjes met hoge waarden van de potentiële vorticeit, kunnen wijzen op fouten in de analyse. Een recent verschenen boek (Santurette and Georgiev, 2005) is geheel gewijd aan deze manier om weersontwikkelingen en analyses te bewaken.

Deze manier om weersontwikkelingen en analyses te bewaken, wordt inmiddels in de praktijk gebracht, ook op het KNMI. Naast velden van potentiële vorticeit worden voor dit doel ook berekende waterdampbeelden gebruikt die worden afgeleid uit de modelvelden van de analyse. De basis van dergelijke berekeningen is een stralingstransportmodel of een vereenvoudiging daarvan (Voogt, 2003, Tijm, 2002). Deze beelden kunnen direct worden vergeleken met waargenomen satellietbeelden. Ook wordt routinematig een satellietrapport (SATREP) opgemaakt, waarin de verschillende structuren die op satellietbeelden zichtbaar zijn, worden benoemd in termen van conceptuele modellen (Maas, 1996, Floor 1997). Een recente toepassing van een conceptueel model (snelle cyclogenese) vinden we in het artikel van Holwerda (2005).

Modificeren van analyses

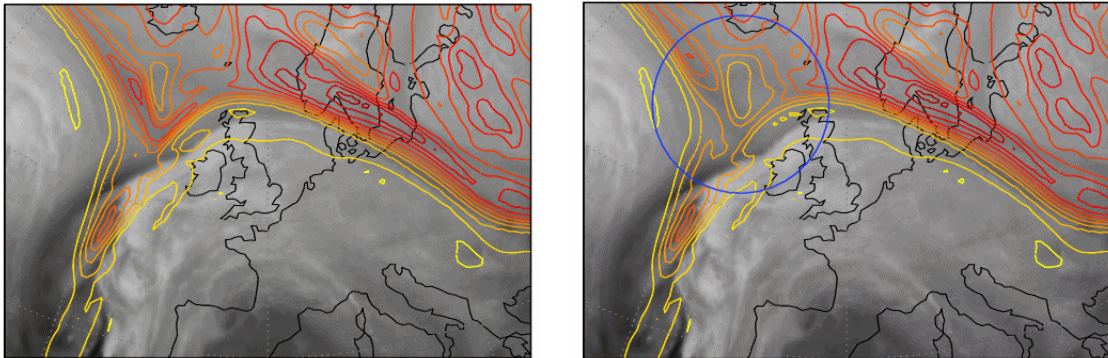
Met de mogelijkheden die satellietbeelden en andere gegevens bieden om het numerieke weersvoorspelproces te bewaken, rijst als vanzelfsprekend de vraag in hoeverre het nuttig is om te kunnen ingrijpen als deze gegevens daartoe aanleiding geven. Ten gunste van een dergelijke mogelijkheid spreekt het feit dat belangrijke weersontwikkelingen zich vaak voordoen op de Atlantische Oceaan waar weinig conventionele waarnemingen beschikbaar zijn. Het kan daardoor enige tijd duren voordat een gemiste ontwikkeling, op grond van nieuwe waarnemingen, door het geautomatiseerde systeem wordt gecorrigeerd. Het is goed te verdedigen dat in dergelijke gevallen niet wordt gewacht op een nieuwe analyse maar dat de analyse handmatig wordt gecorrigeerd. In de literatuur wordt aan de mogelijkheid om in die gevallen handmatig te kunnen ingrijpen inmiddels de nodige aandacht besteed (zie bijvoorbeeld Røsting et al., 2003). In een recent verschenen artikel (Verkley et al., 2005) hebben we onze eigen techniek beschreven waarmee handmatig ingrijpen mogelijk is.

We hebben bij deze techniek vastgehouden aan de topografische interpretatie van satellietbeelden en daarmee, net als Røsting et al., (2003), aan de centrale rol van potentiële vorticeit. De belangrijkste reden hiervoor is dat potentiële vorticeit, onder de aannamen van hydrostatisch en geostrofisch evenwicht, de overige meteorologische velden vastlegt. Voor ons doel, het modificeren van analyses, is deze laatste eigenschap van groot belang. Zien we namelijk in de analyse een verschil zoals hierboven beschreven, dan zouden we de analyse kunnen verbeteren door het potentiële vorticeitsveld te verbeteren. We verbeteren dan tegelijkertijd de andere meteorologische velden.

De methode

De methode die we hebben ontwikkeld laat enkele eenvoudige veranderingen toe in het geanalyseerde potentiële vorticeitsveld: (1) lokale bronnen en putten, (2) lokale versterkingen of verzwakkingen en (3) verschuivingen. De modificaties beperken zich in horizontale richting tot een cirkelvormig gebied en hebben in verticale richting een vast profiel. In figuur 2 geven we een voorbeeld van een modificatie. Figuur 2a toont een waterdamp satellietbeeld (in grijs tinten) met daarop gesuperponeerd de potentiële

vorticeit (in gekleurde contouren) op het 318 K isentrope oppervlak. Figuur 2b toont hetzelfde satellietbeeld, maar nu met een potentiële vorticeitsveld dat lokaal, ten zuiden van IJsland, met een factor 0.5 verzwakt is. Bij een verzwakking zoals in dit voorbeeld hebben we een verticaal profiel gekozen waarbij de verandering het grootst is rond de tropopauze.



Figuur 2. De achtergrond van beide figuren is het waterdamp satellietbeeld van 29 oktober 2002, 06.00 UTC. In gekleurde contouren, waarbij lichtgeel de waarde 0 representeert en donkerrood de waarde 10, zien we de potentiële vorticeit in PVU op het 318 K isentrope oppervlak. Figuur (a, links) is het ongemodificeerde potentiële vorticeitsveld, figuur (b, rechts) het gemodificeerde potentiële vorticeitsveld waarbij binnen de cirkel de waarde van dit veld met een factor 0.5 is verkleind.

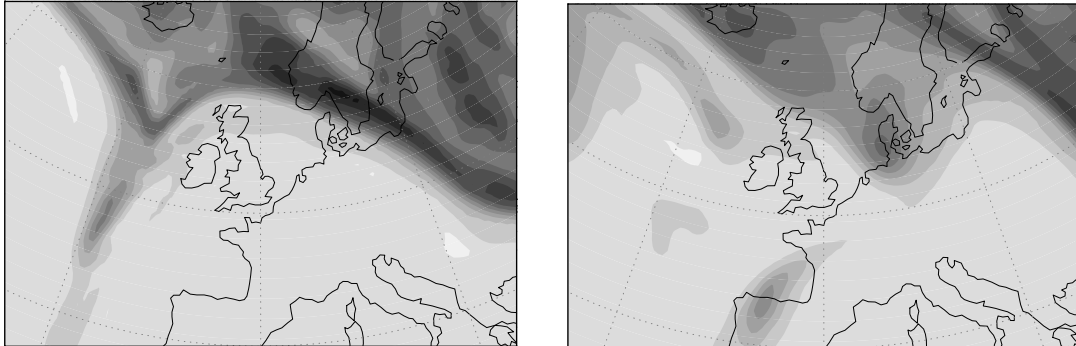
Om uit het gemodificeerde potentiële vorticeitsveld de daarbij behorende modeltoestand te bepalen, gebruiken we driedimensionale variationele data-assimilatie. Het hart van deze procedure is de numerieke minimalisatie van een zogenaamde kostenfunctie. Deze functie bestaat uit twee termen: een achtergrondsterm die het verschil meet tussen de modeltoestand en de eerste schatting (doorgaans een zeer-korte-termijn voorspelling voor het betreffende tijdstip) en een waarnemingsterm die het verschil meet tussen de modeltoestand en de waarnemingen. Op grond van verschillende bronnen van informatie wordt op deze manier de meest waarschijnlijke modeltoestand bepaald (zie Lorenc, 1986).

In de methode wordt het gemodificeerde potentiële vorticeitsveld beschouwd als een extra veld van waarnemingen en wordt als zodanig geassimileerd, uitgaande van de te modifieren analyse als eerste schatting. Om dit te kunnen doen, hebben we de waarnemingsterm in de kostenfunctie vervangen door een zogenaamde potentiële vorticeitsterm. Door deze potentiële vorticeitsterm een groot gewicht te geven ten opzichte van de achtergrondsterm vinden we het gemodificeerde potentiële vorticeitsveld bijna geheel terug in de nieuwe analyse. In het HiRLAM systeem dat tot maart 2002 operationeel was op het KNMI hebben we dit geïmplementeerd.

Een voorbeeld

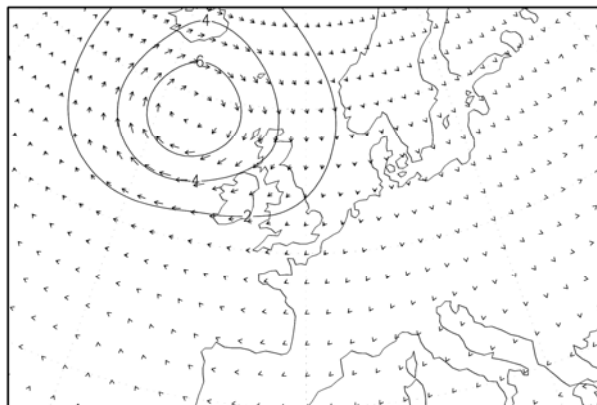
Als voorbeeld kiezen we een door HIRLAM gesimuleerde ontwikkeling, over een periode van 24 uur, die begon op 29 oktober 2002 om 06.00 UTC, het tijdstip waarop het getoonde satellietbeeld en het potentiële vorticeitsveld van figuur 2 betrekking hebben. In termen van de potentiële vorticeit op het 318 K isentrope oppervlak zien we de begintoestand van deze ontwikkeling en de toestand na 24 uur in figuur 3a. In een periode van 24 uur ontwikkelt zich boven Denemarken een gebied met vrij hoge

waarden van de potentiële vorticeit (figuur 3b) en een daarmee overeenkomend lagedruk gebied met hoge windsnelheden. Deze ontwikkeling deed zich in werkelijkheid niet voor.



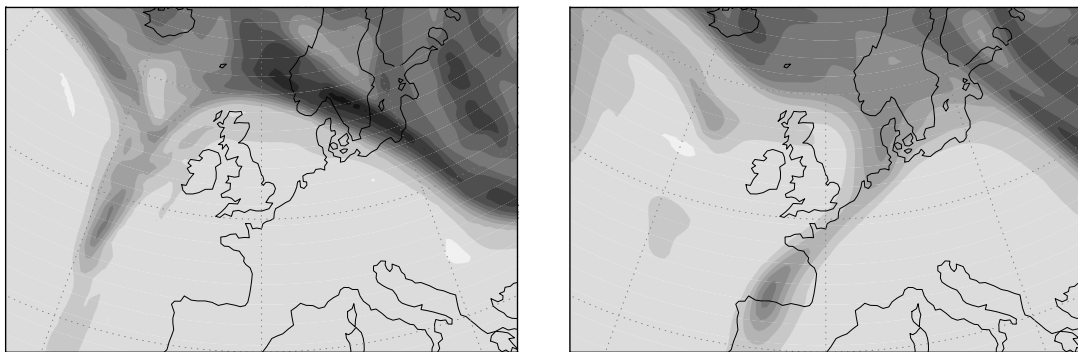
Figuur 3. Potentiële vorticeit op het 318 K oppervlak van de ongemodificeerde analyse van 29 oktober 2002, 06.00 UTC (a, *links*) en de potentiële vorticeit op het 318 K oppervlak van de daarop gebaseerde 24 uur voorspelling door HIRLAM (b, *rechts*). De velden zijn gegeven in PVU en worden gerepresenteerd met behulp van grijsstinten waarbij de lichtste grijsstint waarden toont van 0 tot 1, de volgende grijsstint waarden van 1 tot 2, etc. Het veld in (a) is hetzelfde als het veld (a) uit figuur 2.

Een nadere analyse van deze HIRLAM simulatie heeft uitgewezen dat de hoge waarden van de potentiële vorticeit boven Denemarken zijn geadvecteerd vanuit een gebied ten zuiden van IJsland. Om het systeem te testen, hebben we in een cirkelvormig gebied met een straal van 778 km (7°) rond (16° W, 58° N) de potentiële vorticeit met een factor 0.5 verkleind. Dit wil zeggen: de verkleining is 0.5 in het midden van het cirkelvormige gebied en nadert de waarde 1 op de rand waardoor er slechts een verwaarloosbare discontinuïteit in het gemodificeerde potentiële vorticeitsveld ontstaat. Figuur 2a toont het niet gemodificeerde potentiële vorticeitsveld en figuur 2b het gemodificeerde veld, beide in combinatie met het waterdamp satellietbeeld.



Figuur 4: Modificatie van de analyse, zoals die tot uitdrukking komt in het snelheidsveld op het onderste modelniveau en de druk op gemiddeld zeeniveau. De modificatie kan worden opgevat als een negatieve anomalie in het potentiële vorticeitsveld die zich manifesteert als een positieve drukanomalie op gemiddeld zeeniveau en een anticyclonale anomalie in het snelheidsveld aan het aardoppervlak.

Het aldus gemodificeerde potentiële vortciteitsveld is aangeboden aan het variationele data-assimilatie systeem, die het bijna volledig heeft gerespecteerd. In figuur 4 laten we de verschillen zien tussen de gemodificeerde en de niet gemodificeerde analyse in termen van de windsnelheid op het laagste modelniveau en de druk op gemiddeld zeeniveau. Met de verzwakking hebben we een negatieve anomalie in de potentiële vortciteit aangebracht. Figuur 4 laat zien dat een dergelijke anomalie correspondeert met een positieve anomalie in de druk op gemiddeld zeeniveau en een anticyclonale anomalie in het snelheidsveld aan de grond. Zie Verkley (1995) voor meer details over het verband tussen het potentiële vortciteitsveld en het druk- en snelheidsveld.



Figuur 5. Potentiële vortciteit op het 318 K oppervlak van de gemodificeerde analyse van 29 oktober 2002, 06.00 UTC (a, links) en de potentiële vortciteit op het 318 K oppervlak van de daarop gebaseerde 24 uur voorspelling door HIRLAM (b, rechts). Net als in figuur 3 zijn de velden gegeven in PVU en worden ze gerepresenteerd met behulp van grijs tinten waarbij de lichtste grijs tint waarden toont van 0 tot 1, de volgende grijs tint waarden van 1 tot 2, etc. Het veld in (a) is bijna identiek met het veld (b) uit figuur 2.

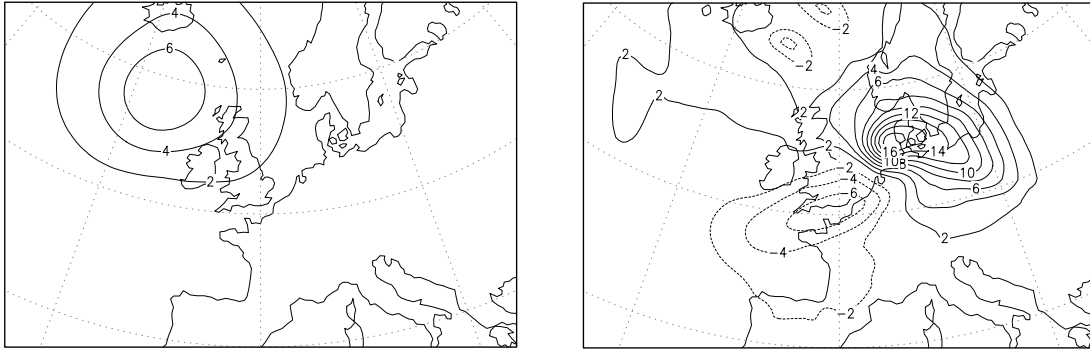
De ontwikkeling op grond van de gemodificeerde analyse is te zien in figuur 5. De waarden van de potentiële vortciteit boven Denemarken zijn nu minder groot. Wat een en ander betekent in termen van de druk op gemiddeld zeeniveau toont figuur 6. Figuur 6a laat het verschil zien in druk op gemiddeld zeeniveau tussen de gemodificeerde analyse en de ongemodificeerde analyse. Deze figuur is identiek aan figuur 4. Figuur 6b laat hetzelfde verschil zien na 24 uur. We zien dat het drukverschil in de loop van 24 uur aanzienlijk is toegenomen, van maximaal 7.8 hPa tot maximaal 19.4 hPa.

Conclusies

Het voorbeeld toont aan dat de methode correct kan worden toegepast, maar hiermee is nog niet bewezen dat deze nuttig is in de operationele praktijk. De verandering die we in het potentiële vortciteitsveld van de analyse hebben aangebracht was niet gebaseerd op een waargenomen verschil met het overeenkomstige waterdampbeeld, maar op een analyse van de wijze waarop de hoge waarden van de potentiële vortciteit boven Denemarken waren ontstaan. Verder is het systeem in de versie die we hier hebben beschreven rekentechnisch te traag voor operationeel gebruik.

Dit laatste probleem is inmiddels opgelost doordat het systeem is overgezet naar de huidige HIRLAM configuratie. Tussen de operationele runs door zijn er nu enkele perioden waarin een alternatieve run, op basis van een gemodificeerde analyse, met het operationele HIRLAM kan worden uitgevoerd. In de loop van 2006 hopen we dit nieuwe systeem te testen in een operationele omgeving, aan de hand van actuele en historische

situaties. Gevallen van snelle cyclogenese zullen hierbij extra aandacht krijgen omdat verschillen tussen waterdamp satellietbeelden en potentiële vorticeit in deze gevallen het duidelijkst aan het licht treden en toepassing van de methode het meeste perspectief lijkt te bieden.



Figuur 6. Het verschil tussen de druk op gemiddeld zeeniveau tussen de gemodificeerde en de ongemodificeerde simulatie met HIRLAM, in (a, links) op het tijdstip van de analyse en in (b, rechts) 24 uur later. Het drukpatroon in (a) is gelijk aan dat van (b) in figuur 4. We zien dat in een periode van 24 uur het verschil tussen de twee simulaties in termen van druk op gemiddeld zeeniveau sterk is toegenomen.

Dankwoord

Enkele collega's hebben de tekst kritisch doorgelezen; hiervoor wil ik hen hartelijk bedanken.

Literatuur

- Floor, K., 1997: 'De SATREP-methode', *Meteorologica*, 4, 18 - 21.
- Holwerda, M., 2005: 'Snelle cyclogenese op 7 en 8 januari 2005', *Meteorologica*, 2, 19 - 24.
- Lorenc, A.C., 1986: 'Analysis methods for numerical weather prediction', *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 112, 1177 - 1194.
- Maas, A., 1996: 'Satellietmeteorologie eindelijk volwassen', *Meteorologica*, 4, 16 - 18.
- Røsting, B., Kristjánsson, J. E. and Sunde, J., 2003: 'The sensitivity of numerical simulations to Initial modifications of potential vorticity - a case study', *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 129, 2697 - 2718.
- Santurette, P. and Georgiev, C.G., 2005: 'Weather Analysis and Forecasting – Applying Satellite Water Vapor Imagery and Potential Vorticity Analysis', Elsevier Academic Press, 179 pp.
- Tijm, S., 2002: 'Satellietbeelden gegenereerd met Hirlam', *Meteorologica*, 3, 13 - 14.
- Voogt, M.H., 2003: 'Synthetic water vapour images from the HIRLAM model using a radiative transfer model', KNMI Intern rapport, IR 2003-07.
- Verkley, W., 1995: 'Potentiële vorticeit', *Meteorologica*, 3, 4 - 11.
- Verkley, W.T.M., Vosbeek, P.W.C. and Moene, A.R., 2005: 'Manually adjusting a numerical weather analysis in terms of potential vorticity using three-dimensional variational data-assimilation', *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 131, 1713 - 1736.
- Weldon, R.B. and Holmes S.J., 1991: 'Water vapor imagery: interpretation and applications to weather analysis and forecasting', NOAA Technical Report, NESDIS 57, National Oceanic and Atmospheric Administration, US Department of Commerce, Washington DC, USA.