Dopplerwaarnemingen met buienradar

Buienradars worden gebruikt voor het ruimtelijk waarnemen en volgen van neerslaggebieden. Uit de dopplerwaarnemingen van deze radars kan echter ook gedetailleerde informatie worden verkregen over het windveld rond (gevaarlijke) weerfenomenen. Het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI) beheert twee dopplerbuienradars. Eén radar staat bij het KNMI in De Bilt en de andere op de Marinebasis in Den Helder. In dit artikel worden de afleiding en kwaliteit van radarwindprofielen beschreven. Vervolgens laten we zien hoe uit deze profielen temperatuuradvectie wordt afgeleid en hoe dit gebruikt kan worden. Tenslotte wordt ingegaan op de detectie van gevaarlijke windfenomenen en vogeltrek met het radarnet-

werk. Iwan Holleman

Afleiding radarwindprofielen

Een dopplerradar meet de verstrooiing en beweging van atmosferische 'deeltjes', zoals regen, sneeuw, vogels en insecten. De radar levert onder andere de radiale (= langs de gezichtsrichting) snelheid van de deeltjes als een functie van afstand, azimut (hoek van de antenne ten opzichte van het noorden) en elevatie (hoek van de antenne met het horizontale vlak). Onder de aanname dat de deeltjes met de wind meebewegen kan hieruit de windsnelheid en -richting worden berekend voor

Iwan Holleman (1970) is afgestudeerd in experimentele natuurkunde en vervolgens gepromoveerd (1998) aan de Radboud Universiteit Nijmegen. Zijn promotieon-



Zijn promotieonderzoek bij Gerard Meijer betrof de dynamica van CO in kristallijn C₆₀. In 1999 is hij aangesteld als radaronderzoeker bij het KNMI. Op dit moment werkt hij als groepsleider bij weeronderzoek en als programmamanager van het Europese netwerk van buienradars.

holleman@knmi.nl

verschillende hoogtes. Rond de radar kan de radiale snelheid V_r worden gemodelleerd als een functie van azimut φ en elevatie θ :

$$V_{r}(\varphi,\theta) = V_{x}\cos\theta\sin\varphi + V_{y}\cos\theta\cos\varphi + (V_{z}+V_{t})\sin\theta$$
(1)

Waarbij (V_x, V_y, V_z) de componenten van het lokale windveld voorstellen en V_t de valsnelheid van de deeltjes. Figuur I toont twee voorbeelden van de radiale snelheid als functie van azimut voor vaste afstand en elevatie (op hoogte van ongeveer I km) zoals waargenomen door de radar in De Bilt. De windsnelheid en –richting kunnen direct worden bepaald uit de amplitude en de fase van de sinus [I].

Het meest opvallende verschil tussen de twee voorbeelden in de figuur is de spreiding van de waarnemingen rond de sinus. De oorzaak hiervan komt later aan bod. De spreiding rond de sinus kan worden gekwantificeerd en vervolgens worden omgerekend naar de standaardafwijking van de radiale snelheid. Deze standaardafwijking is een goede maat voor de kwaliteit van de afgeleide windvectoren en over het algemeen worden vectoren met een standaardafwijking van de radiale snelheid boven 2 m/s niet gebruikt.

In plaats van het onafhankelijk analyseren van alle individuele 'sinussen' kan men beter alle beschikbare radiale snelheidsgegevens binnen een bepaalde hoogteband tegelijkertijd analyseren. De componenten van het windveld kunnen dan worden afgeleid uit een multi-dimensionale lineaire fit van vergelijking I aan de snelheidsgegevens [2]. Op het KNMI wordt deze techniek gebruikt om elke vijf minuten een radarwindprofiel boven beide radars af te leiden met een resolutie van 200 m en tot een hoogte van maximaal 6 km [4].

Kwaliteit van radarwindprofielen

De kwaliteit van de afgeleide radarwindprofielen is onderzocht door een vergelijking met andere standaardwaarnemingen van het windprofiel met weerballonnen én met de windanalyses van het numerieke weerverwachtingsmodel van het KNMI, HIRLAM (High Resolution Limited Area Model). In De Bilt



Figuur 1 Twee voorbeelden van de radiale snelheid als een functie van de azimut voor vaste afstand en elevatie zoals waargenomen door de radar in De Bilt. Het bovenste deel toont de dopplerwaarnemingen tijdens de passage van een koufront en het onderste deel toont de waarnemingen tijdens intense (nachtelijke) vogeltrek.



HIRLAM-weermodel en de standaardafwijking (◊) van de Cartesische componenten uit de verificatie van de wind gemeten met radar (bovenste deel) en de ballon (onderste deel) tegen HIRLAM.

worden twee keer per dag weerballonnen opgelaten die druk, temperatuur, vocht en wind als functie van de hoogte waarnemen. Het numerieke weerverwachtingsmodel analyseert elke drie uur de toestand van de atmosfeer op basis van alle beschikbare waarnemingen en de modelverwachting berekend tijdens de vorige run. De modelanalyse is de beginvoorwaarde van waaruit de weersverwachting wordt berekend. Figuur 2 toont de resultaten van de ver-

gelijking van de radarwindprofielen en weerballonprofielen met de HIRLAMmodelanalyses voor De Bilt over een periode van 9 maanden. Het gemiddelde verschil (bias) en de standaardafwijking van de horizontale componenten van de windvectoren zijn uitgezet als functie van de hoogte in de atmosfeer. In deze vergelijking heeft de weerballon een duidelijk voordeel omdat de ballonwaarnemingen worden gebruikt in de analyse van het weermodel. De radarwindprofielen, zowel oost-west als noord-zuid, hebben een geringe positieve bias ten opzichte van het weermodel. De oorzaak van deze bias is bekend maar het voert hier te ver om er verder op in te gaan.

Kwaliteitsverschillen tussen de windprofielen uit de radar en die van de weerballonnen kunnen worden afgelezen uit de standaardafwijking ten opzichte van het HIRLAM-weermodel van de vectorcomponenten als functie van de hoogte. De standaardafwijkingen voor beide componenten uit de metingen met ballonnen nemen toe van 1,5 m/s aan de grond tot bijna 3 m/s op grote hoogte. Deze toename wordt veroorzaakt door de verplaatsing van de ballon door de wind, die in de berekening niet wordt meegenomen. De radarwindprofielen laten een geringe toename van de standaardafwijkingen zien van 2,0 m/s aan de grond tot ongeveer 2,5 m/s op 6 km hoogte. Deze toename tussen o en 6km wordt veroorzaakt door de gemiddelde toename van de windsnelheid met de hoogte. Al met al blijkt dat de kwaliteit van de radarwindprofielen minstens zo goed is als die van de klassieke ballonoplatingen.

Temperatuuradvectie

Figuur 3 toont een voorbeeld van de windprofielen boven De Bilt uit de radar (blauwe windvanen) en het weermodel (rode windvanen) voor een dag waarop een koufront over Nederland trok. In de figuur zijn alleen de radarprofielen gemeten op het hele uur te zien terwijl de radar elke vijf minuten windprofielen kan leveren als er verstrooiende deeltjes aanwezig zijn. De windvanen representeren de richting waar de wind vandaan komt en de windsnelheid kan worden afgelezen uit het aantal vanen en driehoeken. Een (halve) vaan staat voor (2,5) 5 m/s en een driehoek representeert 25 m/s. Op 2 km hoogte komt de wind voornamelijk uit het zuidwesten en ligt de windsnelheid rond de 15 m/s (windkracht 7). De windsnelheid neemt toe tot meer dan 35 m/s op een hoogte van 6 km. Het is duidelijk dat de overeenstemming tussen de radar- en modelvectoren goed is.

Kleine veranderingen van de windsnelheid en -richting in de profielen kunnen zichtbaar worden gemaakt door het berekenen van de lokale toename of afname van de temperatuur door de horizontale aanvoer van respectievelijk warme of koude lucht, de temperatuuradvectie. De temperatuuradvectie wordt dus bepaald door de horizontale temperatuurgradiënt en de wind. De temperatuurgradiënt kan worden

0000 UTC 20030505 - 2338 UTC 20030505, Radar en Hirlam



Figurr 3 Een voorbeeld van de windprofielen boven De Bilt uit de radar (blauwe windvanen) en het HIRLAM-weermodel (rode windvanen) voor een dag waarop een koufront over Nederland trok. Een (halve) vaan staat voor (2,5) 5 m/s en een driehoek representeert 25 m/s.

0000 UTC 20030505 - 2338 UTC 20030505







Figuur 5 Schade aan een (oude) schuur in Muiden door de windhoos op 23 augustus 2004 (foto: Rob Sluijter).

berekend uit het vectorverschil van de wind op twee hoogtes. Onder bepaalde condities is dit vectorverschil gelijk aan de zogeheten thermische wind $(\Delta V_{a}, \Delta V_{a})$:

$$\Delta V_{u} \propto (\partial T / \partial x)_{p} \ln(p_{2}/p_{1}) \qquad (2)$$

waarin p₁ en p₂ staan voor de luchtdruk op beide hoogtes en $(\partial T | \partial x)_p$ voor de temperatuurgradiënt in de oost-west richting en vanzelfsprekend bestaat er een vergelijkbare vergelijking voor ΔV_x . Een draaiing van de wind met toenemende hoogte duidt op de aanvoer van warme (ruimende wind, bijvoorbeeld oost naar zuid) of koude (krimpende wind) lucht.

De temperatuuradvectie is berekend uit de radarwindprofielen in figuur 3 en het resultaat is te zien in figuur 4. Aanvoer van koele lucht (blauw in figuur) is te zien onder 3 km hoogte en daarboven is voornamelijk aanvoer van warme lucht (rood in figuur) te zien. Dit patroon in de temperatuuradvectie wordt veroorzaakt door de passage van het koufront. De thermische windbenadering is in principe geldig voor grootschalige (>100 km) weersystemen. De toepasbaarheid tijdens convectie op kleinere schaal is twijfelachtig. Aan de andere kant toont de berekende temperatuuradvectie (kleine) draaiings- en snelheidsverschillen die anders wellicht niet waren opgevallen.

Detectie van mesocyclonen

Zware onweersbuien en met name de bijhorende weerfenomenen, zoals windstoten en mesocyclonen (voorloper van windhozen), zijn te herkennen aan kleine variaties in het lokale windveld. In de dopplerradargegevens kunnen deze variaties zichtbaar worden gemaakt door het berekenen van de horizontale verandering van de wind tussen twee punten, windschering. De horizontale windschering is gedefinieerd als de kwadratische som van de radiale windschering en de tangentiële windschering. De radiale windschering wordt berekend uit het verschil van de waargenomen snelheden op twee afstanden en de tangentiële windschering uit het verschil van de snelheden bij twee azimuts. Over het algemeen duidt een horizontale windschering van meer dan 8 m/s/km op gevaarlijk weer.

Op 23 augustus 2004 trok een koufront van zuidwest naar noordoost over Nederland en rond 17 uur lokale tijd ontstond een zeldzaam sterke onweersbui ('supercell') op dit front. Deze supercell produceerde hevige regenval en hagel in Diemen en Almere. Rond 18 uur ontstond aan dit complex een windhoos die toesloeg in de omgeving van Muiden en Weesp. De windhoos richtte schade aan in een smal spoor van 50 meter breed over een lengte van een kilometer. De foto in figuur 5 laat een voorbeeld zien van de schade die is aangericht door de windhoos in Muiden.

Deze supercell is ook waargenomen door de dopplerradar in De Bilt op een afstand van slechts 30 km. Het linkerdeel van figuur 6 toont een hoge-resolutie-reflectiebeeld ingezoomd rond Muiden. De supercell is herkenbaar aan de grote band met extreem sterke reflecties (paarse kleur, neerslagintensiteit van >100 mm/h), het uitgestrekte aambeeld boven Flevopolder en IJsselmeer, en de karakteristieke haakvormige echo boven Muiden (noordoostelijk van zwarte stip).

Het rechterdeel van figuur 6 toont de waargenomen horizontale windschering voor de situatie in het linkerdeel. De windschering kan alleen bepaald worden als er neerslag wordt waargenomen. Het uitgestrekte aambeeld kenmerkt zich door een zeer geringe

1612 UTC 20040823 -1612 UTC 20040823



1612 UTC 20040823 - 1612 UTC 20040823





windschering en dit duidt op een zeer homogeen windveld. Rond de haakvormige echo van de supercell is een gebied met zeer sterke windschering (>15 m/s/km) te zien. Deze sterke windschering wordt veroorzaakt door de zeer lokale rotatie ('mesocycloon') die alleen in een supercell voorkomt. Dus de dopplerradar kan de mesocycloon, die vaak tot een (gevaarlijke) windhoos leidt, waarnemen in een supercell onweersbui.

Volgen van vogeltrek

Trekkende vogels zijn een potentieel gevaar voor vliegtuigen tijdens het opstijgen, de landing, en laagvliegen. De gevolgen van een botsing tussen een kraanvogel en een helikopter in Israël zijn te zien in figuur 7. Bovendien kunnen trekkende vogels grote fouten (tot 20 m/s) veroorzaken in windwaarnemingen met dopplerradar.

Het bovenste deel van figuur I toont de dopplerwaarnemingen tijdens de passage van een koufront en het onderste deel toont de waarnemingen tijdens intense vogeltrek. Het enorme verschil in spreiding rond de sinus kan worden gekwantificeerd met de standaardafwijking van de radiale snelheid. Waarnemingen met een mobiele vogelradar van de Nederlandse Luchtmacht zijn gebruikt om het onderscheid tussen wind en vogels op basis van de standaardafwijking te verifiëren. De vergelijking is uitgevoerd met waarnemingen op de luchtmachtbasis De Peel



Figuur 7 De gevolgen van een botsing tussen een kraanvogel en een helikopter op 300 meter hoogte in Israël. Kraanvogels trekken in maart met grote aantallen over Israël (foto verkregen via Nederlandse Luchtmacht).



Figuur 8 Vergelijking voor een groot aantal wind- en vogelvectoren met de mobiele vogelradar van de Nederlandse Luchtmacht. De horizontale as geeft de reflectiesterkte weer en de verticale as de standaardafwijking van de radiale snelheid. De paarse en blauwe punten markeren vectoren die door de vogelradar als, respectievelijk, wind en vogels zijn aangemerkt.

(80 km van De Bilt) tijdens het voorjaar van 2003.

Het resultaat van de vergelijking voor een groot aantal wind- en vogelvectoren is weergegeven in figuur 8. De horizontale as geeft de reflectiesterkte (>7 dBZ is neerslag) weer en de verticale as de standaardafwijking van de radiale snelheid. De paarse en blauwe punten markeren vectoren die door de vogelradar als, respectievelijk, wind en vogels zijn aangemerkt. De wind- en vogelvectoren worden goed gescheiden met de standaardafwijking (2 m/s) en de paarse punten boven de gestreepte lijn horen bij vliegende insecten of vogels die niet door de mobiele radar zijn gezien. Het is eenvoudig om goede windvectoren te selecteren met deze methode [5] en verder onderzoek naar de potentie voor het volgen van vogeltrek loopt nog [6].

Vooruitblik

De Europese nationale weerdiensten werken intensief samen en in dat kader loopt er ook een programma over het buienradarnetwerk. Dit programma heeft onder andere ervoor gezorgd dat de beschikbaarheid en kwaliteit van radarwindprofielen enorm is toegenomen en op dit moment zijn profielen van bijna 100 radars beschikbaar. Op het KNMI wordt nu gewerkt aan de assimilatie van deze waarnemingen in het numerieke weermodel.

Afgelopen jaar hebben de buienradars van het KNMI een technische opknapbeurt gehad en hierdoor is het mogelijk om een aantal nieuwe en verbeterde (doppler)radarproducten in te voeren. De toepassing van de buienradars voor vogeltrek heeft een enorme vlucht genomen door een programma van de Europese ruimtevaartorganisatie (ESA) en gegevens van verschillende meetcampagnes worden nu geanalyseerd.

Werking dopplerradar

De dopplerradar zendt en ontvangt radiogolven met een frequentie van ongeveer 5,6 GHz en een golflengte van 5,3 cm. De radar zendt elke paar milliseconde een korte (ongeveer 1 microseconde) en intense (250 kW) puls. Uit het tijdsverschil tussen zenden en ontvangen wordt de afstand bepaald en uit de intensiteit van de echo wordt de neerslagintensiteit berekend. Omdat de diameter van de regendruppels veel kleiner is dan de golflengte is er sprake van Rayleighverstrooiing. De snelheid in de 'kijkrichting' van de echo, de zogeheten radiale snelheid, wordt afgeleid uit het faseverschil van de ontvangen radiogolven voor twee opeenvolgende zendpulsen. De radiale snelheid kan alleen bepaald worden als er verstrooiende deeltjes in de atmosfeer aanwezig zijn. De maximale afstand die eenduidig kan worden waargenomen is evenredig met het tijdsverschil tussen de zendpulsen en de maximale snelheid die eenduidig kan worden waargenomen is omgekeerd evenredig met dit tijdsverschil. Het product van de maximale afstand (bijvoorbeeld 200 km) en de maximale snelheid (bijvoorbeeld 10 m/s) is een systeemconstante: dit staat bekend als het dopplerdilemma. Het snelheidsbereik kan worden vergroot door het gebruik van verschillende tijdsverschillen tussen de zendpulsen [3].

Referenties

- 1 K. A. Browning en R. Wexler, J. Appl. Meteor. **7** (1968), 105.
- 2 P. Waldteufel en H. Corbin, J. Appl. Meteor., **18** (1979), 532.
- 3 I. Holleman en H. Beekhuis, J. Atm. Oceanic. Technol. 20 (2003), 443.
- 4 I. Holleman, J. Atm. Oceanic. Technol. 22 (2005), 1541.
- 5 I. Holleman, H. van Gasteren en W. Bouten, J. Atm. Oceanic. Technol. (2008), in druk.
- 6 H. van Gasteren, I. Holleman, W. Bouten en E. van Loon, *Ibis* (2008), in druk.