

## Risico op zware windstoten in onweders

David Dehenauw (KMI Ukkel, België)

Onweders komen nagenoeg elke maand voor in België. Soms kunnen ze gepaard gaan met zware windstoten voortkomend uit windhozen of valwinden. Deze windfenomenen kunnen ook in de Benelux af en toe schade, gewonden en uitzonderlijk zelfs doden veroorzaken. De voornaamste taak van een openbaar weerinstituut zoals het KMI, is het publiek tijdig te waarschuwen voor gevaarlijk weer. Vermits windhozen en valwinden meerdere malen per jaar voorkomen in België en Europa en hun voorspelling zeer moeilijk is, loont het de moeite om na te gaan of weermodellen enkele signalen kunnen geven voor dergelijk onheil (Dotzek, 2003). Omdat windhozen of tornado's zich niet elke dag voordoen en hun detectie soms twijfelachtig is, werd gekozen om een aantal case-studies te voeren naar enkele recente gevallen van convectieve windschade. Het onderscheid tussen valwind en windhoos is niet steeds gemakkelijk en in deze studie werd geen poging gedaan om valwinden van windhozen te onderscheiden. Beide kunnen schade veroorzaken. Vermits zware onweders vaak een mesoschaal karakter hebben, werd een Amerikaans mesomodel, Eta, aangewend om die te simuleren en vervolgens te onderzoeken of dergelijk model in staat is om de kans op zware convectieve windstoten in te schatten.

### State-of-the-art

Fawbush en medewerkers probeerden in de jaren 1950 de kans op een tornado in te schatten op basis van waargenomen ballonpeilingen.

Miller probeerde in 1972 een verband te zoeken met weersverschijnselen op synoptische schaal. Dit is nog steeds nuttig, maar onvoldoende. Vele studies wijzen uit dat mesoschaalfenomenen zoals jet streaks, low level jets, convective outflows, ... belangrijk kunnen zijn bij het ontstaan van zware convectie. Deze fenomenen zijn vaak moeilijk accuraat te voorspellen met enkel de uitvoer van globale modellen.

Stensrud et al. (1997) wezen op een combinatie van zwaar-weer mesomodel variabelen die kon aangewend worden om de dreiging van windhozen of valwinden beter te begrijpen. Hun combinatie blijkt zeer nuttige informatie op te leveren, maar is gebaseerd op gegevens uit de VS. Thompson et al. (2003) definieerde een US tornado index, gebaseerd op model uitvoer.

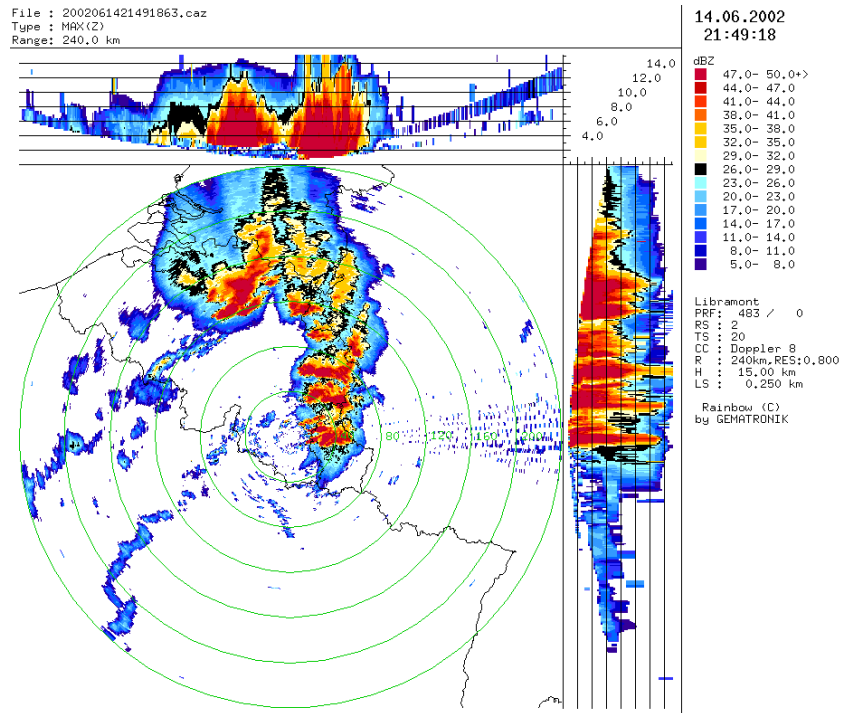
Brooks (2002, 2004) stelt verschillen vast tussen Amerikaanse en Europese zwaar-weer klimatologie en beweert dat de grotere verticale temperatuursverschillen en dito vochtigheid, het ontstaan van zware windhozen in de VS bevorderen. De lagere frekwentie van zware windhozen in Europa resulteert in minder studiemateriaal en bemoeilijkt het voorspellingsproces.

Het is interessant om te kijken of de Amerikaanse aanpak ook toepasbaar is in België en zoniet, wat er aan kan veranderd worden. We kunnen de maximale windstoot in een onweer moeilijk overal nauwkeurig meten, dus werd er voor beoordelingsredenen van uitgegaan dat het beter was om een voorspellingsmethodiek te ontwikkelen die regio's met een verhoogde dreiging aankruist. Weeramateurs en de media wezen de plaatsen aan die windschade geleden hadden bij onweer. Dat toont meteen een zwakke plek: 's nachts in een niet-bewoond gebied zullen ook wel windhozen zijn voorgekomen die niet gemeld

werden. Vanop afstand kan echter geen uitsluitsel worden gegeven aan de hand van enkel radar- of satellietbeelden. België heeft geen storm-spotters netwerk.

Er werd voor gekozen om de Amerikaanse weg verder te volgen, maar een eigen combinatie van zwaar-weer variabelen te bestuderen, die een duidelijke fysische betekenis hebben en die te vergelijken met een tornado-index uit de VS.

Schademeldingen werden vergeleken met radarbeelden, synoptische en mesoschaal weerkaarten, om vervolgens het gedrag van de zwaar-weer variabelen te bestuderen.



Figuur 1. Radarbeeld 14/06/02 om 21.50 UTC.

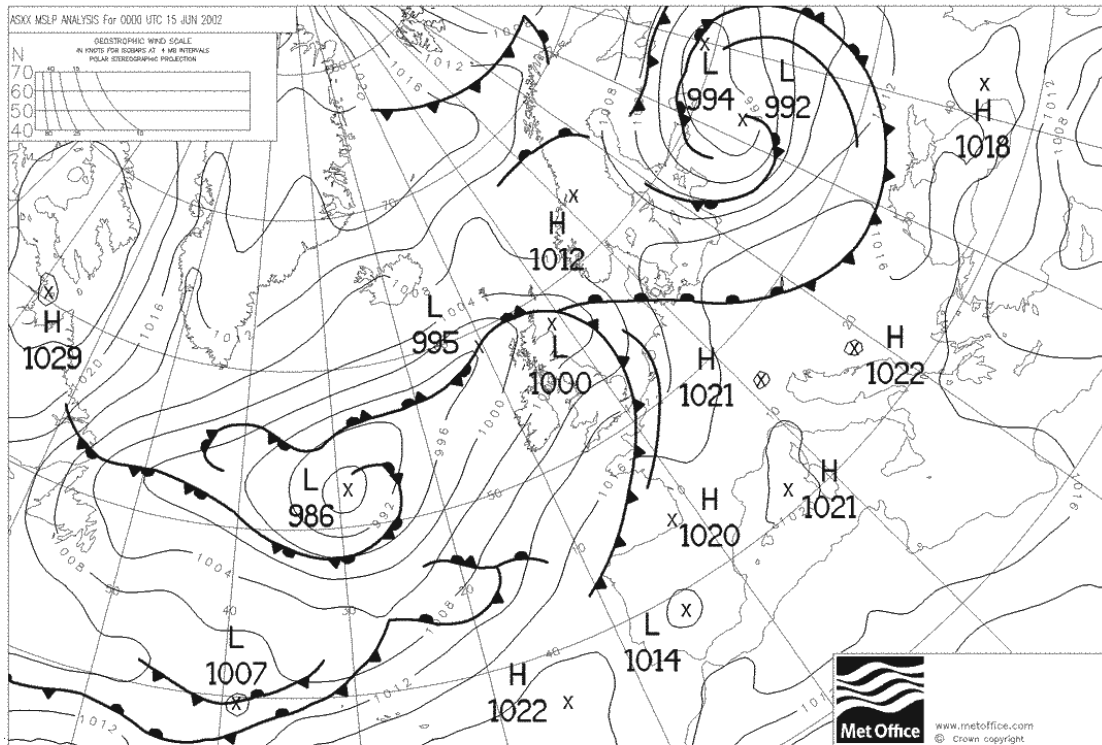
## Model

Het aangewende model is NCEP's (National Centers for Environmental Prediction) hydrostatisch Eta model (Janjic, 1994). De verticale resolutie is 45 niveaus, de horizontale is  $0.1^\circ$  bij  $0.1^\circ$  (ongeveer 10 km x 10 km), om zo goed mogelijk de mesostructuur te simuleren. Het model draait 24 uur vooruit met uitvoer elke 3 uur. De keuze voor een Amerikaans model lag voor de hand omdat we o.m. bevindingen uit Amerika wilden toetsen aan de Belgische situatie.

Veel onweders hebben een sub-grid schaal en de keuze van het convectieschema is dan ook zeer belangrijk. Er werd geopteerd voor het massa-flux Kain-Fritsch (KF) schema (Kain and Fritsch, 1993), omdat onderzoekers goede resultaten boekten bij zware onweders in de VS. Het schema is ontworpen om het verticale massatransport uit te voeren die onstabieliteit (CAPE) elimineert.

Diepe convectie (dwz met neerslag) wordt in dit model gegenereerd als er voldoende CAPE is, de convectieve wolk een minimale dikte heeft en er geen afdoende "cap" is (een kleine temperatuursinversie die het ontstaan van buien bemoeilijkt). Het KF-schema bevordert de rol van fysische processen op grid-schaal, die op hun beurt meer realistische mesoschaal fenomenen kunnen simuleren. Het zijn dergelijke fenomenen, zoals bijvoorbeeld windpatronen in de meso-omgeving van buien die

belangrijke informatie kunnen opleveren voor de meteoroloog bij het inschatten van de kans op zware rukwinden bij onweders.



Figuur 2. UKMO analyse van 15/06/02 om 0 UTC.

### Zwaar-weer variabelen

Naast een degelijk model dat een goede inschatting van de convectie kan bewerkstelligen, hebben we een aantal werktuigen nodig die meteorologen toelaten een idee te vormen van de aard en de intensiteit van eventuele onweersbuien. Er zijn een aantal modelvariabelen die nuttig kunnen gebruikt worden om een aantal eigenschappen van onweders te karakteriseren: de kans op rotatie en supercelvorming, de windpatronen op verschillende niveaus en de intensiteit van de convectie.

CAPE is de convectieve beschikbare potentiële energie en is een maat voor de potentiële onstabiele van de atmosfeer, met als definitie

$$CAPE = \int_{LFC}^{LOC} \left[ \frac{T_{deeltje} - T_{omgeving}}{T_{omgeving}} \right] g dz \quad (m^2 / s^2)$$

Tomgeving is de temperatuur van de omgeving van de wolk. Tdeeltje is de temperatuur van de natte adiabaat die een opstijgend verzadigd luchtdeeltje volgt vanaf het vrije convectieniveau LFC tot het evenwichtsniveau LOC, dat een benadering is voor de wolkeentop en g is de valversnelling. Toch moet zeer voorzichtig omgesprongen worden met CAPE als indicator voor zware windstoten. In

sommige felle onweders is de CAPE vrij laag in onze regio, vooral in de winter, terwijl toch soms schadelijke convectieve windstoten optreden.

Storm-relatieve heliceit (SREH) wordt gebruikt om de rotationele eigenschappen van onweders weer te geven. Rotatie is een belangrijk fenomeen bij tornado-ontwikkeling. Waarden van meer dan  $100 \text{ m}^2/\text{s}^2$  worden door Stensrud (1997) beschouwd als bevorderlijk voor supercelontwikkeling.

$$SREH = \int_0^h \mathbf{k} \cdot [\mathbf{V}(z) - \mathbf{c}] \times \frac{\partial \mathbf{V}(z)}{\partial z} dz \quad (\text{m}^2 / \text{s}^2)$$

$\mathbf{k}$  is de eenheidsvector in de verticale zin

$\mathbf{V}(z)$  is de windvector op hoogte  $z$

$\mathbf{c}$  is de stormvector

$h$  is de instroomdiepte (gekozen als 3000 m)

Vermits een modelgrid van  $0.1^\circ$  geen individuele stormen kan voorspellen, wordt de stormvector aangenomen op basis van Amerikaanse klimatologische gegevens. De stormvector wordt verondersteld ofwel  $30^\circ$  rechts van de gemiddelde (over  $h$ ) windrichting en 75% van de gemiddelde windsnelheid, indien de gemiddelde wolkensnelheid kleiner is dan 15 m/s, of  $20^\circ$  naar rechts en 80% van de gemiddelde windsnelheid in andere gevallen. De gemiddelde wolkensnelheid wordt benaderd door een gemiddelde dichtheidsgewogen wind te nemen van 850 tot 300 hPa.

Bulk Richardson number shear (BRNSHR) geeft de verticale windschering weer (Moncrieff and Green, 1972),

$$BRNSHR = 0.5 (\underline{u}^2 + \underline{v}^2) \quad (\text{m}^2 / \text{s}^2)$$

met

$\underline{u}$  ,  $\underline{v}$  : zonale and meridionale windcomponenten van het verschil tussen de dichtheidsgewogen winden van 6000 m en 500 m boven grondniveau. Voor de dichtheidsweging wordt de luchtdichtheid op elf niveaus tussen 6000 m en 500 m in acht genomen.

BRNSHR kan gebruikt worden als benadering van de storm-relatieve heliceit halverwege de troposfeer, dat een voorname rol speelt bij de mesocyclogenese op lagere hoogte (Brooks et al. (1994). Een waarde van  $40 \text{ m}^2/\text{s}^2$  wordt door hen als drempelwaarde genomen.

Craven and Brooks (2004) ontdekten een belangrijke parameter: de 0-1 km lage windschering (LOSHR). Dit is het vectorverschil tussen de wind op 1 km en de wind op 10 m.

$$LOSHR = |\mathbf{V}_{1\text{km}} - \mathbf{V}_{10\text{m}}| \quad (\text{m} / \text{s})$$

Een waarde van 10 m/s kan beschouwd worden als een drempelwaarde voor het optreden van tornado's (Craven and Brooks, 2004). Ze vonden ook een sterke correlatie tussen de hoogte van het 100 mb gemiddelde lift condensatie niveau (MLLCL) en de kans op windhozen. MLLCL hoogten beneden 1000 m worden

geassocieerd met hogere grenslaagvochtigheden en blijken tornado-ontwikkeling te stimuleren.

De auteur denkt dat de verticale snelheid (VV), door het model berekend in Pa/s, op 500 hPa ook belangrijk is en gebieden van intense updrafts weergeeft, vooral als een massaflux convectie schema, als Kain-Fritsch wordt gebruikt. Hoe negatiever VV, hoe sterker de updraft. Een voldoende sterke updraft is een nodige voorwaarde voor de ontwikkeling van een windhoos. Sterke updrafts bevorderen vaak ook zware windstoten, maar niet altijd. Sommige buien met een sterke updraft resulteren bijvoorbeeld soms enkel in zware neerslag met eventueel hagel, maar zonder merkbare windstoten aan de grond. De berekende VV is dus op zich geen indicator voor zware rukwinden en de waarde ervan is bovendien sterk afhankelijk van de wijze waarop convectie behandeld wordt in het model. Het dient hier vooral om plaatsen met verwachte intense convectie aan te duiden. Men zou ook kunnen denken dat neerslagvelden een goede indicatie zijn voor de intensiteit van convectie, maar bvb bij voldoende wind zijn de neerslagaccumulaties in zware buien eerder klein, terwijl toch zware windstoten kunnen optreden. Er werd na vergelijking van enkele zware onweders met windschade in België een drempelwaarde van -3 Pa/s naar voor geschoven.

Elk van de voorgestelde zwaar-weer variabelen kunnen op zich alleen niet direct uitsluitel geven over het al dan niet optreden van zware rukwinden, vermits ze elk verschillende facetten ervan weergeven (windschering op diverse niveaus, convectie-intensiteit,...). Een geschikte combinatie van die variabelen is wel interessant.

De zwaar-weer variabelen worden zo gecombineerd dat de drempelwaarde van de combinatie 1 is. De drempelwaarden komen uit de vermelde literatuur en eveneens uit ervaringen met het Kain-Fritsch convectie schema in België. De tornado/downburst parameter (STP: *Significant Tornado Parameter*) is dan

$$STP = VV \cdot \left(-\frac{1}{3}\right) \cdot \frac{LOSHR}{10} \cdot \frac{BRNSHR}{40}$$

De STP wordt enkel berekend in roosterpunten waar voldoende onstabieleit is voor onweders (lifted index kleiner dan 1), om het aantal valse alarmen te drukken. Door de VV op te nemen speelt het convectieschema een grote rol en dat kan in sommige gevallen nadelig zijn als de convectie minder goed voorspeld is. Het is dan ook zaak om de zwaar-weer variabelen ook apart te beoordelen en niet zwart-wit de STP-index te volgen. De SREH wordt gedeeltelijk bepaald door Amerikaanse klimatologische onderstellingen en wordt in de STP vervangen door BRNSHR, die dezelfde soort informatie levert en niet op onderstellingen gebaseerd is.

Doordat zwaar weer in combinatie met windhozen niet elke dag optreedt enerzijds, en de (computer)tijd en soms ook betrouwbare hooswaarnemingen ontbraken om een statistisch zinvolle reeks te ontwikkelen anderzijds, werd niet gekozen voor een statistische aanpak, maar werd de index zo bepaald dat er in tien onderzochte gevallen zo goed mogelijke resultaten werden bereikt én dat het aantal valse alarmen wordt beperkt.

Een succesvolle voorspelling wordt hier bepaald als één waar een tornado/downburst parameter minstens 1 is in een straal van 50 km rond de observatieplaats.

In de VS wordt een andere significante tornado parameter aangewend, gebaseerd op CAPE, SREH, BRNSHR, MLLCL (*Mixed Layer Lifting Condensation Level*) and LOSHR (Thompson et al., 2003).

$$US\ STP = \frac{CAPE}{100} \cdot \frac{BRNSHR}{40} \cdot \frac{SREH}{150} \cdot \frac{2000 - MLLCL}{1500}$$

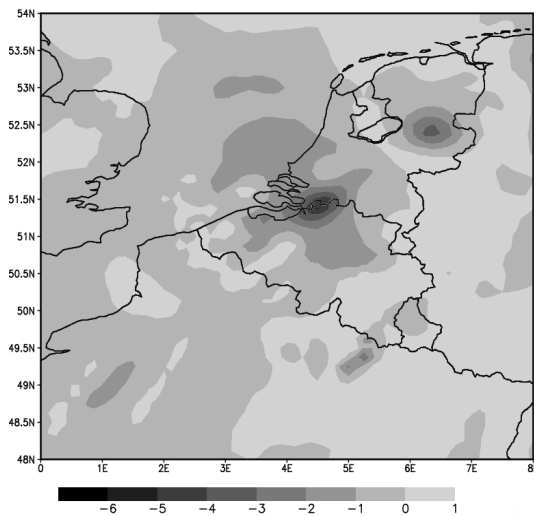
De redenen om die oorspronkelijke index aan te passen zijn als volgt:

\*CAPE en MLLCL zijn meestal slechte indicatoren in België. Ze behandelen meer de thermodynamische aspecten (vochtigheid, onstabiele lucht) die sterk verschillen in de VS en België.

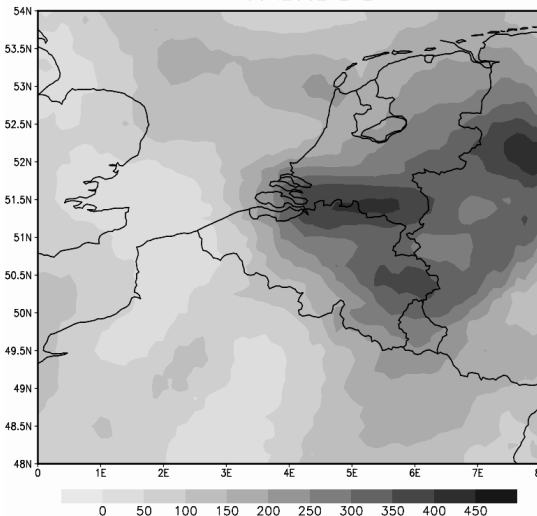
\*De windscheringsparameters LOSHR and BRNSHR werden weerhouden, omdat ze een goede fysieke beschrijving geven van de processen in tornado's/downbursts. Windschering speelt een rol in de ontwikkeling van elke supercel tornado, zoals theoretisch bewezen wordt door Rotunno en Klemp (1981).

### Geval studie

In de late avond van 4 juni 2002, werd de regio tussen Heist-op-den-Berg, Keerbergen en Westerlo (in de provincie Antwerpen) getroffen door zware onweders met schadelijke rukwinden. Het radarbeeld (figuur 1) toont felle echo's net ten zuiden en zuidoosten van de stad Antwerpen.



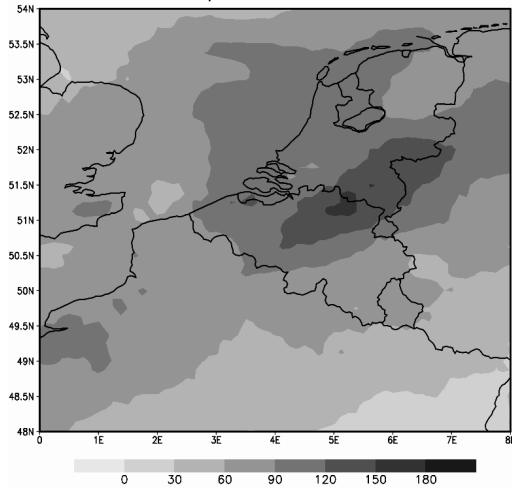
**Figuur 3.** Prognose van het Eta-model 500 hPa verticale snelheid (VV in Pa/s) op 14/06/02 21 UTC.



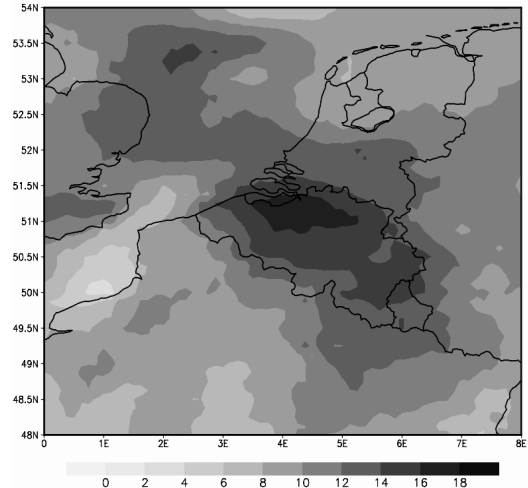
**Figuur 4.** Eta +9h voorspelling van de storm-relatieve heliceit ( SREH in  $m^2/s^2$ ) voor 14/06/02 21 UTC.

### Synoptische situatie

Een Schots lagedrukgebied stuurt warme maar onstabiele lucht uit het zuiden naar België (figuur 2). Voor het koufront uit zit er nog een actieve buienlijn, waarop de onweders ontstaan.



**Figuur 5.** Eta +9h voorspelling van de Bulk Richardson Number Shear (BRNSHR in  $m^2/s^2$ ) voor 14/06/02 21 UTC.



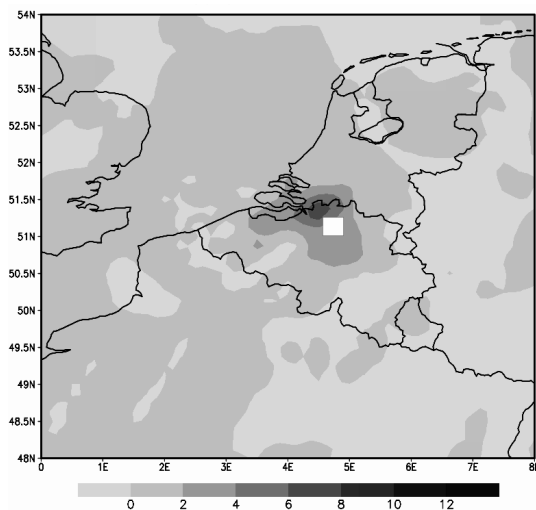
**Figuur 6.** Eta +9h voorspelling van de 0-1 km lage windscherping (LOSHR in m/s) voor 14/06/02 21 UTC.

**Mesoschaal situatie**

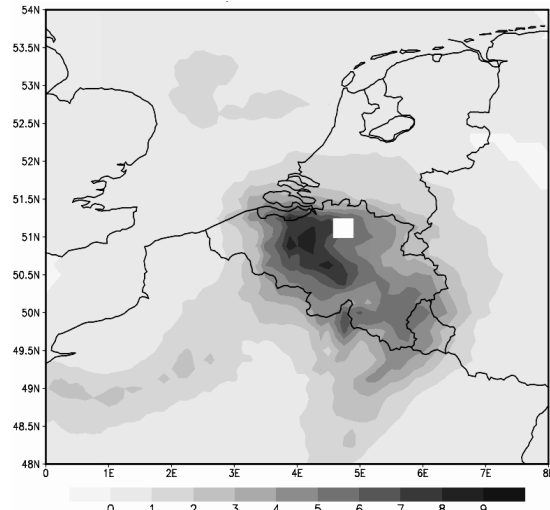
De 500 hPa verticale snelheid is groot in het gebied rond Antwerpen (figuur 3) en indiceert grote stijgbewegingen op die roosterpunten, die wijzen op het ontstaan van zware buien.

Zeer grote waarden van SREH in figuur 4 vallen op in het noorden van België en die wijzen op een grote kans op supercelontwikkeling.

De BRNSHR is in figuur 5 ook zeer hoog, tussen 100 and 150  $m^2/s^2$ , wat wijst op een grote windscherping tussen de lage en middelhoge atmosfeer. Dit is beduidend groter dan de drempelwaarde van 40  $m^2/s^2$ .



**Figuur 7.** Eta +9h voorspelling van de tornado/downburst parameter (STP) voor 14/06/02 21 UTC en lokatie windschade (wit vierkantje). De STP-waarde is maximaal in de omgeving van de windhoos-waarneming.



**Figuur 8.** Eta +9h voorspelling van significante tornado parameter (US STP) voor 14/06/02 21 UTC en lokatie windschade (wit vierkantje).

De low-level schering (LOSHR) is in figuur 6 ook zeer hoog (16-17 m/s, ruim boven de “drempel” van 10 m/s voor tornado’s).

De resulterende significante tornado parameter in figuur 7 is zeer hoog, zodat zware convectieve rukwinden in de provincie Antwerpen mogelijk zijn volgens het model.

De US STP prognose in figuur 8 is ook zeer hoog, maar suggereert een risico in een groter gebied, verder verwijderd van de plaats van de waarneming.

### **Beknpte conclusie voor dit geval**

Het Eta model voorspelde in dit geval keurig de zware convectie. De windscheringsvariabelen tonen alarmerende waarden. Op basis van deze kaarten heeft de auteur een waarschuwing voor zeer zware windstoten uit de KMI-weerkamer gestuurd. De STP-parameter duidde correct het gebied aan waar schade mogelijk was. De US STP week daar meer van af, maar was eveneens nuttig.

### **Uitbreiding naar andere onweerssituaties**

Natuurlijk werd de methode toegepast op meerdere situaties, waarvan enkele resultaten in tabel 1 werden samengevat. De selectie van de bestudeerde gevallen is gebaseerd op het voorkomen van zware onweders/neerslag met of zonder (betrouwbaar) gemelde windschade, om naast de detectiemogelijkheden ook de eventuele valse alarmen te bekijken. Ooggetuigen- en mediaverslagen hebben mee geholpen bij het selecteren, al blijft het moeilijk om met 100% zekerheid te zeggen dat er geen windschade was als een fel onweer over een verlaten plek trok, e.g. een Ardens bosgebied bij nacht.

De waarden van de belangrijkste variabelen in de buurt van zware onweders worden per geval weergegeven. Een voorspelling wordt als goed beschouwd als de STP-index minstens 1 is in een straal van 50 km rond de waargenomen windschade. Voor de gevallen die met de NCEP reanalysegegevens (Kalnay et al., 1996) werden doorgerekend (1967 en 1982), werd de straal opgetrokken tot 100 km, omdat de resolutie van deze data 2,5° is en ook de verticale resolutie veel minder is. In de tabel wordt eveneens geconcludeerd of de indexen STP en US STP richtinggevend zijn voor alarmering.

De drempelwaarden voor alle componenten van de STP zijn

VV : -3 Pa/s  
BRNSHR: 40 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>  
LOSHR: 10 m/s

Waarbij de lifted index (LI) < 1 moet zijn, anders is er geen alarm mogelijk (wegens een te kleine kans op onweer).

De STP-parameter is hier in 8 van de 10 gevallen betrouwbaar, de US STP in 5 van de 10 en geeft ook iets vaker vals alarm. De US STP parameter is ontworpen om de kans op windhozen in te schatten in een omgeving waar zware onweders mogelijk zijn. De STP-index dient voornamelijk om regio’s te gaan specificeren met een grotere kans op windschade en is meer afhankelijk van het convectieschema (wegens de afhankelijkheid van de stijgsnelheid op 500 hPa) en dient dus voorzichtig

geïnterpreteerd te worden. In combinatie met een degelijke convectiebehandeling, blijken de resultaten toch vaak niet onaardig te zijn, uiteraard zonder te beweren dat expliciete windhoos-voorspellingen mogelijk worden!

datum	VV/ LI	BRNSHR	LOSHR	STP	US STP	Forecast
14/08/99	-8 / <1	50	10	3/alarm	<1/no alarm	goed
18/03/02	-0.5 / <1	170	19	1.3/limiet	2/alarm	limiet
14/06/02	-12 / <1	130	17	22/alarm	8/alarm	goed
15/09/00	-6 / <1	50	8	2/alarm	<1/no alarm	goed
17/07/04	-4 / <1	50	14	2.3/alarm	<1/no alarm	goed
25/06/67	-15 / <1	90	30	33/alarm	100/alarm	goed
22/09/82	-3 / <1	35	12	1/limiet	1/limiet	limiet
14/09/98	-1 / >1	50	15	<1/no alarm	<1/no alarm	goed
20/06/02	-4 / >1	80	13	<1/no alarm	15/vals	goed
03/08/02	-2 / <1	20	5	<1/no alarm	1-2/vals	goed

**Tabel 1.** Relevante tornado/downburst parameters voor een aantal cases.

## Conclusie

Er werd al op gewezen dat het succes van deze methode sterk afhankelijk is van de kwaliteit van het convectieschema. Het Kain-Fritsch schema haalt behoorlijke resultaten, maar is uiteraard niet perfect. Indien de convectie in een bepaalde situatie onrealistisch wordt weergegeven in het model, wordt het veel moeilijker om enkel op basis van de STP-index een afweging te maken. Daarom is het belangrijk de componenten van de STP-index ook apart te beoordelen en hun waarden, indien mogelijk, te vergelijken met waarnemingen. Die componenten hebben een duidelijke fysische betekenis, waardoor de interpretatie meer inzichten met zich meebrengt dan het gebruik van drempelwaarden ("magic numbers") van zwaar-weer variabelen die enkel op Amerikaanse leest geschoeid zijn en niet noodzakelijk goede inzichten opleveren in België en buurlanden.

Het hoeft niet gezegd dat perfectie niet moet gezocht worden in deze methode en er nog veel onderzoek nodig is om het ontstaan en ontwikkelen van zware convectieve windstoten te begrijpen en te voorspellen. Dit werk is niet meer dan een voorzichtige en bescheiden poging, een sprong in het bad, om de capaciteit te testen van een mesomodel als signaalgever naar de operationele meteoroloog toe, bij dergelijk onheil. Bovendien leek het interessant om na te gaan of Amerikaanse methoden, mits wat aanpassing, ook voor België en omliggende landen kunnen aangewend worden. Uit tabel 1 blijkt dat dit vaak het geval is, wat verdere inspanningen aanmoedigt.

Het zou mooi zijn als we enkele van die zwaar-weer indicatoren (vooral de windscheringsvariabelen) betrouwbaar en op kleine schaal zouden kunnen meten met radar of satelliet, én die resultaten in real-time ter beschikking stellen van operationele meteorologen, bvb gesuperponeerd op een neerslagradarbeeld, zodat windpatronen in een onweersbui beter in kaart kunnen worden gebracht. Vooral voor de gedetailleerde nowcasting van risico's op schadelijke rukwinden in onweders zou dit interessant worden én bovendien een schat aan meetgegevens opleveren die we nu mankeren om de STP-methodiek bij te sturen bij afwijkingen tussen model en realiteit. Het zou ook meer duidelijkheid kunnen scheppen bij het helpen uitklaren of er al dan niet windhozen of valwinden zijn opgetreden door vergelijking van radarbeelden en waarnemingen van windschade.

Als de komende jaren meer en meer modellen niet-hydrostatisch worden en de convectie beter wordt behandeld met fijnmazigere modellen of meer expliciet wordt berekend, zal de methode opnieuw moeten geëvalueerd en desnoods aangepast worden, vooral mbt de inschatting van de convectie-intensiteit. De windscheringsparameters zullen meer dan waarschijnlijk een grote rol blijven spelen in toekomstige prognosemethodieken, vermits ze opvielen door o.m. waargenomen ballonpeilingen in de buurt van windhozen te analyseren en bovendien ook in theoretische modellen naar voor komen als een noodzaak bij windhozen.

## Literatuur

- Brooks, H.E., C.A. Doswell III, and J. Cooper, 1994. On the environments of tornadic and non-tornadic mesocyclones. *Wea. Forecasting*, **9**, 606-618.
- Brooks, H. E., J. P. Craven, and J. W. Lee, 2002: Synthetic severe weather climatologies from sounding parameters. Abstracts, European Conference on Severe Storms 2002, Prague, Czech Republic, 13.
- Brooks, H.E., 2004. Estimating the distribution of severe thunderstorms and their environments around the world. *Preprints*, International Conference on Storms, Brisbane, Queensland, Australia.
- Craven, J. P., and H. E. Brooks, 2004. Baseline climatology of sounding derived parameters associated with deep, moist convection. *Nat. Wea. Digest*, **28**, 13-24
- Dotzek, N., 2003. An updated estimate of tornado occurrence in Europe. *Atmos. Res.* **67-68**, 153-161.
- Janjic, Z.I., 1994. the step-mountain Eta coordinate model. further developments of the convection, viscous sublayer and turbulence and closure schemes. *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 927-945.
- Kain, J.S. and J.M. Fritsch, 1993. Convective parameterization for mesoscale models. The Kain-Fritsch scheme. The Representation of Cumulus Convection in Numerical Models, Meteor. Monogr., No. 46, *Amer. Meteor. Soc.*, 165-170.
- Moncrieff, M.W., Green, J.S.A., 1972 . The propagation and transfer properties of steady convective overturning in shear. *Q.J.R. Meteor. Soc.* **122**, 73-119.
- Rotunno, R. and Klemp, J.B., 1981. The Influence of the shear-induced pressure gradient on thunderstorm motion. *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 136-151.
- Stensrud D.J., Cortinas J.V., Brooks H.E., 1997. Discriminating between Tornadic and Nontornadic Thunderstorms Using Mesoscale Model Output. *Wea. Forecasting*, **12**, 613-632.
- Thompson, R.L., J.A. Hart, K.L. Elmore, P. Markowski, 2003. Close proximity soundings within supercell environments obtained from the Rapid Update Cycle. *Wea. Forecasting*, **18**, 1243-1261.