

Betere verwachtingen voor Europa door observatieplanning op basis van gevoeligheidsanalyses

G.J. Marseille (ECMWF/KNMI)

March 2001

Fouten in numerieke weersverwachtingen worden veelal veroorzaakt door evolutie van fouten in de beginanalyse en in mindere mate door modelfouten. Locaties waar relatief kleine fouten in de beginanalyse snel groeien en evolueren tot grote fouten in tweedaagse weersverwachtingen worden aangeduid als gevoelige gebieden. Dit artikel beschrijft hoe gevoeligheidsstudies gebruikt kunnen worden om zwakke punten in het huidige waarnemingsnetwerk bloot te leggen. Voor EUMETNET (European Meteorological Network) zijn gevoeligheidsstudies uitgevoerd voor het Europese continent voor 3 maanden in de zomer van 1999 en 3 maanden in de winter van 1999/2000. Door over een langere periode gevoelige gebieden dagelijks te bepalen is een beeld verkregen van locaties waar fouten in de beginanalyse gemiddeld een grote impact hebben op de kwaliteit van weersverwachtingen voor Europa. De resultaten hebben geleid tot aanbevelingen aan EUMETNET voor de planning van extra waarnemingssystemen in gevoelige gebieden om te komen tot een meer optimale inzet van de huidige beschikbare waarnemingssystemen voor tweedaagse weersverwachtingen voor Europa.

Het gebrekkige waarnemingsnetwerk boven de oceanen

Een optimaal waarnemingsnetwerk behelst, intuïtief, een uniforme verdeling van waarnemingen in de 3-dimensionale ruimte. De voornaamste reden om het huidige waarnemingsnetwerk onder de loep te nemen is het "gat" boven de Noord Atlantische Oceaan. Het netwerk boven oceanen wordt gedomineerd door waarnemingen op een hoogste niveau, namelijk vliegtuigwaarnemingen op grote hoogte en oppervlaktewaarnemingen middels boeien, schepen en satellieten. Satellietwaarnemingen leveren een uniforme verdeling, echter de huidige operationele instrumenten (TOVS voor verticale profielen van temperatuur en vocht, SSMI voor vochtprofielen, SATOB voor winden uit wolkenverplaatsingen en scatterometer voor windmetingen aan het zeeoppervlak) leveren onvoldoende informatie voor een nauwkeurige analyse van de atmosferische dynamica. Een potentiële toekomstige kandidaat is een Doppler wind lidar, die gekoppeld aan een satelliet, een 3-dimensionale globale bedekking van windprofielen oplevert met een horizontale resolutie van enkele honderden kilometers en een verticale resolutie van minder dan een kilometer (ESA, 1999). Het zal echter nog ongeveer 10 jaar duren voordat een dergelijk systeem operationeel zal zijn. Op korte termijn valt niet te verwachten dat nieuwe satellieten het gat in het huidige waarnemingsnetwerk zullen dichten. Het waarnemingsnetwerk van zogenaamde profilers zoals radiosondes, die hoge resolutie verticale profielen meten van temperatuur, wind en vocht, vormt nog altijd de ruggegraat voor de huidige numerieke weersverwachting. Het radiosondenetwerk kent een grote ruimtelijke dichtheid boven het Europese continent en een "gat" op de Atlantische Oceaan, zie figuur 1.

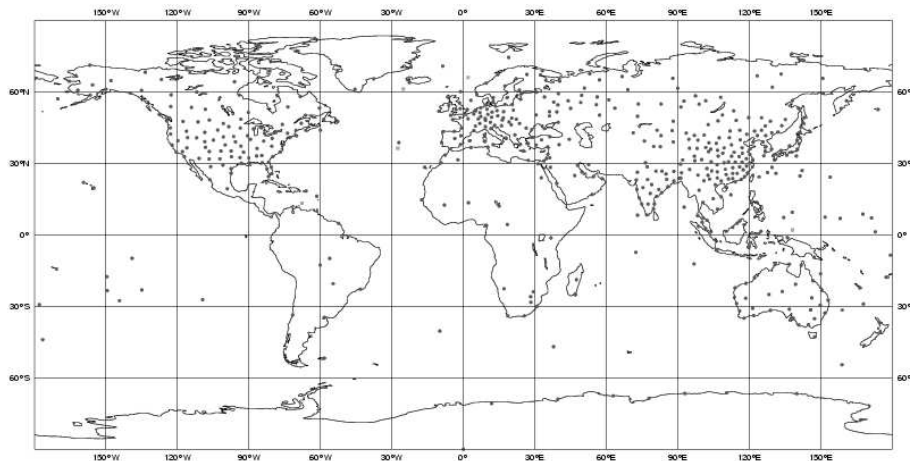


Figure 1: Het radiosonde waarnemingsnetwerk op 5 december 2000, 12 UTC toont een lage dichtheid boven de oceanen.

Onder de vlag van EUMETNET worden binnen het EUCOS (EUMETNET Composite Composite Observing System, zie ook <http://www.eumetnet.org>) programmastudies uitgevoerd met als doel te komen tot een verbetering van de kwaliteit van weersverwachtingen voor Europa door te streven naar een zo uniform mogelijk netwerk van waarnemingen boven het Europese continent en de omliggende gebieden. Belangrijke randvoorwaarde is dat de kosten van een eventueel nieuw te vormen waarnemingsnetwerk niet de kosten van het huidige netwerk overstijgen. Het basisidee is om het netwerk van profilers op het Europese continent te reduceren en de kostenbesparingen hiervan te gebruiken voor het inzetten van extra waarnemingssystemen in de aangrenzende gebieden met een lage observatiedichtheid, zoals de Atlantische Oceaan, het Middellandse Zee gebied en Noord Afrika. Het terugdringen van het radiosondenetwerk op het Europese continent dient met grote zorg en voorzichtigheid te gebeuren. Studies uitgevoerd op het ECMWF (European Center for Medium-range Weather Forecast) laten zien dat een reductie van het radiosondenetwerk in combinatie met een meer homogene verdeling van de beschikbare radiosondes, gemiddeld, niet leidt tot een lagere kwaliteit van middellange termijn (tot 5 dagen) verwachtingen voor Europa en de aangrenzende continenten.

Voor de inzet van extra waarnemingssystemen kan men denken aan schepen en vliegtuigen die uitgerust zijn met instrumenten voor het meten van verticale profielen van wind, vocht en temperatuur. Hiermee gaan relatief hoge kosten gepaard, zodat slechts een beperkte inzet mogelijk is. Waar deze systemen het beste kunnen worden ingezet is onderzocht met gevoeligheidsstudies.

Gevoeligheidsstudies

De grote meteorologische onderzoeksinstituten gebruiken gevoeligheidsstudies als diagnostisch gereedschap voor de analyse van fouten in weersverwachtingen. In gevoeligheidsstudies rekent men de fout in de verwachting terug in de tijd naar het begintijdstip van de verwachting. Vervolgens wordt een optimale correctie van de beginanalyse berekend die de fout in de verwachting minimaliseert. Aangenomen wordt dat het weermodel perfect is en dat fouten in de verwachting het gevolg zijn van de evolutie van fouten in de beginanalyse. Gevoeligheids-

studies detecteren aldus fouten in de beginanalyse die het snelst groeien in de tijd (Rabier, 1996). De geografische locaties van deze analysefouten worden aangeduid als gevoelige gebieden. Fouten in de beginanalyse ontstaan door een combinatie van fouten in het achtergrondveld (first-guess) en een lage dichtheid aan kwalitatief goede waarnemingen. Het beter observeren van gevoelige gebieden kan leiden tot betere analyses. Gevoeligheidsstudies kunnen aldus gebruikt worden voor observatieplanning om te komen tot een optimale inzet van extra waarnemingsystemen.

Op het ECMWF worden gevoeligheidsstudies dagelijks routinematig geproduceerd voor het analyseren van fouten in verwachtingen op het Noordelijk halfrond. De theorie van gevoeligheidsstudies en de implementatie op het ECMWF zijn beschreven in de bijlage. Vooral in extreme situaties met grote sociale en economische gevolgen die volledig werden gemist in de operationele verwachtingen kunnen gevoeligheidsstudies de zwakheden van het waarnemingsnetwerk blootleggen.

Kerstmisstormen

Een goed voorbeeld hiervan zijn de kerstmisstormen van 1999 die uitvoerig zijn beschreven in (Tijm, 2000). Figuur 2a toont de operationele ECMWF analyse van de gronddruk van 27 december 1999. De depressie ten westen van Bretagne met een druk van 982 hPa werd volledig gemist in de tweedaagse verwachting, zie figuur 2b. Een gevoeligheidsstudie van deze

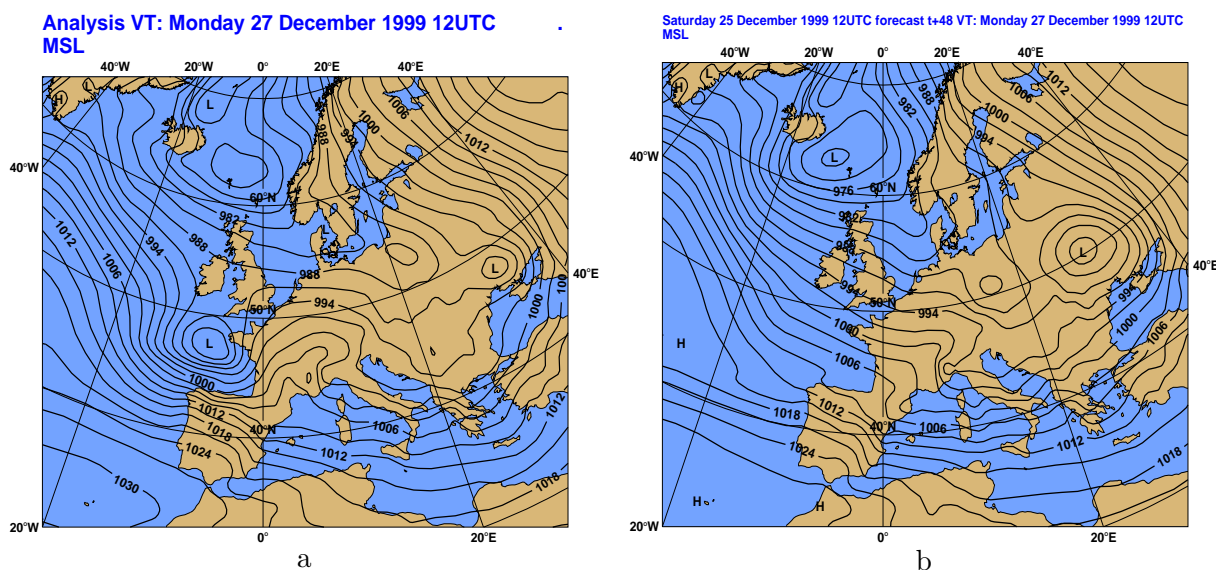


Figure 2: a) Operationele ECMWF analyse van de grondruk op 27 december 1999, 12 UTC. b) Operationele tweedaagse verwachting van de grondruk genitialiseerd op 25 december, 12 UTC.

situatie toont de meest gevoelige gebieden rond 700 hPa boven de Noord Atlantische Oceaan voor de Noord-Amerikaanse kust in figuur 3a. De correcties zijn weliswaar klein in amplitude (maximaal 1 m/s voor de wind en 2 graden Celsius voor temperatuur) maar groeien snel, typisch met een factor 10 tot 15 in 48 uur (Klinker, 1998). De verwachting genitialiseerd met de gecorrigeerde analyse toont de depressie op de juiste locatie met een minimum druk van 987 hPa in figuur 3b. Dit voorbeeld laat zien dat een relatief kleine aanpassing van de

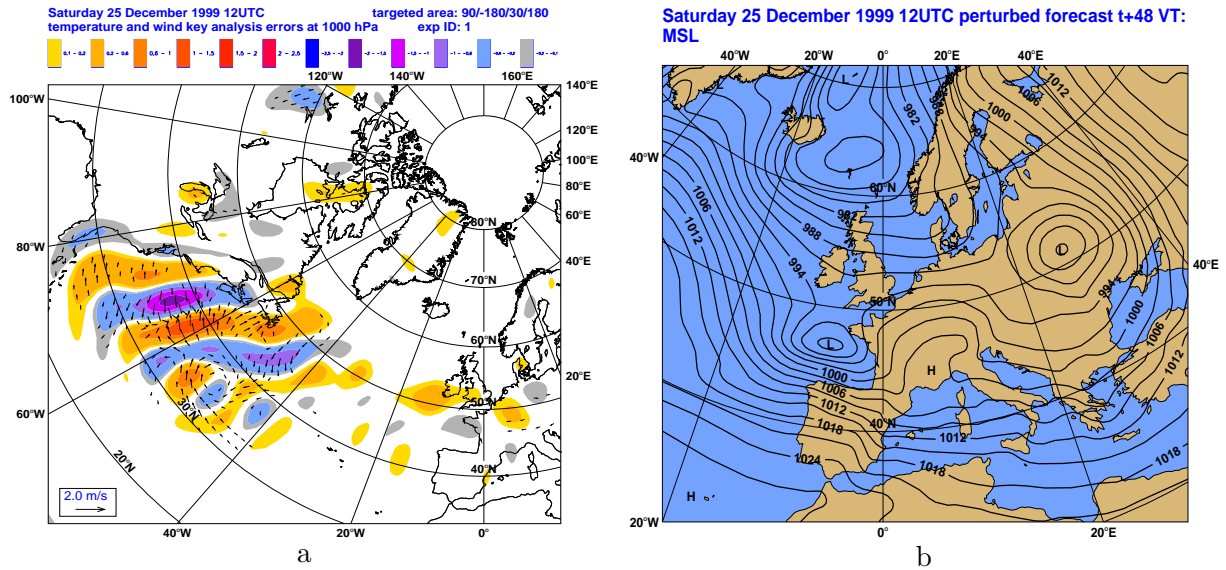


Figure 3: a) 700 hPa key analysis errors voor wind (pijlen) en temperatuur (contouren). De maximale correctie voor de wind is 1 m/s en 2C voor temperatuur. Het contour interval is 0.2C. Gesloten/open contouren vertegenwoordigen een positieve/negatieve correctie voor de temperatuur. b) Tweedaagse verwachting van de gronddruk genitialeerd met de operationele analyse van 25 december gecorrigeerd voor de key analysis errors.

beginanalyse zou hebben geleid tot een betere verwachting van de kerstmisstormen.

Klimatologieën van gevoelige gebieden

Het doel van EUCOS is om te komen tot een optimaal waarnemingsnetwerk voor de tweedaagse numerieke weersverwachting voor Europa. Men is niet slechts genteresseerd in extreme situaties, maar in een netwerk dat gemiddeld betere verwachtingen oplevert dan het huidige netwerk. Zwakke punten in het huidige netwerk kunnen worden blootgelegd door gevoeligheidsstudies uit te voeren over een langere periode. Gekozen is voor drie zomer- en wintermaanden namelijk juni, juli, augustus 1999, en november, december 1999, januari 2000. Deze perioden omvatten een breed scala aan weerregimes en worden representatief verondersteld voor zomer en winterperioden in het algemeen. Voor opeenvolgende dagen in deze perioden zijn gevoelige gebieden bepaald voor twee doelgebieden die Noord-Europa (10W-35W, 45N-65N) en Zuid-Europa (10W-35W, 30N-50N) vertegenwoordigen. Voor beide doelgebieden zijn dagelijks correcties voor wind, temperatuur en gronddruk op fysisch correcte wijze opgeteld, identiek als in de totale-energie norm (zie bijlage), en verticaal gentregeerd over de lagere (gronddruk - 700 hPa) midden (700-350 hPa) en hogere (350-200 hPa) troposfeer. De resulterende gevoelige gebieden worden gemiddeld over drie maanden om te komen tot klimatologieën van gevoelige gebieden voor Noord- en Zuid-Europa. Figuur 4a toont de meest gevoelige gebieden voor Noord-Europa in de winter op de Noord-Atlantische oceaan voor de Amerikaanse kust en richting Groenland. Figuur 4b toont de meest gevoelige gebieden voor Zuid-Europa in de zomer op de Atlantische oceaan ter hoogte van Europa en Noord-Afrika en boven het Europese continent. Overige klimatologieën zijn te vinden in (Marseille, 2001) en kunnen als leidraad dienen om te komen tot een optimaal waarnemingsnetwerk voor korte termijn

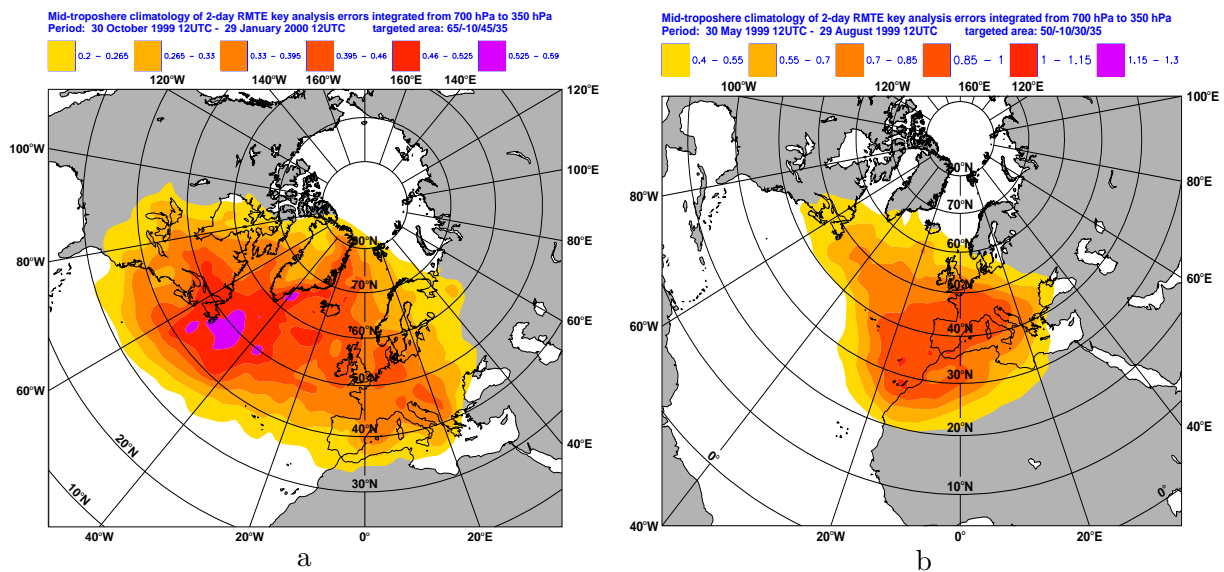


Figure 4: a) Mid-troposfeer winterklimatologie van gevoelige gebieden voor de tweedaagse weersverwachting voor Noord-Europa. b) Mid-troposfeer zomerklimatologie van gevoelige gebieden voor de tweedaagse weersverwachting voor Zuid-Europa. Correcties voor de beginanalyse zijn uitgedrukt in de totale-energie norm. Zie tekst voor details. Het contour interval is $0.1 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

weersverwachtingen voor Europa. Geografische locaties van belang voor verbeteringen in de tweedaagse verwachting voor Europa zijn:

- De Noord-Atlantische oceaan vanaf 20 graden Noorderbreedte tot en met Groenland, Spitsbergen en de Noordpool.
- Noord Amerika en Canada ten oosten van 100 graden Westerlengte
- Het Europese continent
- Het Middellandse Zee gebied
- Noordwest Afrika met Marokko, Algerije, Senegal en Kaap Verdie.

Extremen in de klimatologieën bevinden zich een band tussen 20 en 60 graden Noorderbreedte dat zich uitstrekt van de Noord-Amerikaanse oostkust tot aan de Alpen, het gebied tussen Groenland en IJsland (vooral in de winter) en het gebied tussen Madera, de Kanarische eilanden en het Marokkaanse Atlas gebergte (Zuid-Europa in de zomer). Gevoelige gebieden liggen in de zomer dicht bij Europa dan in de winter. Dit is in overeenstemming met de gemiddelde atmosferische stroming die in de wintermaanden sterker is en van Amerika naar Europa gericht. In de verticaal bevinden de meest gevoelige gebieden zich in de mid-troposfeer tussen 400 en 700 hPa en zijn ze minder intensief aan het oppervlak en boven de tropopauze.

Aanbevelingen voor observatieplanning

De conclusies uit de klimatologieën zijn niet direct te vertalen naar een observatieplanning voor een optimale inzet van extra waarnemingssystemen. De beperkingen van gevoeligheid-

studies in dit verband dienen in ogenschouw genomen te worden zoals i) de te optimistische aanname van perfecte weermodellen, ii) de keuze van de norm in de diagnostische functie, die niet uniek is en waarin luchtvochtigheid niet expliciet als fysische parameter wordt meegenomen en iii) het lage resolutie adjoint model waardoor gevoeligheidsstudies zich vooral concentreren op de correctie van fouten van grootschalige atmosfeerstructuren.

De grootste beperking van gevoeligheidsstudies is dat geen rekening wordt gehouden met de specifieke eigenschappen van het operationele data-assimilatiesysteem. De interactie tussen extra waarnemingen en (de statistische eigenschappen van) het achtergrondveld (first-guess) wordt niet meegenomen. Er is daarom geen garantie dat berekende correcties van de operationele analyse ook daadwerkelijk kunnen optreden in de praktijk. Bovendien is uit o.a. de FASTEX en NORPEX experimenten (impact studies van extra radiosonde waarnemingen in van tevoren bepaalde gevoelige gebieden) gebleken dat extra waarnemingen in gevoelige gebieden niet altijd de meeste informatie opleveren. Gevoeligheidsstudies geven ook geen uitsluitsel over de vereiste waarnemingsdichtheid van de te bemonsteren gevoelige gebieden. Gemiddeld zijn zo'n 10 extra radiosondes (tweemaal daags opererend) in de Noord-Atlantische oceaan nodig om een significante impact te genereren. Tenslotte, niet alleen extra waarnemingen kunnen de beginanalyse ter plaatse verbeteren, ook een verbetering van de first-guess door extra waarnemingen stroomopwaarts van gevoelige gebieden geeft een betere beginanalyse. Convectieve gebieden bijvoorbeeld worden niet gedetecteerd met de huidige gevoeligheidsstudies, maar bekend is dat analysefouten in deze gebieden zeer snel groeien in de tijd. Een betere observatie van deze gebieden levert mogelijk een betere first-guess in gebieden die mogelijk als potentieel gevoelig zijn bestempeld.

Bovenstaande beperkingen geven aan dat een exacte aanbeveling over de inzet van extra waarnemingssystemen (welke fysische parameter, welke verticale resolutie en op welke schaal) niet mogelijk is op grond van de klimatologieën van gevoelige gebieden. Op basis van de klimatologieën en data-assimilatie ervaring zijn aan EUMETNET de volgende aanbevelingen gedaan om te komen tot een beter waarnemingsnetwerk voor korte termijn weersverwachtingen voor Europa:

- Een dichter waarnemingsnetwerk op geografische locaties aangegeven door de klimatologieën van gevoelige gebieden.
- In de verticaal concentreren op de mid-troposfeer. Hoge en lage atmosfeerlagen worden al goed bemeten door vliegtuigen, boeien en scatterometer satellieten.
- De grootste impact van extra waarnemingssystemen valt te verwachten in gebieden met een lage observatie dichtheid, d.w.z. een afstand tussen opeenvolgende waarnemingen in de horizontaal groter dan 100 km en in de vertikaal groter dan 50 hPa.
- Ook Europa is een gevoelig gebied zodat reductie van het huidige radiosonde netwerk op het Europese continent met de grootste zorg dient te geschieden.
- De kwaliteit van de extra waarnemingen moet beter zijn dan de fouten in het achtergrondveld.
- Een grotere observatiedichtheid in gebieden die bekend staan als convectief.

Literatuur

ESA, The Atmospheric Dynamics Mission, report for mission selection of the four candidate earth explorer missions, July 1999

Klinker, et al., Estimation of key analysis errors using the adjoint technique, Q.J.R. Meteorol. Soc. (1998) vol. 24, pp 1909-1933.

Marseille, G.J., Climatologies of sensitive areas for Short-term Forecast Errors over Europe, ECMWF Technical Memorandum, no 334, 2001.

Rabier et al., Sensitivity of forecast errors to initial conditions, Q.J.R. Meteorol. Soc. (1996) vol.122, pp 121-150.

Tijm, S., HIRLAM en de kerstmisstormen, Meteorologica, 9 (1), 2000

Bijlage: Gevoeligheidsstudies op het ECMWF

Uitgangspunten van een gevoeligheidsanalyse zijn een beginanalyse, x_0 , op tijdstip t_0 , een weermodel, F , dat de analyse voorwaarts in de tijd integreert over een interval Δt , de verificatie analyse x_t op tijdstip $t_0 + \Delta t$ en een doelgebied M dat het geografische domein vertegenwoordigt waarbinnen men genteresseerd is in de fout in de verwachting. Aangenomen wordt dat het weermodel perfect is en dat fouten in de verwachting het gevolg zijn van de evolutie van fouten in de beginanalyse. De fout in de verwachting wordt gekwantificeerd middels een zogenaamde diagnostische functie J die gedefinieerd is als een norm $\langle \cdot, \cdot \rangle$ als volgt:

$$J(x_0) = \frac{1}{2} \langle M[F(x_0) - x_t], M[F(x_0) - x_t] \rangle \quad (1)$$

Wordt de beginanalyse aangepast met een kleine correctie δx_0 dan resulteert dit in een verandering δJ van de diagnostische functie die in eerste orde benadering gelijk is aan

$$\delta J = \frac{\partial J}{\partial x_0} \delta x_0 \quad (2)$$

De gradint $\partial J / \partial x_0$ beschrijft de gevoeligheid van de fout in de verwachting voor een correctie van de beginanalyse. Kleine correcties in de beginanalyse op geografische locaties met grote gradintwaarden hebben een relatief grote invloed op de verwachting. Deze locaties worden aangeduid als gevoelige gebieden (Rabier, 1996).

De gradint kan gezien worden als de eerste stap in de optimalisatie van de diagnostische functie. Minimalisatie is een iteratief proces. De correctie die de diagnostische functie minimaliseert na 3 iteraties wordt aangeduid als de key analysis errors. Key analysis errors beschrijven niet de volledige analysefout, maar ruwweg zo'n 10% daarvan. Ze vertegenwoordigen de componenten van de analysefout die het snelst groeien in de tijd en hebben een maximale amplitude typisch in de mid-troposfeer tussen 400 en 700 hPa (Klinker, 1998). Een verwachting genitiliseerd met de operationele analyse gecorrigeerd met de key analysis errors levert een reductie van de fout in de verwachting in het doelgebied van ruwweg 50% t.o.v. de operationele verwachting.

De definitie van de norm in de diagnostische functie is niet uniek en hangt af van het specifieke meteorologische fenomeen waarin men is genteresseerd. Op het ECMWF wordt de totaal-energie norm gebruikt die gedefinieerd is als een integraal over een bol Σ in de horizontaal en over drukniveau's p in de verticaal als volgt:

$$\langle x, x \rangle = \frac{1}{2} \int_p \int_{\Sigma} [u^2 + v^2 + R_a T_r (\ln p_s)^2 + \frac{C_p}{T_r} T^2] d\Sigma dp \quad (3)$$

R_a , C_p en T_r zijn thermodynamische constanten. Om praktische redenen worden niet alle fysische parameters van de analyse meegenomen in de norm, maar slechts de horizontale wind componenten, u en v , de gronddruk p_s en de temperatuur T . De fout in de verwachting is aldus gekwantificeerd als een som van fouten in de voorspelde wind, gronddruk en temperatuur, in een 3-dimensionaal gebied begrensd door het doelgebied M en drukniveaus p .

Op het ECMWF worden gevoeligheidsstudies dagelijks routinematig uitgevoerd. Minimalisatie van de diagnostische functie is zeer computer intensief. Het vereist de berekening van de gradint in iedere iteratie middels een lineair adjoint model op lage resolutie T63L60 (roosterpuntafstand 200 km), vergelijkbaar met 4D-Var. Gevoeligheidsstudies kunnen slechts worden

gedaan voor korte termijn verwachtingen tot maximaal 2 dagen omdat de aanname van lineariteit van weermodellen na 2 dagen niet meer geldig is. De gradint en key analysis errors worden gearchiveerd als velden van horizontale windcomponenten, temperatuur en gronddruk. Tenslotte wordt ter validatie een verwachting geproduceerd op resolutie T159L60 (roosterpuntafstand 80 km) genitieerd door de operationele analyse gecorrigeerd voor de key analysis errors. De gecorrigeerde verwachting levert gemiddeld een verlenging van de verwachtingstermijn op van een halve dag t.o.v. de operationele verwachtingen (Marseille, 2001).