

Honderd jaar rekenen aan het weer

'Zou het niet fantastisch zijn als je zou kunnen uitrekenen wat het weer gaat doen?' Deze droom, die rond de overgang van de negentiende naar de twintigste eeuw opkwam, is inmiddels voor een belangrijk deel werkelijkheid geworden. Computermodellen van de atmosfeer berekenen vandaag de dag met toenemend succes de weersontwikkelingen voor de komende uren of dagen. Maar om het zo ver te kunnen laten komen, was het eerst nodig het idee erachter in kaart te brengen en uit te werken...

De Noor Vilhelm Bjerknes (fig. 1), destijds verbonden aan de Universiteit van Stockholm, komt de eer toe als eerste het probleem van de voorspelbaarheid van het weer op schrift te hebben gesteld, vergezeld van richtingen waarin een oplossing kan worden gezocht. Zijn visionaire publicatie verscheen in januari 1904, dus op de kop af honderd jaar geleden, in het Duitstalige *Meteorologisch Zeitschrift* en legde de basis voor de hedendaagse praktijk van het maken van weersverwachtingen.

Bjerknes' ideeën

Om aan het weer te kunnen rekenen, zo schreef Bjerknes reeds in 1904, dient aan twee voorwaarden te zijn voldaan. Eerst moet de toestand van de atmosfeer goed in kaart zijn gebracht. Daarnaast moeten de natuurkundige wetten die de ontwikkelingen in de atmosfeer beschrijven bekend zijn.

In de tijd dat Bjerknes zijn ideeën aan het papier toevertrouwde, was aan die voorwaarden nog niet voldaan. Waarnemingen waren er uitsluitend van landstations en van het aardoppervlak; meetgegevens van de hogere luchtlagen of waarnemingen van zeeën en oceanen waren nog niet beschikbaar. De natuurkundige wetten die het gedrag van de atmosfeer bepalen, kon Bjerknes al wel opsommen, maar hij was er niet zeker van of zijn overzicht wel volledig en correct was. De huidige generatie atmosfeermodellen benut nog steeds de vergelijkingen uit Bjerknes' baanbrekende artikel.

Overigens was het Bjerknes niet vergund zijn ideeën zelf in praktijk te brengen. De berekeningen waren voor die tijd veel te omvangrijk en de benodigde wiskunde was nog onvoldoende ontwikkeld voor een succesvolle toepassing van de door hem gesuggereerde aanpak. Daarom

zag hij zich genoodzaakt een andere weg in te slaan. Als hoofd van en motor achter de zogeheten *Noorse School* stond hij niet alleen aan de wieg van de atmosfeermodellen, maar ook aan die van de polaire-fronttheorie. Warmte- en koudefronten vormen tot op de dag van vandaag nog vaste ingrediënten van de werkzaamheden van de meteoroloog en van de berichtgeving over het weer in de media en op internet. Vaak worden de resultaten van berekeningen van atmosfeermodellen gepresenteerd in combinatie met de uitkomsten van een analyse volgens de Noorse School (zie fig. 2 voor een voorbeeld).

De eerste berekeningen

Bjerknes gaf in zijn artikel aan dat het maken van weersverwachtingen niets anders inhield dan het oplossen van zeven vergelijkingen met zeven onbekenden:

- de bewegingswetten van Newton in drie richtingen: noord-zuid, oost-west en omhoog. (drie vergelijkingen)

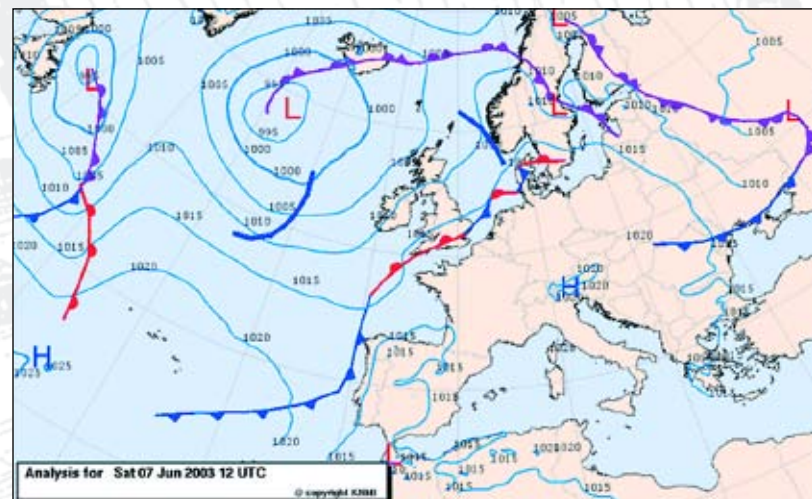


1. De Noorse weerkundige Vilhelm Bjerknes (1862-1951), die aan de basis stond van de moderne weersverwachtingen.

- de wet van behoud van energie;
- de wet van behoud van massa;
- de gaswet;
- de behoudswet voor water, waterdamp en ijs.

Reeds in 1906 maakte de Oostenrijker Exner een verwachting met een eenvoudig atmosfeermodel, maar deze activiteit verkreeg weinig bekendheid.

Een volgende die zich eraan waagde de weervergelijkingen op te lossen was de Brit Richardson. Hij was chauffeur van een militaire ambulance in de Eerste Wereldoorlog en benutte de tijd waarin zijn inzet niet vereist was voor het uitvoeren van weerberekeningen. Zijn droom was dat weersverwachtingen gemaakt



2. Combinatie van de rekenresultaten van een computermodel van de atmosfeer, in dit geval het regionale model HiRLAM van het KNMI, met een 'klassieke' frontanalyse volgens de zogeheten 'Noorse School'.

zouden kunnen worden in een grote, koepelvormige ruimte met 64 duizend menselijke rekenaars, geleid door een centrale coördinator (fig. 3). Richardson publiceerde de resultaten van zijn berekeningen in 1922. Zijn voorspelling betrof de luchtdruk in Potsdam voor zes uur vooruit. Hoewel hij de berekeningen correct uitvoerde, was het resultaat teleurstellend en niet realistisch. Richardson kwam op een luchtdrukverandering van 145 hPa; in werkelijkheid bedroeg deze slechts 6 hPa. Pas later bleek dat een verdere bewerking van de gemeten toestand van de atmosfeer, de zogeheten initialisatie, vereist is om de berekeningen succesvoller te maken.

De grote doorbraak

De eerste helft van de twintigste eeuw bleef het aantal rekenaars aan het weer nog beperkt. Naast Exner en Richardson stelde ook de Russische meteoroloog Kibel een weersvoorspelling op; dat was in 1940. Al deze pogingen tot het voorspellen van het weer hadden echter nog weinig aanleiding gegeven tot optimisme. Zo zei Houghton eind 1946 in zijn 'presidential address' tot de jaarlijkse bijeenkomst van de American Meteorological Society dat 'ons natuurkundig begrip van de processen in de atmosfeer nog zo beperkt is, dat het vrijwel nutteloos is bij het voorspellen van het weer'. Slechts vier jaar later werden de eerste weersverwachtingen met een computer geproduceerd en verscheen een artikel van Charney, Fjortoft en Von Neumann, dat de grote doorbraak forceerde. In die publicatie werd beschreven hoe je Bjerknes' vergelijkingen met de methoden van de numerieke wiskunde kunt oplossen.

De ontwikkelingen werden mogelijk gemaakt door een min of meer toevallige samenloop van omstandigheden. Ragnar Fjortoft had ervaring met het grafisch oplossen van numerieke problemen. Jule Charney was een ervaren meteoroloog. Samen wisten ze de wiskundige John von Neumann (fig. 4), die over de computer beschikte, over te halen met die computer aan meteorologische problemen te gaan werken.

Het eerste weermodel was een model waarin de atmosfeer slechts uit één laag bestond; het rekende op een beperkt gebied. Meer lagen of een groter rekengebied waren gezien de beschikbare reken capaciteit onhaalbaar; bovendien waren er



destijds wereldwijd nog onvoldoende waarnemingen beschikbaar. Dankzij de meteoroloog Charney werd gekozen voor het 500 hPa-vlak als rekenniveau. Dit vlak ligt op ongeveer 5,5 km hoogte en is bepalend voor de weersontwikkelingen die zich gaan voordoen.

Het duurde nog tot 1960 voor de producten van weermodellen bij de meteorologen in de Verenigde Staten op het bureau terecht kwamen. Analyses werden in die jaren nog met de hand gemaakt, de rekenresultaten kwamen op lijnprinters en de controle op bruikbaarheid was opnieuw handwerk.

In Europa deden computers pas later hun intree. De eerste rekenexperimenten werden uitgevoerd met grafische methoden of met handrekenapparaten. Het kenmerk van de begintijd van de numerieke weersvoorspelling was dan ook 'het wachten op de computer'; tot die kwam, moesten de meteorologen, al dan niet geholpen door assistenten, het rekenwerk zelf doen met tafelrekenmachines. In Europa beschikten de Zweden vanaf het midden van de jaren vijftig als eersten over een computer. Maar geleidelijk aan gingen ook andere Europese weerdiensten over tot de aanschaf ervan. In de tweede helft van de jaren zestig werden op diverse plaatsen in Europa dagelijks computerweersvoorspellingen gemaakt.

Mondiale en regionale modellen

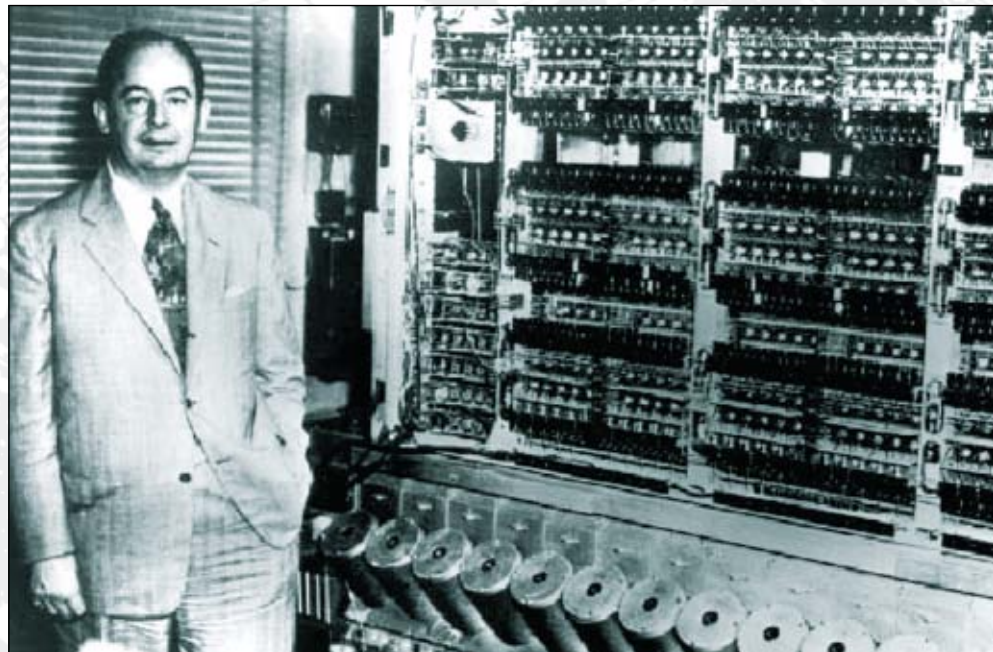
In de jaren zeventig van de vorige eeuw begon zich een duidelijk on-

derscheid af te tekenen tussen regionale modellen voor weersverwachtingen tot één à twee dagen vooruit, en mondiale voorspelmodellen voor de middellange termijn: drie tot tien dagen vooruit. Regionale modellen hebben als kenmerk dat ze rekenen op een beperkt gebied. Daardoor zijn de waarnemingen sneller beschikbaar, eerder worden gestart en zijn de prognoses dus eerder klaar. Bij een gegeven computercapaciteit kan een regionaal model werken met een hogere resolutie, dus kleinere roosterpunafstanden en/of meer lagen in de verticaal, dan een mondiaal model. De waarden van de meteorologische variabelen aan de randen van dat gebied worden ontleend aan een grootschaliger of mondiaal atmosfeermodel, wat in sommige gevallen aanleiding kan geven tot fouten; een regionaal model kan een mondiaal model dan ook niet vervangen. Mondiale weermodellen rekenen over de gehele aarde. Zo'n groot rekengebied is noodzakelijk voor langere verwachtingstermijnen. Daarbij heeft een mondiaal model geen problemen met randen, omdat de aardbol een aaneengesloten vlak vormt.

Een belangrijke doorbraak op het gebied van mondiale modellen, en daarmee tevens op het terrein van de verwachtingen voor de middellange termijn, vormde de oprich-

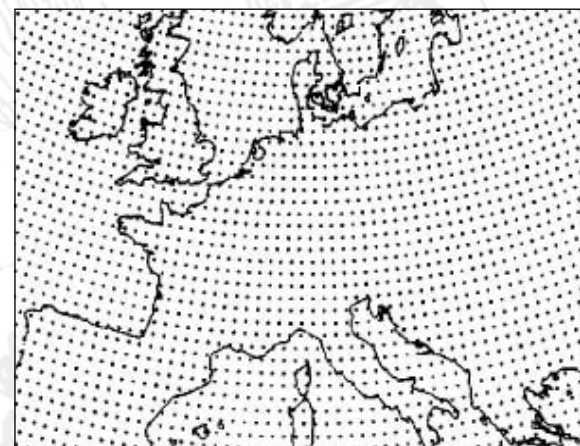
Kees Floor*

* Kees Floor is hoofd van de afdeling Meteorologische Opvoedingen van het KNMI in De Bilt.



4. Von Neumann en zijn computer, 1950.

ting van het ECMWF in 1975. Al bijna 25 jaar, vanaf 1 augustus 1979, levert dit centrum dagelijks verwachtingen tot tien dagen vooruit met een atmosfeermodel dat door vriend en vijand wordt beschouwd als het beste in zijn soort. Op dit moment hebben de grote westerse landen, zoals Verenigde Staten, Canada, Groot-Brittannië, Frankrijk, Duitsland en Australië, elk de beschikking over een eigen mondiaal atmosfeermodel. Een veel groter aantal landen, waaronder Nederland, beschikt over regionale weermodellen, die ze gebruiken voor weersverwachtingen tot twee dagen vooruit.



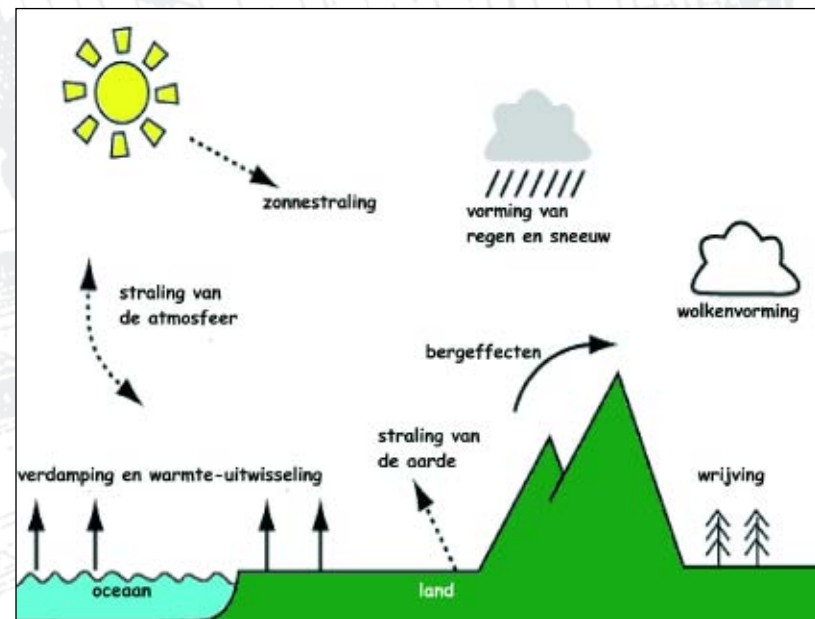
5. Voorbeeld van een verdeling van roosterpunten van een atmosfeermodel over het aardoppervlak.

De operationele cyclus

Op alle weercentra met een computermodel van de atmosfeer gaat men als volgt te werk. Eerst wordt er veel aandacht besteedt aan de controle van de binnengekomen weerwaarnemingen. Het gaat om traditionele waarnemingen van grondstations of radiosondes, maar ook om waarnemingen afkomstig van weersatellieten, weerradars, windprofilers, lijnvluchten en drijvende boeien in de oceaan. Het ten onrechte honoreren van een foute waarneming kan leiden tot een onjuist beeld van de actuele toestand van de atmosfeer, wat versterkt doorwerkt in de computerprognoses. Waarnemingen die de kwaliteitsroets doorstaan worden gebruikt voor het maken van de analyse van

de weersituatie. Als eerste benadering van die actuele situatie dient de meest recente computerprognose die geldig is op het moment waarvoor de analyse wordt gemaakt. De waarnemingen worden gebruikt om die situatie verder te preciseren. Ze worden herleid naar zogeheten roosterpunten, waarop later in de operationele cyclus ook de modelberekeningen plaatsvinden. Het liefst zouden we voor alle punten in de atmosfeer de waarden van meteorologische grootheden kennen, maar dat is natuurlijk onmogelijk. Daardoor wordt er gewerkt met een beperkt aantal roosterpunten (fig. 5), verspreid over de hele aardbol, of – bij regionale modellen – over het hele rekengebied. Boven elk punt bevindt zich een aantal rekenlagen.

Naarmate de mogelijkheden van de computers toenemen en door de ontwikkelingen van de numerieke wiskunde die het mogelijk maken efficiënter met beschikbare computercapaciteit om te springen, kan de afstand tussen de roosterpunten kleiner worden gekozen en het aantal lagen worden uitgebreid. Dit leidt tot nauwkeuriger verwachtingen en de mogelijkheid ontwikkelingen op steeds kleinere schaal in de berekeningen mee te nemen. Op dit moment gebruiken wereldwijdrekenende atmosfeermodellen roosterpuntafstanden van bijvoorbeeld veertig kilometer bij zestig lagen; bij modellen die een kleiner gebied bestrijken wordt incidenteel al gewerkt met een rooster van vijf kilometer! De analyses worden opgesteld voor alle meteorologische variabelen en



6. Enkele van de natuurkundige processen die meegenomen worden bij de dagelijkse berekeningen die computermodellen van de atmosfeer uitvoeren.

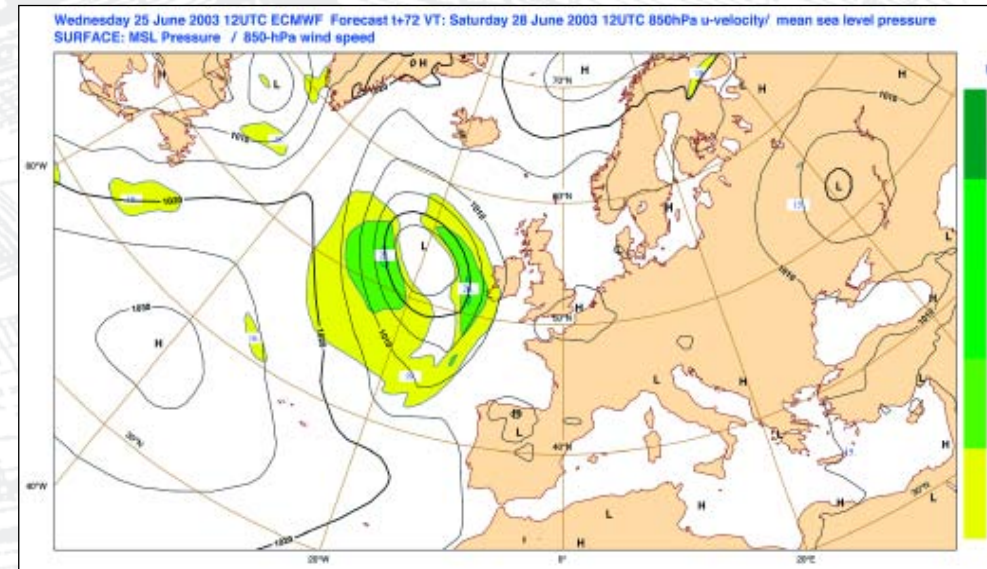
voor alle lagen in de atmosfeer. Vervolgens ondergaan ze een nabewerking, de zogeheten initialisatie, alvorens de computerberekeningen starten die uiteindelijk tot nieuwe prognoses zullen leiden. De initialisatie is nodig om de verschillende analyses zodanig op elkaar af te stemmen dat een logisch samenhangend beeld van de atmosfeer ontstaat.

De modelberekeningen vinden plaats in tijdstappen van bijvoorbeeld twintig minuten. Na elke tijdstap wordt even stilgestaan bij het effect van natuurkundige processen in de dampkring op het totale meteorologische gebeuren. Zo wordt er onder andere gekeken naar de zonnestraling en de door het aardoppervlak en de atmosfeer uitgezonden straling, de vorming van bewolking en neerslag, en naar de verdamping, de warmte-uitwisseling en de wrijving nabij het aardoppervlak (fig. 6). Zo nodig wordt de situatie aangepast alvorens de berekeningen voor een volgende tijdstap plaatsvinden.

Als de berekeningen zijn afgerond, worden de uitkomsten vertaald naar 'producten' zoals weerkaarten van het aardoppervlak (fig. 2, 7) en stromingspatronen op diverse niveaus in de atmosfeer. Sommige van die producten zijn gewoon op internet te vinden. Daarnaast vinden statistische nabewerkingen plaats om de waarden van meteorologische grootheden op een roosterpunt te vertalen naar een weerwaarneming op een locatie waarin we zijn geïnteresseerd.

Verdere ontwikkelingen

Een van de opties bij de oprichting van het ECMWF destijds was een puur rekencentrum waar uitsluitend 'het atmosfeermodel' draaide; daarbij zouden de analyse van de weersituatie en de bewerking van de weerwaarnemingen buiten het werkteerrein van het ECMWF vallen. Het is maar goed dat deze optie niet is gerealiseerd, want juist op het terrein van het omgaan met waarnemingsgegevens is ontzettend veel winst geboekt. Verdere verbeteringen kwamen van betere analyse- en initialisatieprocedures en het verhelpen van een groot aantal numerieke fouten. Daarnaast zag men steeds meer het belang in van de tropen en het zuidelijk halfrond voor weersverwachtingen op de middellange termijn. Verder kwam meer nadruk te liggen op natuurkundige processen die voor de middellange termijn



relevant zijn door aansluiting te zoeken bij de praktijk van de klimaatmodellering. De resultaten waren goed; de verwachtingstermijn werd verlengd van twee à drie tot zeven dagen. Andere centra die middellange-termijnverwachtingen maken toonden eenzelfde beeld; zo heeft bijvoorbeeld een Duitse verwachting voor vijf dagen vooruit nu dezelfde kwaliteit als de verwachting voor morgen in het midden van de jaren zestig.

De verbetermogelijkheden van de computermodellen zijn nog lang niet uitgeput. Overal streeft men naar verdere verkleiningen van de roosterpuntafstanden en een toename van het aantal boven elkaar liggende rekenlagen. Ook aan de verfijning van de beschrijvingen van de natuurkundige processen in de atmosfeer, zoals bijvoorbeeld weergegeven in figuur 6, wordt nog hard gewerkt. Daarnaast krijgen ensembleverwachtingen steeds meer aandacht. Hierbij wordt het model talrijke keren nagedraaid met een iets andere uitgangspositie. Het doel daarvan is gevoel te krijgen voor de onzekerheden in het eindresultaat; ook kunnen de ensembleverwachtingen gebruikt worden voor het opstellen van kansverwachtingen, die veel meer informatie bevatten dan de gebruikelijke zwart-wituitspraken. (In Zenit van december 2002 werd het ensembleverwachtingssysteem van het ECMWF uitvoeriger beschreven.) Naast 'gewone' ensembles, gebaseerd op één model, zijn er nu ook superensembles, gebaseerd op meerdere modellen. Via statistische technieken worden bij de voorspellingen met superensembles de sterke kanten van modellen geaccentueerd, terwijl zwakke kanten

7. Computerprognose van het ECMWF, met luchtdruk aan de grond (getrokken lijnen) en windsnelheid op 1500 m hoogte (ingekleurd).

minder gewicht krijgen. De resultaten van superensembles zijn beter dan die van afzonderlijke modellen of van ensemblegemiddelden; ze bewezen hun nut vooral in gevallen van tropische cyclonen of overvloedige neerslag. In de toekomst zullen ongetwijfeld meer methoden worden uitgetest om de kwaliteit en de bruikbaarheid van computermodellen van de atmosfeer verder te vergroten.

Dé specialist in Astronomische telescopen

Dealer van:

Meade Bynostar Bresser

Celestron Vixen Optisan



Bij Combi Focus kunt u ook terecht voor spotting scopes en verrekijkers van de merken Leica, Zeiss, Swarovski, Optolyth etc.

COMBI actief in beeld

Ook postorderservice!



Combi Focus
Goudenregenplein 59-64
2565 GK Den Haag
tel/fax: 070-3451989
www.combifocus.nl