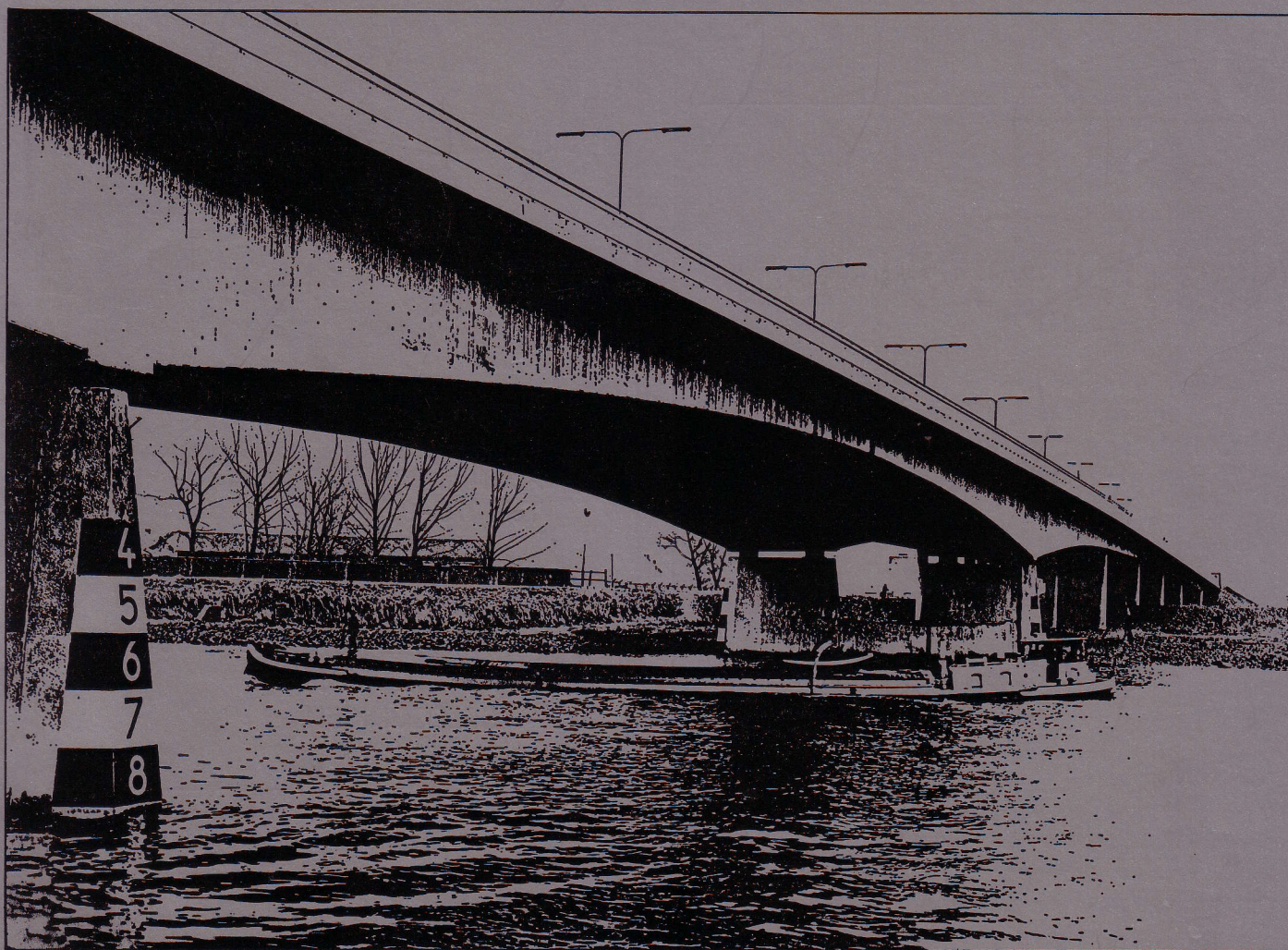


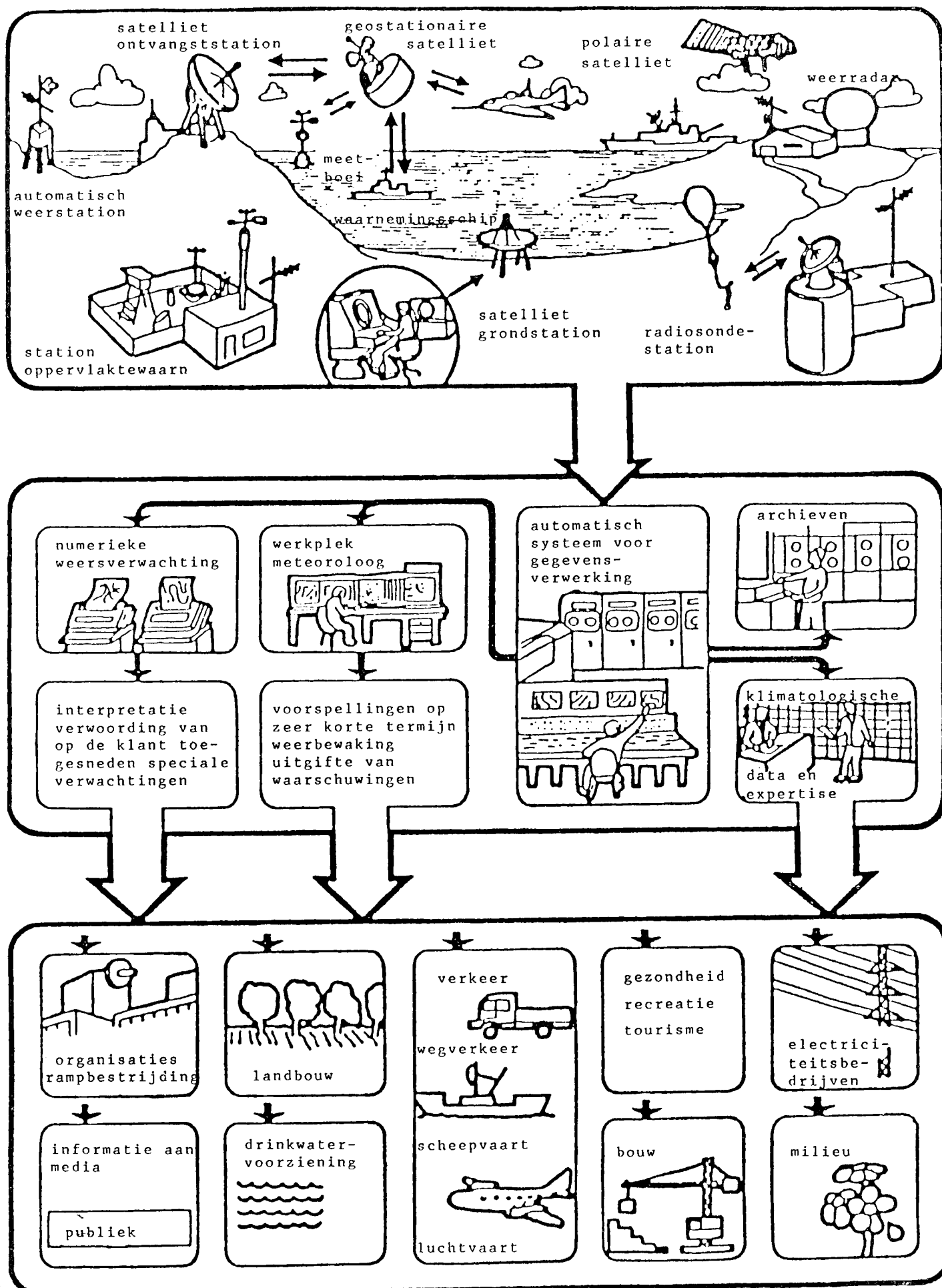
otar

otar 74 / 8 / 89

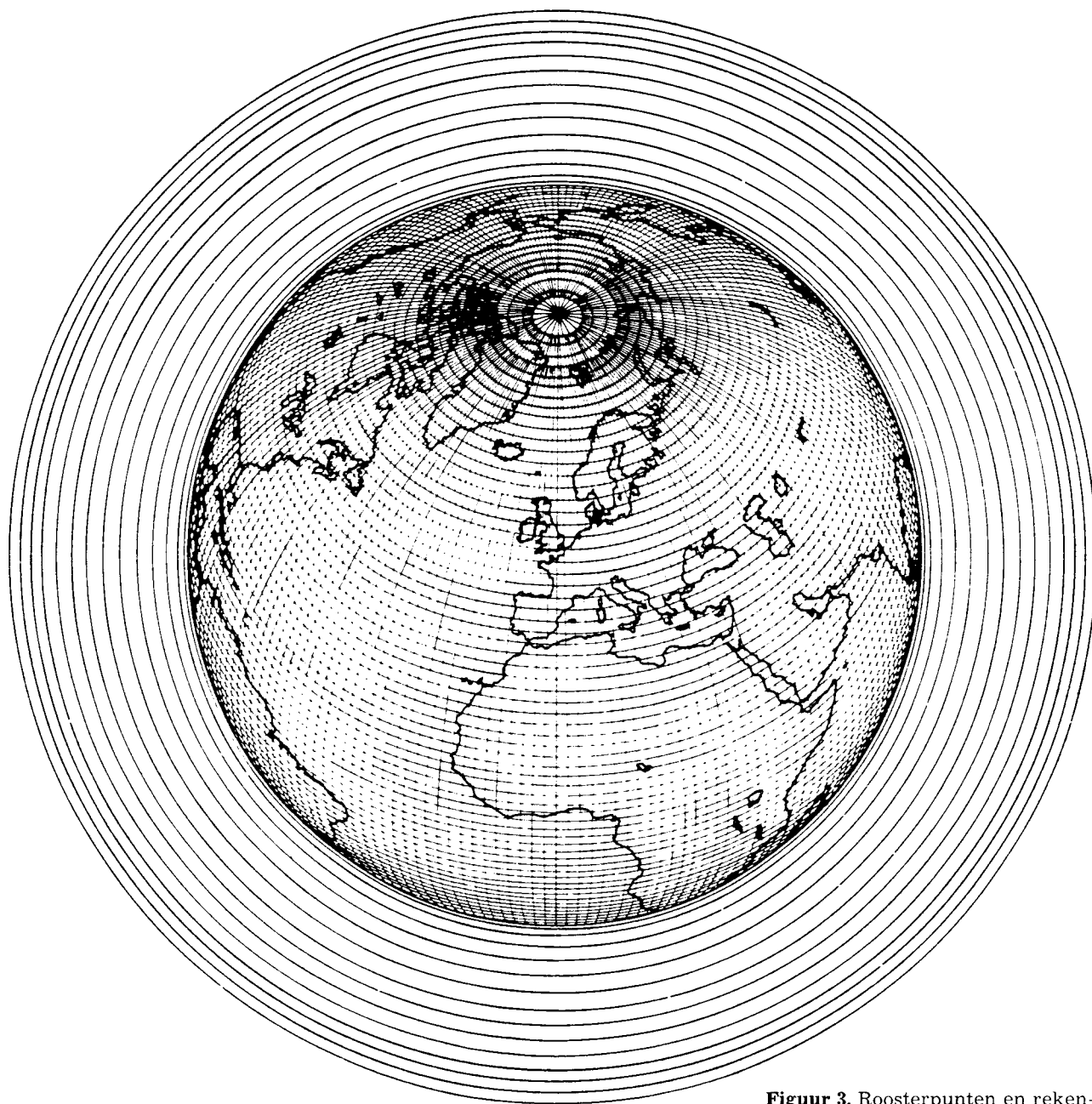
maandblad voor
wegen- en waterbouw

TECHNISCH TIJDSCHRIFT VAN DE WATERSTAATKUNDIGE AMBTENAREN VAN DE RIJKSWATERSTAAT





Figuur 1. Schema van een nationale meteorologische dienst: waarnemingen en inwinnen van data (boven); gegevensverwerking en productie van verwachtingen, waarschuwingen en klimatologische adviezen (midden); verzending van verwachtingen en andere gespecialiseerde informatie aan gebruikers.



Figuur 3. Roosterpunten en reken-nivo's in de vertikaal van het ECMWF-atmosfeermodel (eerste versie).

Uit dit principe van de zogeheten 'synoptische meteorologie' blijkt al dat het verrichten van weer-waarnemingen alleen niet voldoende is; de waarnemingen moeten ook verspreid, of beter nog, onderling uitgewisseld worden. De ontwikkeling van steeds betere en snellere communicatiemogelijkheden waren voor de meteorologie daardoor even belangrijk als de weerrapporten zelf. Post, telegraaf, telefoon en telex hebben alle hun nut bewezen bij de meteorologische berichten-uitwisseling. Thans communiceren inzamelcomputers met elkaar via snelle datalijnen. Het verrichten en verspreiden van weerwaarnemingen wordt sinds

de jaren zestig gecoördineerd door de Wereld Meteorologische organisatie (WMO), een onderdeel van de Verenigde Naties. In 1963 startte de WMO een programma op voor internationale samenwerking bij het vreedzaam gebruik van de atmosfeer onder de naam World Weather Watch (WWW). Het was een eerste aanzet tot het verzamelen en analyseren van informatie over weer en atmosfeer op wereld-schaal met gebruikmaking van moderne ontwikkelingen. Satellieten dienen hierbij als waarnemingsplatform en als communicatiesysteem; snelle elektronische computers verwerken en verzenden weerrapporten en andere berichten. De

waarnemingsstations die deel uitmaken van de WWW bevinden zich te land, ter zee, in de lucht en in de ruimte.

de World Weather Watch coördineert drie essentiële taken: het verrichten van waarnemingen, het bewerken ervan en de uitwisseling tussen de deelnemende landen. Het 'Global Observing System' omvat op dit moment ongeveer 9500 landstations, 7400 varende schepen die weerrapporten verzenden, 3000 vliegtuigen die eveneens weer-metingen verrichten, 250 boeien in zeeën en oceanen, 800 radiosonde-stations voor metingen tussen het aardoppervlak en 25 km hoogte,

200 monitorstations voor achtergrondluchtvervuiling en enkele weersatellieten. De weergegevens worden bewerkt en verwerkt door het 'Global Data Processing System', bestaande uit 3 wereld-meteorologische centra (gevestigd te Washington, New Delhi en Moskou) en 26 regionale centra, waaronder Bracknell in Engeland, waar het KNMI zijn gegevens vandaan krijgt, en 160 nationale meteorologische centra, zoals het KNMI te De Bilt en het KMI te Ukkel. De meteorologische centra verzenden hun gegevens via het Globale Telecommunication System (CTS). Over de datalijnen van dit meteorologische communicatienetwerk gaan de data, die het totale WWW-systeem oplevert:

- weerkundige, hydrologische en oceanografische data voor allerlei toepassingen
- weeranalyses, waarschuwingen en verwachtingen voor algemeen gebruik of voor specifieke toepassingen in de landbouw, de scheepvaart, de kustwaterbouw, industrie, recreatie enz.
- waarschuwingen voor natuurrampen, die een gevolg zijn van meteorologische verschijnselen; voornamelijk tropische cyclonen.

De WWW heeft in 1987 verdere plannen gemaakt voor de toekomst. Deze behelzen ondermeer:

- uitbreiding en verbetering van het waarnemingssysteem, vooral door het inzetten van automatische waarnemingsstations
- betrouwbaarheidscontrole van het systeem en kwaliteitscontrole van de waarnemingen
- toepassing van nieuwe technologieën bij gebruik van gegevensuitwisseling en overgang van numerieke naar binaire codes.

De Meteorologische Dienst

De 160 meteorologische diensten maken bij het opstellen van hun verwachtingen en bij het uitgeven van hun waarschuwingen gebruik van de weergegevens, die ze via het meteorologisch telecommunicatienetwerk GTS ontvangen. Figuur 1 laat zien hoe zo'n dienst werkt. De waarnemingen maken het bovenste deel uit van de tekening. Het onderste deel omvat

de gebruikers van de meteorologische berichtgeving. Middenin zit de meteorologische dienst zelf. De berichten worden gerouteerd naar de werkplek van de meteoroloog en naar numerieke atmosfeermodellen. Daarnaast worden gegevens gearchiveerd voor onderzoek of voor klimatologische toepassingen en adviezen. In voorgaande artikelen van deze serie (Donker in OTAR 88-3 en 88-4) werd reeds besproken over welk 'gereedschap' de meteoroloog op zijn werkplek beschikt bij het geven van hydrometeorologische voorlichting; tevens kwam het nut van klimatologie aan de orde. Hier gaan we verder in op de rol van numerieke modellen, die in de afgelopen 30 jaar steeds belangrijker is geworden bij het tot stand komen van weersverwachtingen.

Verscheidene landen beschikken thans over eigen computermodellen van de atmosfeer. Ook in Nederland wordt dit jaar zo'n model, dat verwachtingen maakt voor een groot deel van het Europese vasteland en het aangrenzend oceaangebied, operationeel. Het KNMI-model levert verwachtingen op tot hooguit 30 uur vooruit. Langere verwachtingsperiodes vereisen modelberekeningen op wereldschaal. Deze worden o.a. uitgevoerd op het Europese Centrum voor Weersvoorspellingen op de Middellange Termijn (ECMWF) te Reading in Engeland (zie kader). Daarnaast beschikken de hydrometeorologische centra in Nederland over computerprodukten, afkomstig van de modellen van de Britse weerdienst.

Het belangrijkste produkt van atmosfeermodellen voor de hydrometeorologische voorlichting is de berekende luchtdrukverdeling aan de grond met het bijbehorende windveld. De wind dient op zijn beurt als invoergegeven voor 'natte modellen', numerieke modellen die de ontwikkeling van zeegang en deining beschrijven of die afwijkingen van de waterstanden aan de kust of op offshore locaties berekenen. Hieronder gaan we in op de 'werking' van atmosfeermodellen.

Analyse

Net als bij het meteorologisch 'handwerk' kan een verwachte weerkaart of prognose pas gemaakt worden na een grondige

analyse. Voor het maken van zo'n analyse gebruikt een atmosfeermodel weerwaarnemingen en een zogeheten 'gisveld'. Het gisveld is een eerste gok voor hoe de analyse eruit zou kunnen zien, een beschrijving van de toestand van de atmosfeer, die de werkelijkheid vermoedelijk dicht benadert. Als gisveld neemt men gewoonlijk de prognose, die geldig is op het moment waarvoor de analyse gemaakt moet worden, afkomstig van de meest recente 'modelrun' van het atmosfeermodel. Het maken van een analyse uit een gisveld is veel eenvoudiger dan wanneer men de analyse uit het niets zou moeten opbouwen. De meteoroloog, die een handanalyse maakt, doet in feite hetzelfde: hij gebruikt de meest recente geanalyseerde weerkaart als gisveld en legt deze op een lichtbak onder de nieuwe, nog te analyseren kaart. Het gisveld wordt bijgeschaafd met behulp van waarnemingen.

Synoptische weerwaarnemingen (verricht op hetzelfde tijdstip) zijn het meest praktisch, maar weersatellieten en vliegtuigen rapporteren op willekeurige tijdstippen en vanaf min of meer willekeurige posities. Zulke zogeheten asynoptische weerwaarnemingen worden eveneens gebruikt, voor zover ze binnen een van te voren vastgestelde tijdsperiode rond het analysetijdstip zijn verricht. Voor de waarnemingen worden ingevoerd vindt er eerst een controle plaats. Zo wordt bijvoorbeeld nagegaan of elementen uit een weerrapport niet in tegenspraak zijn met andere gegevens uit hetzelfde rapport. Of men controleert of de opgegeven waarden wel binnen klimatologisch realistische grenzen liggen. Soms worden waarnemingen ook verworpen als ze teveel afwijken van het gisveld. Op enkele weercentra houdt men tevens een 'zwarte lijst' bij van verdachte schepen of van waarnemingsstations, die over een recente periode van bijvoorbeeld een maand veel dubieuze waarnemingen instuurden. De kwaliteitscontrole van weerwaarnemingen is belangrijk, omdat fouten in de weer rapporten anders te snel fouten opleveren in de computeranalyse, die op hun beurt weer doorwerken in de computerprognoses. Het binnenhalen van zoveel mogelijk weerwaarnemingen van goede

- wet van Newton ($K = m \cdot a$)
(drie bewegingsvergelijkingen of vergelijkingen van Navier-Stokes)
 - Wet van behoud van massa
 - Toestandvergelijking (Boyle-Gay Lussac)
- Zes vergelijkingen met zes onbekenden: u, v, w, p, ρ, T

Figuur 4. Natuurkundige wetten die de basis vormen van modelberekeningen van de atmosfeer.

kwiteit is een eerste vereiste voor een goed functioneren van een computermodel van de atmosfeer. De grootte van het gebied waaruit de waarnemingen afkomstig zijn is gelijk aan het gebied, waarvoor de modelberekeningen plaatsvinden. Het is groter naarmate de verwachtingstermijn langer is. Fig. 2 illustreert dit verband tussen rekengebied en verwachtingstermijn. Voor 24 uur vooruit ligt het benodigde rekengebied binnen de binnencirkel; de zone eromheen gaat een rol spelen bij verwachtingen van twee tot vier dagen vooruit, terwijl het rekengebied bij verwachtingen tot 5 à 10 dagen vooruit bijna de hele aardbol omvat. De berekeningen van atmosfeermodellen vinden veelal plaats op zogeheten 'roosterpunten'. De ligging van deze punten varieert per model; in de eerste versie van het ECMWF-model bevonden ze zich op de snijpunten van de lijnen over de aardbol in fig. 3. Boven elk roosterpunt aan het aardoppervlak bevindt zich nog een aantal andere rekenpunten; in het geval van figuur 3 gaat het om lagen. Elk roosterpunt is representatief voor zijn omgeving ter grootte van een hokje zoals afgebeeld in de figuur. De huidige versie van het ECMWF-model kent roosterpuntafstanden van 1.125° en 19 lagen. De weerwaarnemingen die een atmosfeermodel binnenkrijgt worden herleid naar de roosterpunten van het model en vergeleken met de waarde die het gisveld aan het roosterpunt heeft toegekend. De waarde in de analyse wordt volgens vastgestelde regels bepaald uit gisveld en herleide waarneming samen.

De analyse die zo tot stand komt is nog niet geheel gereed voor gebruik bij het maken van prognoses. In de atmosfeer zijn luchtdrukveld en windveld bij benadering in evenwicht; in modelanalyses wijkt de situatie daar vaak teveel vanaf. Het gevolg daarvan is dat er in het model zogeheten zwaartekrachtsgolven ontstaan, die de rekenresultaten negatief beïnvloeden. Daarom is een extra stap vereist: de initialisatie, waarbij druk en windveld met elkaar in evenwicht gebracht worden. Pas na de initialisatie kunnen de modelberekeningen in gang gezet worden, die uiteindelijk resulteren in computerprognoses.

Modelberekeningen

Het hart van een atmosfeermodel bestaat in wezen uit een verzameling van wiskundige formuleringen van natuurkundige wetten. De wetten waar het om draait zijn gegeven in fig. 4. In totaal zijn er zeven vergelijkingen met zeven onbekenden, zodat het probleem eenvoudig oplosbaar zou moeten zijn. De werkelijkheid is echter aanzienlijk ingewikkelder. Dat komt doordat de vergelijkingen worden toegepast op de dampkring, een dunne gasschil op een draaiende bol. Plaatsbepaling op een bol is wiskundig al ingewikkelder dan in een plat vlak; de draaiing van de aarde maakt introductie van natuurkundige 'schijnkrachten' noodzakelijk, zoals de afwijkende kracht van de aardrotatie (Corioliskracht). De variabelen, die in de vergelijkingen van fig. 4 voorkomen, — temperatuur, vochtigheid, windsnelheid, luchtdruk en dichtheid van de lucht —, worden beïnvloed door allerlei natuurkundige processen, die zich in de atmosfeer afspelen (zie fig. 5). Deze processen zijn veelal

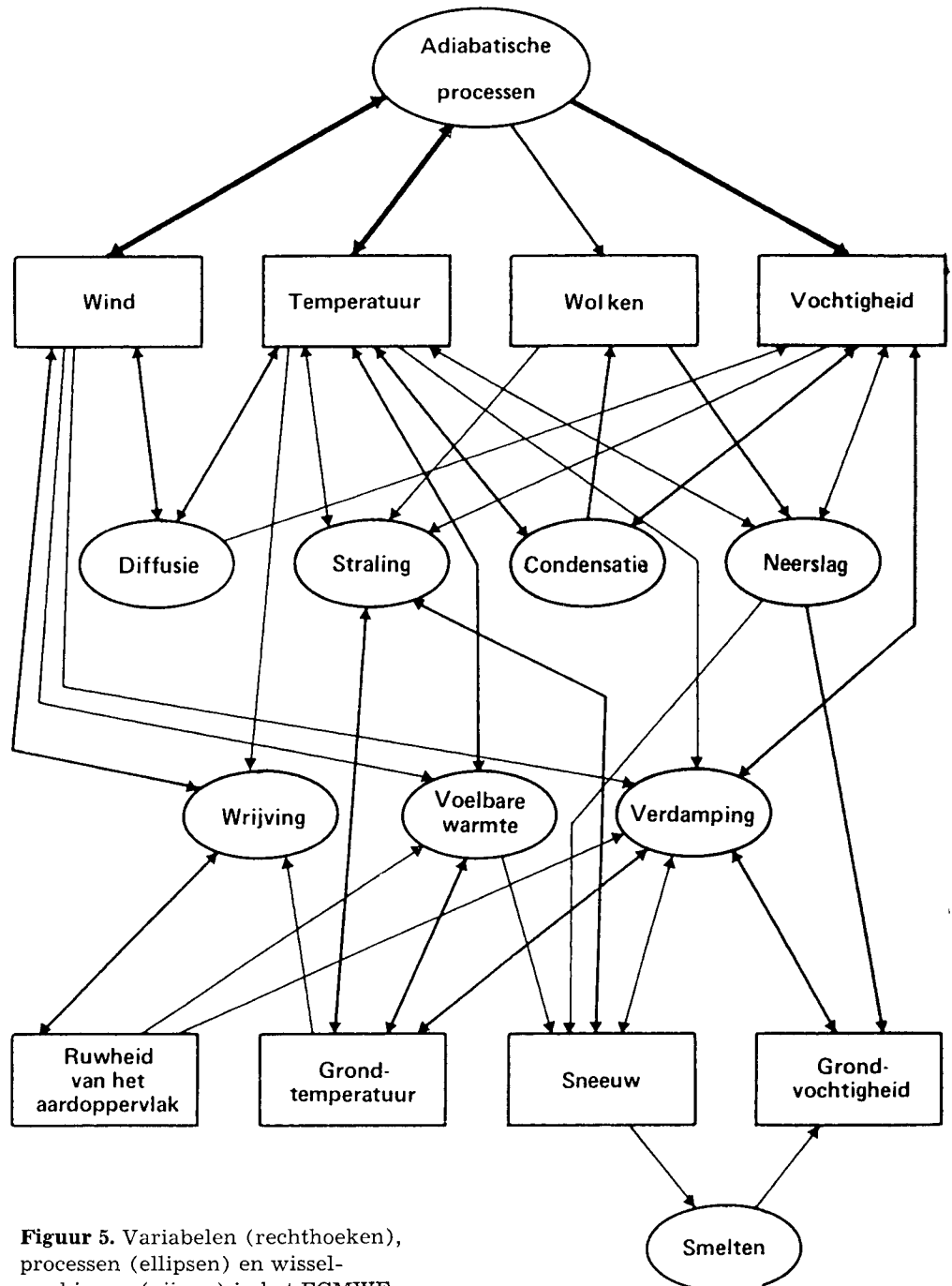
kleinschalig en worden voor toepassing in atmosfeermodellen beschreven met benaderingen, waarin grootschalige variabelen voorkomen die men kan afschatten of door het model kan laten berekenen. Men spreekt in zo'n geval van parametrisaties. Fig. 5 laat zien dat ook wisselwerkingen tussen atmosfeer en aardoppervlak een rol spelen in modelberekeningen. Daarom beschikken de modellen over informatie over land of zee en over orografie (hoogte landoppervlak boven zeeniveau).

De berekeningen met de natuurkundige wetten van fig. 4 noemt men wel het dynamisch deel van het model; de berekeningen waarin gecorrigeerd wordt voor de fysische processen die in eerste instantie buiten beschouwing werden gelaten, heet het fysisch deel. Beide delen consumeren ongeveer evenveel rekentijd. De berekeningen worden uitgevoerd in kleine tijdstapjes. In de huidige ECMWF modelversie bedraagt de tijdstap 15 minuten. De kleine tijdstap is nodig om ontsporingen van het model ten gevolge van numerieke onstabilititeiten bij berekeningen te voorkomen. De rekenresultaten worden niet om de 15 minuten bewaard of gepresenteerd; dat zou een immense hoeveelheid geheugenruimte vragen. Meestal worden uitsluitend prognoses in tijdstappen van 6 uur geleverd. De beschrijving van luchtstromingen op een netwerk van roosterpunten is niet de enige mogelijkheid die in computermodellen van de atmosfeer kan worden toegepast. In 'spectrale modellen', zoals de huidige versie van het ECMWF-model, wordt de wiskundige voorstelling van de luchtstroming ontbonden in een reeks golfvormige functies op de aardbol. Het model berekent dan de grootte van de bijdrage van elk van die golfjes afzonderlijk aan de totale luchtstroming. Deze aanpak heeft grote numerieke voordelen en leidt tot een grotere reken nauwkeurigheid. De spectrale beschrijving geldt alleen voor het 'dynamisch' deel van het atmosfeermodel; het 'fysisch' deel blijft gebruik maken van roosterpunten. De rekenresultaten moeten dus voortdurend omgezet worden van spectrale beschrijving naar roosterpuntbeschrijving en omgekeerd; bij

het ECMWF-model kost dat 30% van de totale rekentijd. Het aantal golven dat men gebruikt om de luchtstromingen te beschrijven kan men zo groot kiezen als men wil. Hoe meer golven, des te kleinschaliger de weersystemen die nog beschreven kunnen worden. De computer (geheugen en benodigde rekentijd) legt echter beperkingen op. Daarom moet men op een gegeven moment afkappen. Bij de eerste spectrale versie van het ECMWF-model kapte men af na 63 golven (T63); in de huidige versie na 106 (T106).

Globale modellen en lam

Atmosfeermodellen, die prognoses maken voor vier of meer dagen vooruit, voeren hun berekeningen uit over de hele aardbol (globe) (zie figuur 2); het zijn globale modellen. Een voorbeeld van zo'n model is het operationele ECMWF atmosfeermodel. Daarnaast zijn er ook modellen die rekenen over een beperkt gebied; zo'n limited area model (LAM) wordt nu ontwikkeld op het KNMI. LAM's worden gebruikt om voor een korte termijn (30-36 uur vooruit) gedetailleerdere verwachtingen te maken dan globale modellen aankunnen; bovendien zijn de prognoses meestal gebaseerd op recentere analyses. De verversingsfrequentie ligt bij LAM's gewoonlijk hoger dan bij globale modellen. De winst aan tijd en geheugen ruimte die wordt geboekt door het rekengebied te beperken, wordt deels benut voor een verkleining van de roosterpuntafstand. Kleinere roosterpuntafstanden vereisen ook kleinere tijdstappen in de berekeningen; toch blijft de totale rekentijd gewoonlijk onder die van een globaal model. De rekenresultaten zijn ook om een andere reden eerder beschikbaar: doordat alleen waarnemingen vanuit het beperkte gebied nodig zijn, hoeft men minder lang te wachten tot er voldoende binnen is: de zogeheten 'cut-off tijd' is korter en men kan sneller na waarnemings-tijd met de berekeningen beginnen. Een probleem bij LAM's is de situatie aan de randen van het model. De waarden van de diverse meteorologische grootheden op rand-roosterpunten ontleent men meestal aan een globaal model, dat zelf op een bol, dus zonder randen kan werken.



Figuur 5. Variabelen (rechthoeken), processen (ellipsen) en wisselwerkingen (pijpen) in het ECMWF-atmosfeermodel.

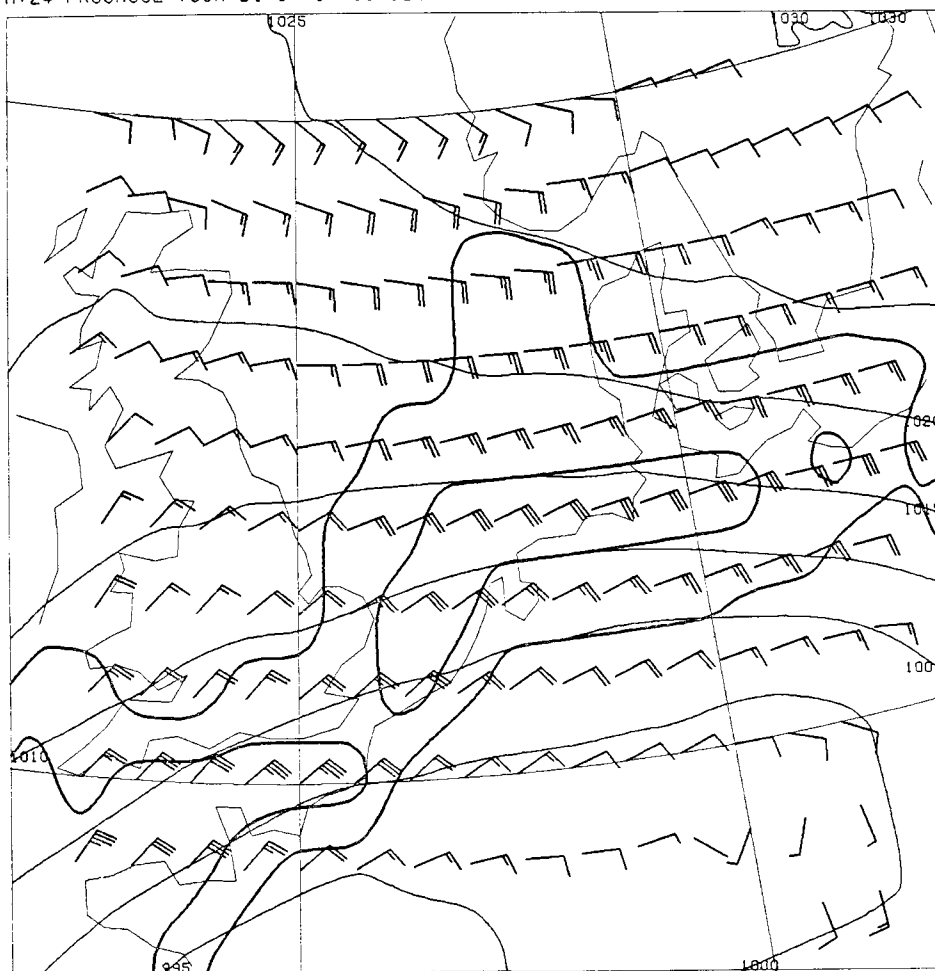
Produkten

De rekenresultaten van computermodellen worden gebruikt bij het opstellen van verwachtingen en bij het uitgeven van waarschuwingen. Voor zover het om atmosfeermodellen gaat die op andere weercentra draaien worden eerst bulletins verzonden en binnengehaald, die de benodigde informatie bevatten. De prognoses van het ECMWF ontvangt het KNMI via een directe 9600 baud lijnverbinding. De produkten van het computermodel van de Britse weerdienst komen binnen via het

internationale meteorologische telecommunicatienetwerk GTS. De computerprognoses worden gewoonlijk gepresenteerd in de vorm van een tekening. De tekeningen worden aangemaakt en opgeslagen in computers van het KNMI te De Bilt en kunnen daaruit opgehaald worden via de vaste lijnverbindingen tussen de hydro-meteorologische centra en De Bilt. Figuur 6 geeft een voorbeeld van zo'n tekening; zij toont het Noordzeegebied met de verwachte luchtdrukverdeling, windvanen die windrichting en windsnelheid visualiseren en gebieden met veel

GRONDWIND, WINDKRACHT EN LUCHTDRIK

H+24 PROGNOSE VOOR DI 04-04-89 12Z



Figuur 6. Grafische presentatie van een luchtdruk- en windveld boven de Noordzee en omgeving.

wind, omsloten door dikke zwarte lijnen. Dergelijke presentaties bestaan ook van allerlei andere meteorologische variabelen; ze vormen een belangrijk hulpmiddel voor de meteoroloog, die bijvoorbeeld hydrometeorologische voorlichting moet geven. Het blijven echter prognoses, gebaseerd op modelvoorstellingen van de atmosfeer. De werkelijkheid kan wel eens anders uitpakken, doordat de atmosfeer een eigen weg kiest of doordat het gevaarlijke weer zich op een kleinere schaal afspeelt dan de modeluitvoer aankan. Verder is de atmosferische grenslaag, de onderste laag van de dampkring waarin 'het weer' zich afspeelt en aan de onderkant waarvan de wisselwerking tussen atmosfeer en zeeoppervlak in feite plaatsvindt, in de atmosfeermodellen nog onvoldoende nauwkeurig beschreven om direct bruikbaar te zijn voor alle practi-

sche toepassingen. De meteoroloog moet met de kennis, de gegevens en het 'gereedschap' waarover hij beschikt een uitspraak doen over mogelijke veranderingen in het heersende weer en mogelijke afwijkingen van de computerprognoses; de informatie uit figuur 6 alleen is hiervoor niet voldoende. De computeruitvoer wordt niet alleen voor de meteoroloog geïnterpreteerd. Er zijn tevens computerprogramma's ontwikkeld die met statistische methoden de kans aangeven dat bijvoorbeeld windkracht 8 te IJmuiden gehaald of overschreden wordt. Deze programma's, waarvan de uitkomsten bekend staan als 'gidsverwachting' vormen waardevolle aanvulling op de directe modeluitvoer en de presentatie daarvan. Wanneer de windverwachting klaar is, is het fundament voor de hydrometeorologische voorlichting gelegd. Het gaat daarbij niet alleen om de wind op een bepaalde locatie, maar over het gehele Noordzeegebied en omgeving. Nu

dient de wind ingevoerd te worden in eenvoudige methodieken voor wateropzet- of voor deiningberekening, zoals beschreven door Donker in Otter 88-3. Daarnaast worden de winden door atmosfeermodellen rechtstreeks doorgesluisd naar geavanceerde numerieke modellen, die golfspectra en wateropzetten kunnen berekenen. Door het belang van een nauwkeurige invoer van de wind bij dit soort berekeningen zijn de resultaten van de eenvoudige 'natte' methodieken nog steeds van vergelijkbare kwaliteit als de resultaten van de geavanceerde modellen. De hogere kwaliteit van de door de meteoroloog ingevoerde wind compenseert dan de vereenvoudigingen, die de methode hanteert.

Kaderstukje

De vooruitzichten van 2-5 dagen vooruit voor Nederland en de Noordzee, die de hydrometeorologische centra verstrekken aan sommige van hun klanten, zijn gebaseerd op computerprognoses van het Europees Centrum voor Weersvoorspellingen op Middel-lange Termijn. In de wandeling wordt dit centrum meestal aangeduid met de beginletters van de Engelse naam ECMWF. Het centrum is gevestigd te Reading in Engeland.

Op het centrum werken ongeveer 140 mensen. Een deel van het personeel is in vaste dienst. Een ander deel, veelal in de wetenschappelijke sfeer, is afkomstig van de meteorologische diensten van de lidstaten en keert na een aantal jaren weer terug naar de eigen dienst. Er werken ook enkele Nederlanders bij het centrum.

Het centrum werd in 1975 opgericht. Elk der deelnemende meteorologische diensten was zelf niet in staat voldoende mankracht, rekenvermogen en financiën op te brengen om het probleem van de weersverwachtingen op middel-lange termijn op te lossen. Gezamenlijk bleken ze dit wel te kunnen. Het centrum heeft diverse computers en supercomputers in gebruik; het is in feite het grootste computercentrum ter wereld. Met behulp van deskundigen uit de lidstaten zijn atmosfeermodellen ontwikkeld, waarmee de verwachtingen worden gemaakt. Het centrum heeft een operationele afdeling, die verantwoordelijk is

voor de dagelijkse productie van verwachte weerkaarten. Daarnaast is er een wetenschappelijke afdeling die de produkten evalueert, de modellen verbetert en geheel nieuwe modellen ontwerpt. Een deel van de rekencapaciteit van het centrum wordt ter beschikking gesteld van de lidstaten. Ook het KNMI maakt intensief gebruik van de rekenfaciliteiten, die de supercomputers van het centrum bieden.