

Eindrapport

'BoWa NL'

'Visie BovenluchtWaarnemingen Nederland'

Sander Tijm  
Ben Wichers Schreur  
Henk Klein Baltink  
Datum: 01-04-2001

# Samenvatting

Het doel van het project BoWaNL was het ontwikkelen van een visie op een optimaal netwerk voor waarnemingen van de bovenlucht boven Nederland. In dit project moest een antwoord gegeven worden op de volgende twee vragen:

- 1) Kan de radiosonde van De Bilt opgeheven worden ten behoeve van EUCOS (EUMETNET Composite Observing System) waarbij de vrijkomende middelen geïnvesteerd moeten worden in een uitbreiding van de waarnemingen boven de Atlantische Oceaan (korte termijn vraag)?
- 2) Wat is het optimale netwerk voor metingen van de toestand van de bovenlucht op basis van de huidige en binnenkort operationele meettechnieken waarbij de nadruk ligt op het meten van mesoschaal verschijnselen (lange termijn vraag)?

Op basis van een inventarisatie van de huidige bekende en toepasbare technieken voor het meten van de bovenlucht en de verschillende toepassingen van de radiosonde van De Bilt komen we tot de volgende conclusies:

- 1) Ten aanzien van het al of niet opheffen van de radiosonde van De Bilt:
  - De radiosonde van De Bilt is essentieel voor het onderzoek van KS, in het bijzonder als aanvulling op de meetlocatie Cabauw.
  - Vooralsnog is er geen alternatief voorhanden voor het gebruik van de radiosonde in de weerkamer. Dit geldt vooral voor een aantal grenslaagverschijnselen en het meten van de luchtvochtigheid.
  - De radiosonde van De Bilt is niet essentieel voor mesoschaal analyse met behulp van modellen.
  - Uitdunning van het aantal radiosondes boven W-Europa en een uitbreiding van het aantal radiosondes boven de Noord-Atlantische Oceaan met het vrijkomende geld geeft een verbetering van de korte termijn verwachtingen boven Europa (Pailleux et al., 1998).
- 2) Ten aanzien van het optimale bovenluchtmeetnet:
  - De synergie van waarnemingen door mesoschaal analyse is essentieel voor het optimale gebruik van bovenluchtwaarnemingen.
  - De verbetering van operationele mesoschaalverwachtingen kan alleen vorm krijgen als er additionele waarnemingen van de bovenlucht (hogere frequentie en ruimtelijke dichtheid) komen. Remote sensing systemen kunnen deels in die behoefte voorzien.
  - De radiosonde van De Bilt is niet essentieel voor een mesoschaal meetnet van de bovenlucht.
  - De configuratie van het netwerk moet op basis van de gegeven scenario's getest worden in gevoeligheidsstudies.

Het bovenstaande levert de volgende aanbevelingen op:

- 1) De radiosonde van De Bilt moet tenminste gehandhaafd blijven tot er een alternatief uit mesoschaal analyse en modellering gerealiseerd is.
- 2) Gevoeligheidsstudies naar de diverse scenario's moeten uitgevoerd worden.

# Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Inventarisatie bovenluchtwaarneemnetwerk Nederland</b>	<b>5</b>
2.1	De radiosonde . . . . .	5
2.2	Windprofilers . . . . .	8
2.3	RASS . . . . .	11
2.4	SODAR . . . . .	12
2.5	Weer-radar . . . . .	13
2.6	AMDAR . . . . .	15
2.7	Verdeling van de huidige bovenluchtwarnemingen . . . . .	16
<b>3</b>	<b>Nieuwe technieken bovenluchtwarnemingen</b>	<b>22</b>
3.1	Pilots . . . . .	22
3.2	AMDAR vocht . . . . .	22
3.3	LIDAR . . . . .	23
3.4	Ground-based GPS . . . . .	24
3.5	GPS Radio Occultatie . . . . .	25
3.6	Passieve profilers: temperatuur . . . . .	26
3.7	Passieve profilers: waterdamp . . . . .	26
<b>4</b>	<b>Het gebruik van bovenluchtwarnemingen in Nederland</b>	<b>27</b>
4.1	Het gebruik van de radiosonde in de weerkamer . . . . .	27
4.2	Overzicht van gebruik van radiosonde gegevens De Bilt voor onderzoek . . . . .	32
4.3	Radiosondes in modellen . . . . .	34
<b>5</b>	<b>Het toekomstige bovenluchtmeetnet</b>	<b>36</b>
5.1	Toekomstscenario's . . . . .	36
5.2	Kosten verbonden aan de scenario's . . . . .	38
<b>6</b>	<b>Conclusies</b>	<b>43</b>

# Hoofdstuk 1

## Inleiding

Het project BoWaNL heeft als doel een visie te ontwikkelen over de toekomst van het bovenluchtwarneemnetwerk boven Nederland en het Nederlandse deel van de Noordzee. Deze visie is gewenst door het verleggen van accenten in de waarnemingsstrategie van EUMETNET (EUropean METeorological services NETwork), veranderingen in de bezetting van de weerkamer in De Bilt en de ontwikkeling van nieuwe waarneemsystemen.

In het EUCOS-project (EUMETNET Composite Observing System) wordt gestreefd naar een verbetering van de korte termijn weersverwachting (24-72 uur) boven Europa. Binnen dit project wordt gezocht naar manieren om de dichtheid van waarnemingen in data-arme gebieden te verhogen op een voor de EUMETNET-leden kosten neutrale manier. Een van de opties is een vermindering van het aantal radiosonde stations in Europa tot een niveau dat nog steeds voldoende is voor numerieke korte termijn weersmodellen. De middelen die hierdoor vrijkomen kunnen dan aangewend worden voor meer automatisch te lanceren radiosondes vanaf schepen op de Atlantische Oceaan. In een rapportage van een expert-bijeenkomst over EUCOS concluderen Pailleux et al. (1998) dat extra ASAP's (Automated Shipborne Aerological Programme, automatische radiosondes opgelaten van schepen) van alle huidige waarneemsystemen waarschijnlijk de grootste verbeteringen zullen geven in de korte termijn weersverwachting. Studies naar de klimatologie van de gevoelige gebieden voor de 48-uurs verwachting boven Europa (Marseille en Bouttier, 2000) laten zien dat op grotere hoogte (500 hPa) de grootste gevoeligheid boven noordoost Canada en de Atlantische Oceaan ten oosten daarvan ligt. Om de verwachtingen te verbeteren zouden in dat gebied dus extra profielen gemeten moeten worden. Aan het (zee)oppervlak ligt de grootste gevoeligheid in het zeegebied ten zuiden van IJsland, duidelijk oostelijk van de gevoeligste gebieden in de bovenlucht.

De consequentie van het EUCOS-project voor Nederland zou kunnen zijn dat de radiosonde in De Bilt voor de numerieke voorspellingen met LAMs (Limited Area Models) niet meer voortgezet hoeft te worden. Het budget dat het KNMI hieraan nu besteedt moet dan binnen EUMETNET worden aangewend voor een automatische lanceerinstallatie van radiosondes op een schip dat tussen Europa en Noord-Amerika vaart. Het afschaffen van de radiosonde in De Bilt is echter niet triviaal. Naast de modellen die verwachtingen voor de korte en middellange termijn maken, zijn er nog vele andere gebruikers van deze gegevens. Eén van de doelen van BoWaNL is een inventarisatie te maken van het gebruik in de weerkamer, in mesoschaal modellering, maar ook binnen klimaat- en atmosferisch onderzoek.

De ontwikkeling en operationalisering van nieuwe meetsystemen voor de bovenlucht zijn ook een aanleiding voor dit project. Met remote sensing systemen zoals bijv. windprofilers, Doppler Radar en LIDAR en met AMDAR kan de bovenlucht tegenwoordig ook bemeten worden. Het grote voordeel van dit soort waarnemingen is de hoge tijdsresolutie, hetgeen met name belangrijk is voor de mesoschaal meteorologie. In dit rapport geven we een overzicht van deze nieuwe operationele meetsystemen voor de bovenlucht. We bespreken de mogelijkheden, nauwkeurigheid en beperkingen van de verschillende systemen. Ook geven we aan of alle huidige waarnemingen op

dit moment optimaal benut worden en welke ontwikkelingen in de nabije toekomst te verwachten zijn.

Een aanvullende aanleiding voor de herbezinning over de radiosonde-oplating van De Bilt is dat door de (mogelijke) automatisering van de visuele waarnemingen er in de toekomst geen dienst meer zal zijn om de radiosonde-oplating in onder te brengen. Er zal dan voor het voortzetten van de radiosonde-oplatingen geïnvesteed moeten worden in een automatische lanceerinrichting. Een afweging van de kosten van een automatische lanceerinrichting t.o.v investeringen in andere nieuwe waarneemsystemen dient dan gemaakt te worden.

Dit rapport bestaat uit een zestal hoofdstukken. In hoofdstuk 2 geven we een inventarisatie van het huidige meetnetwerk. Hierin beschrijven we de karakteristieken van de verschillende systemen voor het meten van wind, temperatuur en vocht die momenteel (semi-)operationeel in gebruik zijn in Nederland. De huidige verdeling van de bovenluchtwarnemingen wordt beschreven in paragraaf 2.7. Andere mogelijkheden voor het waarnemen van wind, temperatuur en vocht bespreken we in hoofdstuk 3. We beperken ons tot de 'bewezen' technologieën en binnen enkele jaren operationeel inzetbare meetsystemen. Hoofdstuk 4 behandelt de verschillende aspecten van de radiosonde van De Bilt. Het gebruik van de radiosonde van De Bilt is geïnventarieerd, en er is bekeken of de essentiële informatie uit de radiosonde mogelijk ook op andere manieren verkregen kan worden. In hoofdstuk 5 tenslotte worden een achttal toekomstscenario's voor het Nederlandse bovenluchtnetwerk geschetst met hun financiële consequenties. Deze scenario's zijn opgesteld aan de hand van literatuuronderzoek naar de impact van verschillende meetsystemen, maar zullen verder onderzocht moeten worden in gevoeligheidsstudies als een vervolg op dit projekt. In hoofdstuk 6 worden de samenvatting van de bevindingen en de conclusies beschreven.

## Hoofdstuk 2

# Inventarisatie bovenluchtwaarneemnetwerk Nederland

In dit hoofdstuk bespreken we de eigenschappen van de diverse systemen die op dit moment in Nederland in gebruik zijn voor het waarnemen van de bovenlucht. Deze informatie hebben we nodig om aanbevelingen te kunnen doen over het bovenluchtwaarneemnetwerk boven Nederland. We bespreken achtereenvolgens de radiosonde, windprofiler, RASS, SODAR, weerradar en AMDAR. In de laatste paragraaf geven we een overzicht van de verdeling van de verschillende waarnemingen in de ruimte en de tijd. Bij de beschrijving van de nauwkeurigheid is het goed om in het achterhoofd te houden dat de conventionele bovenluchtwaarnemingen volgens de WMO dienen te voldoen aan de eisen uit het waarnemingenhandboek (1996). Deze zijn hier opgesomd in tabel 2.1.

### 2.1 De radiosonde

#### 2.1.1 Meetprincipe

Radiosondes zijn belangrijk omdat ze complete thermodynamische profielen opleveren en daarmee een goed overzicht van de verticale opbouw van de atmosfeer. Geen enkel ander instrument is daar op dit moment toe in staat. De radiosondes die het KNMI gebruikt, meten verticale profielen van temperatuur, relatieve luchtvochtigheid, windsnelheid en -richting als functie van de luchtdruk. De temperatuur wordt gemeten met een keramische chip waarvan de capaciteit afhankelijk is van de temperatuur. De windrichting en windsnelheid worden bepaald uit de verplaatsing van de radiosonde in de tijd. Hierbij wordt de positie bepaald met behulp van het LORAN-C navigatiesysteem. Voor oktober 1997 werd gebruik gemaakt van het Omega navigatiesysteem. De relatieve luchtvochtigheid wordt gemeten met een dunne film capaciteitssensor (hydroactief polymeer). Begin 2001 is overgegaan van de Vaisala RS80 naar de RS90 radiosonde. De RS90 heeft twee vochtsensoren die afwisselend worden verwarmd, hierdoor is een nauwkeuriger vochtigheidsmeting mogelijk.

#### 2.1.2 Resolutie en bereik

De meeste radiosondestations doen twee keer per dag een oplating, om 00 en 12 UTC. Enkele stations o.a. De Bilt, laten ook nog om 06 en 18 UTC een radiosonde op. De sampling snelheid van het DigiCora RS80 radiosondesysteem dat in Nederland gebruikt wordt was 0.8 Hz en om de 10 seconden werd een gemiddelde van 3 samples opgeslagen. Sinds begin januari 2001 wordt

er met 1 Hz gemeten en worden de data iedere seconde opgeslagen. Omdat een radiosonde met ongeveer  $4\text{--}8\text{ ms}^{-1}$  omhoog beweegt was de verticale resolutie van de opgeslagen metingen meestal tussen de 40 en 80 meter (is nu 4-8 m). In De Bilt worden om 00 en 12 UTC andere ballonnen gebruikt dan om 06 en 18 UTC. Het verticale bereik van de radiosonde om 00 en 12 UTC is gemiddeld groter ( $\approx 25\text{ km}$ ) dan om 06 en 18 UTC ( $\approx 17\text{ km}$ , Rothe: [http://info.knmi.nl/~wmo-ow/sysdoc/radiosonde/aero\\_obs.html](http://info.knmi.nl/~wmo-ow/sysdoc/radiosonde/aero_obs.html)). Eens per week wordt er een ozonsonde opgelaten. Deze sonde meet naast de normale parameters ook nog de ozonconcentratie. Het verticale bereik van deze speciale sonde is groter dan van de normale radiosonde, omdat de belangrijkste ozonconcentraties tussen de 15 en 40 kilometer hoogte te vinden zijn.

Variabele	Bereik	Nauwkeurigheidseis
Luchtdruk	Van opp. tot 5 hPa	$\pm 1\text{ hPa}$
Temperatuur	Van opp. tot 100 hPa	$\pm 0.5\text{ K}$
	100 tot 5 hPa	$\pm 1\text{ K}$
Rel. luchtvochtigheid	Troposfeer	$\pm 5\%$
Windrichting	Van opp. tot 100 hPa	$\pm 5^\circ$ , minder dan $15\text{ ms}^{-1}$
		$\pm 2.5^\circ$ bij hogere snelheden
Windsnelheid	100 tot 5 hPa	$\pm 5^\circ$
	Van opp. tot 100 hPa	$1\text{ ms}^{-1}$
	100 tot 5 hPa	$2\text{ ms}^{-1}$

Tabel 2.1: *De vereiste nauwkeurigheid (standard error) van bovenluchtwarnemingen (WMO, 1996).*

### 2.1.3 Representativiteit

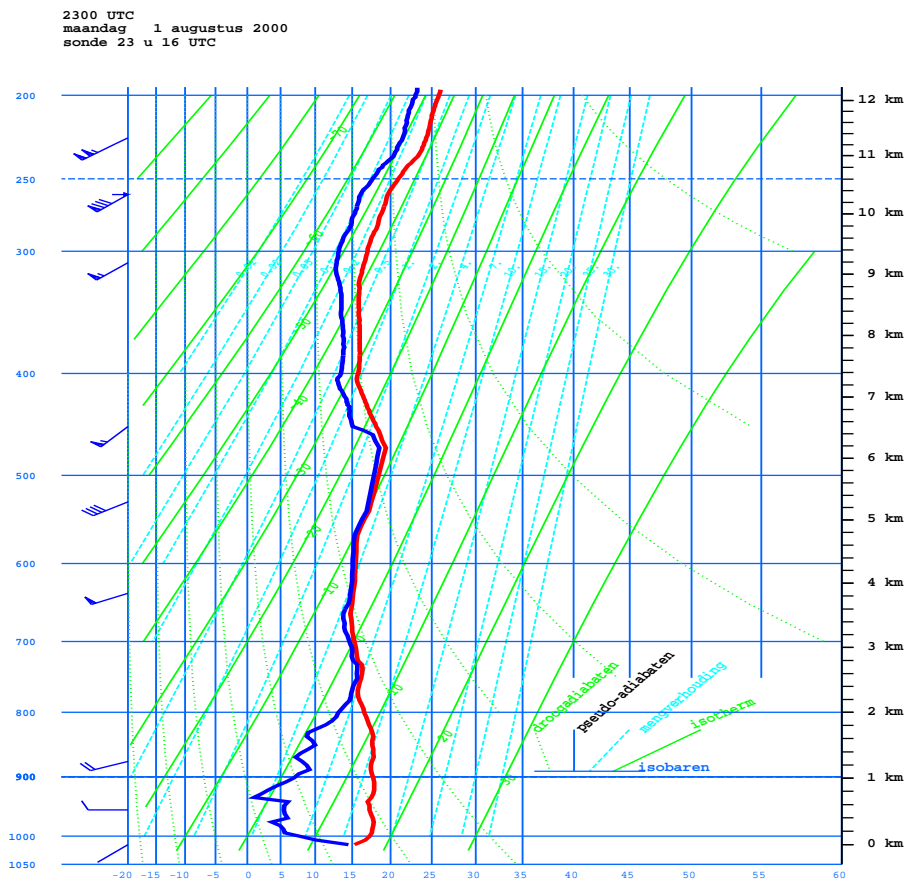
Eén van de nadelen van radiosondes is de snelheid waarmee een vertikaal profiel opgebouwd wordt. Door de stijgsnelheid van ongeveer 6 m/s doet een radiosonde er ongeveer een half uur over om de tropopauze te bereiken. Bij hoge windsnelheden betekent dit dat de radiosonde al meer dan 100 km van het oplatingsstation verwijderd kan zijn voordat de tropopauze bereikt wordt. Daarnaast wordt de radiosonde meestal drie kwartier voor het tijdstip waaraan het radiosondeprofiel wordt toegekend opgelaten. Het 500 hPa niveau, halverwege het oppervlak en de tropopauze, wordt na ongeveer een kwartier bereikt, hetgeen betekent dat deze representatieve hoogte voor de bovenlucht een half uur voor het waarneemtijdstip bereikt wordt. Voor globale modellen met gridboxen van  $50 \times 50\text{ km}^2$  zijn de grote afstand tot de oplatingsplaats en de vroege oplating nauwelijks een probleem te noemen. Hogere resolutie mesoschaalmodellen zouden echter wel met de mindere representativiteit rekening moeten houden.

Omdat de radiosonde met de lucht meebeweegt is het eigenlijke pad van de sonde een veel rechttere doorsnede door de luchtmassa dan dat het ogenschijnlijk lijkt. De radiosonde-oplating is daardoor representatief voor die kolom die op het oplatingstijdstip boven de oplatingsplaats hangt. Dit is zo'n 30 tot 40 minuten voor het tijdstip waaraan de radiosonde wordt toegekend. Alleen bij sterke windschering (draaiing of verschil in windsterkte) kan het pad dat de radiosonde door een luchtmassa trekt erg scheef zijn. In de meeste gevallen zal dit effect geen grote invloed op de representativiteit van de radiosonde hebben, vooral ook omdat de variaties in de gemeten parameters boven de grenslaag buiten frontale zones en buien niet zo groot zijn. Verder kunnen de omstandigheden in de radiosondeoplating niet representatief zijn voor de gemiddelde omstandigheden, waardoor een radiosonde die gelijktijdig opgelaten wordt op een kleine afstand van de oorspronkelijke sonde, of een korte tijd later op dezelfde plek, niet hetzelfde meet als de eerste sonde. Fouten in de drukmeting of temperatuurmeting veroorzaken fouten in de hoogtebepaling, hetgeen vooral van belang is bij een sterke windschering. Al deze representativiteitsfouten (tijdsfouten, hoogtefout, windscheringsfout) zorgen uiteindelijk voor een totale fout van ongeveer  $1.5\text{ ms}^{-1}$  in de twee windcomponenten, als deze geanalyseerd worden in een model met een roosterpuntsafstand van ongeveer 80 km (Kitchen, 1989). In hoge resolutie modellen, met een mogelijk grotere horizontale

variabiliteit, zal dit getal waarschijnlijk wat groter zijn.

### 2.1.4 Nauwkeurigheid

De eigenlijke sensoren hangen ver onder de ballon aan een lijn van ongeveer 35 meter lengte. Hierdoor kan het sensorkpakket onder de ballon gaan slingeren. Vooral bij lage windsnelheden kan dit slingeren zorgen voor een zig-zag patroon in de windsnelheid en windrichting. Om dit te voorkomen wordt bij snelheden onder de  $5 \text{ ms}^{-1}$  de wind in de eerste 240 seconden gefilterd. Bij hogere snelheden is dit niet nodig en wordt er niet gefilterd. Een verschijnsel als een low-level jet kan dus gewoon in de windprofielen teruggevonden worden. Bij het oudere systeem met het plaatsbepalingssysteem Omega werden de windgegevens altijd met een filter van 240 sec. lengte bewerkt. De windmetingen met het LORAN-C systeem zijn nauwkeuriger dan met het Omega systeem (Nash, 1994). Uit testen met gelijktijdig opgelaten radiosondes schat Nash (1994) dat de random fouten in de windcomponenten bij LORAN-C in de orde van  $0,5 \text{ m/s}$  zijn in de troposfeer. Jaatinen en Pälä (1998) komen voor de fout in de windcomponenten voor LORAN-C op iets hogere waarden van  $0,6 - 0,7 \text{ m/s}$ , en voor OMEGA zelfs op  $2,5 \text{ m/s}$ . De fout van LORAN-C neemt toe bij toenemende hoogte van  $0,5 \text{ m/s}$  op  $3 \text{ km}$  hoogte tot  $0,9 \text{ m/s}$  op ca.  $25 \text{ km}$  hoogte voor de u-component en van  $0,7 \text{ m/s}$  tot  $1,4 \text{ m/s}$  voor de v-component (Jaatinen en Elms, 2000)



Figuur 2.1: De radiosondeoplatting van De Bilt van 02-08-2000, 00 UTC. De rode lijn is de temperatuur, de blauwe het dauwpunt. Links in de plot staat de windrichting en snelheid op een aantal hoogtes.

Andere belangrijke problemen van radiosondes zijn de stralingsfouten bij de meting van temperatuur, en systematische fouten bij het meten van de luchtvochtigheid (Schwartz and Doswell, 1991, Lorenc et al., 1996). De stralingsfouten treden vooral overdag op en nemen toe met de hoogte omdat



op grotere hoogte minder lucht aanwezig is om de sensor af te koelen tot de luchttemperatuur. Hiervoor kan echter redelijk goed gecorrigeerd worden.

Het is bekend dat de RS-80 sensor een systematische droge bias van gemiddeld 5% vertoonde (Guichard et al, 2000). De bias bleek afhankelijk van de leeftijd van de sonde en werd veroorzaakt door verontreiniging van de vochtigheidssensor door het verpakkingsmateriaal. Vaisala is inmiddels overgegaan op een ander verpakkingsmateriaal. Voor oude metingen zijn er correctie-procedures ontwikkeld (Guichard et al, 2000, Lucas en Zipser, 2000) De negatieve bias in de luchtvochtigheid bij een hoge luchtvochtigheid op grotere hoogte (lage temperatuur) kan een probleem zijn, omdat deze bias er voor zorgt dat de geanalyseerde luchtvochtigheid te laag wordt. Daardoor kan de bedekkingsgraad en de neerslagvorming in numerieke modellen in de eerste uren na de analyse zeer nadelig beïnvloed worden (Lorenç et al., 1996). Naast de onderschatting van de luchtvochtigheid bij hoge vochtigheidswaarden kan er ook overschatting optreden bij lage luchtvochtigheden. Ook kan door ijsafzetting op de luchtvochtigheidssensor in wolken of neerslag de luchtvochtigheid daarboven of -buiten niet meer tot de werkelijke waarde dalen. Dit levert dan een veel te hoge luchtvochtigheid op in het bovenste deel van de troposfeer en in de tropopauze (zie bijvoorbeeld figuur 2.1: de radiosonde van 2 augustus 2000, 00 UTC, uitgebreid besproken in Tijn, 2000). Het belang van goede vochtprofielen is o.a. onderzocht door Crook (1996). Uit deze studie volgt dat de ontwikkeling van zware buien gevoeliger is voor de luchtvochtigheid dan de temperatuur. Goede waarnemingen van vocht en temperatuur zijn dus zeer belangrijk. Overigens zullen de systematische fouten in de luchtvochtigheid met het gebruik van de nieuwe radiosonde Vaisala RS-90 vanaf begin 2001 belangrijk afnemen omdat de nieuwe vochtigheidssensor een stuk nauwkeuriger is (Leiterer e.a., 1997).

Een ander probleem dat op kan treden is dat de luchtvochtigheid van de radiosonde al nabij het aardoppervlak niet overeenkomt met de in de weerhut gemeten luchtvochtigheid (Cole en Miller, 1995, Leiterer et al, 1997). Echter door voor de oplating de relatieve luchtvochtigheid te meten en die ter plekke te vergelijken met de relatieve luchtvochtigheid in de weerhut kan een correctie aangebracht worden op de relatieve luchtvochtigheid die met de radiosonde gemeten wordt. Deze correctie kan in uitzonderlijke gevallen oplopen tot wel 14% (Leiterer e.a., 1997). Door deze correctie toe te passen zullen ook de af en toe grote verschillen tussen de grondwaarneming en de eerste profielmeting sterk verminderd kunnen worden. Bij het KNMI wordt deze correctie (helaas) niet toegepast.

## 2.2 Windprofilers

### 2.2.1 Meetprincipe

Windprofilers zijn remote sensing instrumenten die met behulp van electromagnetische straling het profiel van de wind bepalen. Het overgrote deel van de windprofilers is gebaseerd op het gepulste Doppler radar principe. Deze systemen werken op het principe dat uitgezonden radarsignalen een Dopplerverschuiving ondergaan als ze terugkaatsen op bewegende media. De Dopplerverschuiving is evenredig met de component van de snelheid van het medium in de richting van de radarbundel. Door in minimaal drie verschillende richtingen de Dopplerverschuiving te meten kan de 3-D snelheidsvector in de atmosfeer bepaald worden. De afstand tot de radar wordt bepaald uit het tijdsverschil tussen zenden en ontvangen. De lengte van de radarpuls bepaalt de verticale resolutie van de metingen. De reflectie van de radarsignalen kan plaatsvinden op zowel brekingsindexfluctuaties veroorzaakt door turbulentie (clear-air Bragg verstrooiing), als ook op wolken- en neerslagdruppels (Rayleigh verstrooiing). De sterkte van de reflectie is sterk golflengte afhankelijk voor Rayleigh verstrooiing ( $\propto \lambda^{-4}$ ) maar veel minder voor Bragg verstrooiing ( $\propto \lambda^{-1/3}$ ). In geval van Bragg verstrooiing vindt de sterkste reflectie plaats aan fluctuaties met een karakteristieke afstand van de halve radargolflengte. Daarnaast kan reflectie ook plaatsvinden op insecten, vogels, vliegtuigen en (hoge) obstakels op de grond in de nabijheid van de profiler. Windprofilers zijn gebaseerd op de Bragg-verstrooiing, maar bij hogere frequenties speelt ook Rayleigh verstrooiing een grote rol

of kan de Bragg verstrooiing zelfs geheel domineren. Windprofilers werken in een frequentiegebied van ca. 50 MHz tot enkele GHz. Verzwakking van de signalen door absorptie of verstrooiing speelt bij deze frequenties en relatief korte afstanden in de vertikaal nauwelijks of geen rol.

De golflengte en systeemeigenschappen (vermogen, antenne) zijn bepalend voor de karakteristieken van een windprofiler zoals het maximale bereik, de minimale hoogte en beïnvloeding van het bereik door bijvoorbeeld neerslag.

Voor windprofilers zijn zendvergunningen nodig en moeten frequenties en bandbreedtes worden toegewezen. Door het steeds intensievere gebruik van de atmosfeer voor o.a. communicatiedoeleinden is het verkrijgen van een zendvergunning soms vrij lastig. Wel is door World Radio Conference in 1997 resolutie COM5-5 aangenomen waarin voor profilers drie frequentiebanden voor operationeel gebruik worden toegewezen.

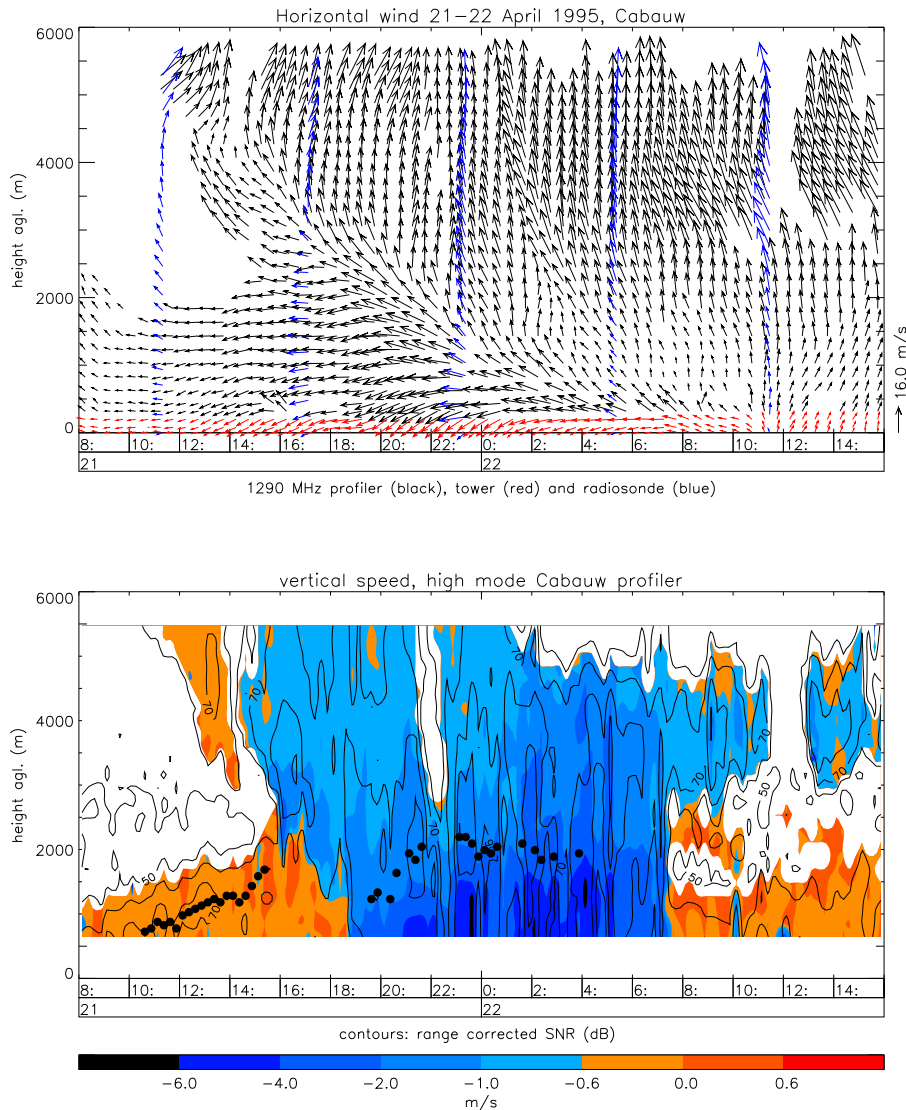
## 2.2.2 Resolutie en bereik

Op basis van de karakteristieken van windprofilers kunnen we ze indelen in 3 categorieën (Lafaysse, 1994): de stratosferische profilers, de troposferische profilers en de grenslaagprofilers. De stratosfeerprofilers leveren windprofielen tot gemiddeld 20 kilometer hoog. Het uitgezonden signaal ligt rond 50 MHz (golflengte rond 6 meter). De troposfeer profilers komen gemiddeld tot 10-12 kilometer hoog bij frequenties rond de 400 MHz. Grenslaagprofilers produceren profielen met een gemiddelde maximale hoogte van 3-4 kilometer. Dit type profiler maakt gebruik van het frequentiegebied rond 1 GHz. Een groter vertikaal bereik gaat meestal gepaard met een grotere minimale hoogte van het profiel (minder waarnemingen dicht bij het oppervlak) en een grovere verticale resolutie. Voor het meten van details als een nachtelijke low-level-jet zijn grenslaagprofilers daardoor veel meer geschikt dan stratosfeerprofilers.

Het maximale bereik van de profilers hangt af van systeemkenmerken (frequentie, zendvermogen, antenne), instellingen (bijv. pulslengte, pulsherhalingsfrequentie) en atmosferische condities. Omdat de windprofilers met name gevoelig zijn voor vocht kan in een droge en weinig turbulente atmosfeer het maximale bereik sterk afnemen. Het maximale bereik van de grenslaagprofilers wordt mede bepaald door de aanwezigheid van neerslag. Bij neerslag ligt het verticale bereik bijvoorbeeld veel hoger dan onder droge omstandigheden. Figuur 2.2 laat dit effect mooi zien. Op deze dag trok er een front over Nederland (te zien in de veranderende windrichting). De bij het front horende neerslag (het blauw-gekleurde gebied) zorgt voor het veel hogere dan gemiddelde bereik van de windprofiler. Het gat in het bereik boven 2 km in het eerste deel van de figuur tussen 11 en 14 UTC, wordt veroorzaakt doordat neerslag verdampt voordat deze de grond bereikt. Daardoor zijn er naast de onderste 2000 meter ook bovenin bruikbare echo's. De langzaam verder naar beneden vallende neerslag en het zakken van het front zorgen voor het dichten van het gat.

## 2.2.3 Nauwkeurigheid

Tabel 2.2 geeft een overzicht van de vergelijkingen van radiosondes met windprofilergegevens. De standaarddeviaties van de windrichting en snelheid nemen af naarmate de hoogte toeneemt. Dit wordt veroorzaakt door een kleinere variabiliteit en grotere snelheid van de wind op grotere hoogte. Klein Baltink (1998) vergelijkt de onderste meetpunten van de windprofiler met de torenmetingen van Cabauw. De standaarddeviatie van de windsnelheid lag in deze studie rond de  $1 \text{ ms}^{-1}$  terwijl voor de windrichting een standaarddeviatie van maximaal  $16^\circ$  gevonden werd. Deze getallen zijn wat kleiner dan in de publicatie van Engelbart et al. (1996) hetgeen waarschijnlijk veroorzaakt wordt doordat de torenmetingen representatiever zijn voor de profilermetingen dan de radiosondemetingen. De torenggegevens zijn net als de profilerwaarnemingen gemiddelden over een bepaalde periode. Hoge windsnelheden worden over het algemeen onderschat door windprofilers. Operationele bewaking van de gegevens laat zien dat de negatieve bias bij hoge windsnelheden  $1 \text{ à } 2 \text{ ms}^{-1}$  bedraagt op de meeste sites (Nash, 1994; Lafaysse, 1994). Overigens wordt deze onderschatting voor de UHF-profiler in Cabauw niet gevonden in de vergelijking met de radiosonde in De Bilt



Figuur 2.2: Metingen van de horizontale windsnelheid en -richting (boven) en verticale windsnelheid (onder) tijdens een frontpassage op 21 en 22 april 1995. In de bovenste figuur is de wind gemeten met de windprofiler (zwart), de Cabauw toren (rood) en de radiosonde (blauw) geplot. In de onderste figuur zijn verticale luchtsnelheden rood en valsnelheden van druppels blauw. De waarde van  $-0,6 \text{ ms}^{-1}$  is gekozen als grens tussen neerslag en clear-air (Williams et al., 2000). Met zwarte rondjes is in het rode deel de grenslaaghoogte en in het blauwe deel de melting layer, beide bepaald uit de windprofiler echosterkte, weergegeven.

tijdens het CaPRIX experiment uitgevoerd in 2000 (Klein Baltink, 2000).

Vogeltrek zorgt regelmatig voor verstoring van de windmetingen met behulp van grenslaagprofilers. In het voor- en najaar worden regelmatig de treksnelheid en -richting van vogels gemeten i.p.v. de lucht, met name door 1 GHz profilers (Engelbart et al, 1996; Klein Baltink, 1998; Coulter and Holdridge, 1995) maar ook door de 400 MHz profilers. Door de veel grotere golflengte 'zien' de stratosfeerprofilers de vogels niet. De nauwkeurigheid van dit type wordt daardoor niet beïnvloed door vogeltrek. De verstoring door trekvogels begint meestal kort na zonsondergang en kan tot ver na middernacht duren. Buiten de vogeltrekseizoenen is de invloed van vogels geen probleem omdat in de verwerking van de gegevens de enkele verstoorde metingen er eenvoudig kunnen worden uitgefilterd.

Studie	profiler	st. dev. windsnelheid	st. dev. windrichting
Neisser et al. (1994)	53.5 MHz	2.5 ms <sup>-1</sup>	8 - 14°
Engelbart et al. (1996)	1290 MHz	1.68 ms <sup>-1</sup>	20°
Klein Baltink (1997)	1290 MHz	1.9 ms <sup>-1</sup>	20°
Oakley en Nash (1997)	915 MHz	2 - 2.5 ms <sup>-1</sup>	5 - 12°
Yeung (1998)	1299 MHz	± 2 ms <sup>-1</sup>	± 20°

Tabel 2.2: *De standaarddeviaties van windprofilers in windsnelheid en windrichting ten opzichte van radiosondegegevens.*

## 2.3 RASS

### 2.3.1 Meetprincipe

Met een RASS (Radio Acoustic Sounding System) kunnen verticale profielen van de virtuele temperatuur  $T_v$  gemeten worden. Een RASS maakt gebruik van de afhankelijkheid van de geluidssnelheid  $c_a$  van de luchttemperatuur en luchtvochtigheid. Een geluidsbron naast de windprofiler antenne stuurt een akoestisch signaal omhoog. Met het omhooggerichte signaal van de windprofiler kan de verplaatsingssnelheid van de geluidsgolf bepaald worden, en daarmee de virtuele temperatuur (Matuura et al., 1986, May et al., 1988). Omdat de geluidsgolven dichtheidsverschillen veroorzaken kan de windprofiler op dezelfde wijze als bij dichtheidsverschillen veroorzaakt door turbulenties de Dopplerverschuiving meten. Voorwaarde is dat de golflengte van het geluid precies de helft is van de golflengte van de profiler (Bragg voorwaarde). Omdat aan de Bragg-voorwaarde voldaan moet worden om meetbare reflecties te krijgen, hangt de frequentie van het RASS geluid af van de golflengte van de bijbehorende windprofiler. Bij stratosfeerprofilers (50 MHz) hoort een geluidsfrequentie van ongeveer 110 Hz. De grenslaagprofilers (1290 MHz) gebruiken een RASS-frequentie van ongeveer 2850 Hz. Als er tevens verticale luchtbewegingen zijn zal de profiler de som van geluidssnelheid  $c_a$  en de verticale luchtsnelheid  $w$  meten. Een fout in  $c_a$  van 1 m/s geeft een fout in  $T_v$  van  $\approx 1.7$  graden. Correctie voor de luchtsnelheid wordt echter meestal alleen in convectieve situaties gedaan waarin  $w$  groot kan zijn, omdat anders de meetfout in  $w$  de fout in  $T_v$  eerder groter dan kleiner maakt. Doordat een RASS geluid produceert kan hij niet overal neergezet worden. In verband met mogelijke overlast mag dit apparaat niet te dicht in de buurt van woningen geplaatst worden. Voor stratosfeerprofilers produceert de RASS een dermate sterk geluid dat het instrument minimaal 2 tot 5 kilometer van de dichtstbijzijnde woningen verwijderd moet zijn om aan de wettelijke eisen tegen geluidsoverlast te voldoen.

### 2.3.2 Resolutie en bereik

Net als bij windprofilers hangt het verticale bereik van de RASS sterk af van de gebruikte golflengte. Het maximale bereik van een RASS bij een 1290 MHz grenslaagprofiler wordt sterk bepaald door de absorptie van het geluid in de atmosfeer. Waarbij de gemiddeld laagste maximale hoogte gedurende de nacht en in de winter gehaald wordt (Engelbart et al., 1996). Dit wordt veroorzaakt doordat het RASS-geluid bij een lagere luchtvochtigheid en temperatuur meer verzwakt wordt. Bij een 50 MHz stratosfeerprofiler kan het verticale bereik oplopen tot 10 kilometer (May et al., 1988). Een andere belangrijke oorzaak van een verminderd vertikaal bereik is de wind zelf. Bij hogere windsnelheden waait de geluidspuls al snel uit de radarbundel van de windprofiler. Engelbart et al. (1996) proberen het maximale bereik van de RASS te vergroten door de richting waarin de geluidspuls wordt uitgezonden afhankelijk te maken van de windrichting en windsnelheid zoals die gemeten worden door de windprofiler. Coulter (1998) probeert dit te bereiken door een extra geluidsbron stroomopwaarts te plaatsen. De beste resultaten, een additioneel bereik van 200 meter, worden met een extra bron op 11 meter stroomopwaarts van de windprofiler behaald Coulter (1998).

### 2.3.3 Nauwkeurigheid

Een RASS kan de virtuele temperatuur op ongeveer 0.5 graden nauwkeurig meten. Angevine en Ecklund (1994) vinden een gemiddeld verschil van de RASS met 31 radiosondeoplatingen van  $-0.5^{\circ}\text{C}$  op een hoogte van 150 meter oplopend tot  $+0.5^{\circ}\text{C}$  tussen 400 en 1000 meter. In de studie van Engelbart et al. (1996), gebaseerd op meer dan 400 radiosondeoplatingen, zijn deze verschillen iets kleiner ( $-0.2$  tot  $+0.4^{\circ}\text{C}$ ). De koude bias op 200 meter hoogte wordt ook gevonden in een vergelijking tussen RASS- en torenmetingen (Klein Baltink, 1998). Görsdorf en Lehmann (2000) laten zien dat de bias van de RASS te verkleinen is door een betere afstandscorrectie toe te passen. Hiermee wordt de bias gereduceerd tot minder dan  $0.3^{\circ}\text{C}$  en vrijwel onafhankelijk van de hoogte. De standaarddeviatie is ongeveer  $0.7^{\circ}\text{C}$  in Engelbart et al. (1996) terwijl deze bij Klein Baltink (1998)  $0.51$  tot  $0.64^{\circ}\text{C}$  is. In de studie van Görsdorf en Lehmann (2000) is ook de standaarddeviatie iets gereduceerd t.o.v. Engelbart e.a. (1996) en varieert tussen  $0.4$  en  $0.7^{\circ}\text{C}$ .

Bij de RASS temperatuurprofielen moet nog opgemerkt worden dat deze een gemiddelde zijn over een bepaald volume. Daardoor kunnen scherpe gradiënten niet altijd in de RASS profielen terug te vinden zijn. Een voorbeeld hiervan wordt gegeven in Klein Baltink (1998) die vond dat de RASS-temperatuur op 200 meter hoogte meer dan 4 graden afweek van de torenmeting. Dit kon verklaard worden door een zeer scherpe temperatuurgradiënt tussen 140 en 200 meter hoogte, waarbij de temperatuur met meer dan 6 graden toenam.

## 2.4 SODAR

### 2.4.1 Meetprincipe

SODAR (Sound detection and ranging) wordt gebruikt om de wind in de onderste kilometer van de atmosfeer te meten. Een SODAR werkt op hetzelfde principe als een windprofiler, maar gebruikt geluid in plaats van radiosignalen. Door in minimaal 3 richtingen de Doppler-verschuiving van het gereflecteerde signaal te meten kan met een SODAR de windsnelheid en -richting bepaald worden. De meeste SODAR systemen werken met een geluidsfrequentie tussen  $1,5$  kHz en  $4$  kHz. Bij de hogere frequenties neemt de verzwakking in de atmosfeer sterk toe, en is het hooggebied beperkt. De systemen met een hoge frequentie worden vaak aangeduid als mini-SODAR.

### 2.4.2 Resolutie en bereik

Een SODAR heeft voor- en nadelen ten opzichte van windprofilers. Een voordeel is de lage minimale hoogte waarop SODAR bruikbare metingen geeft (vaak  $10$  tot  $50$  meter). Ook de hogere resolutie van  $5$  tot  $50$  meter is een voordeel, zeker bij gebruikersgroepen als de luchtvaart. Scherpe gradiënten kunnen met een SODAR beter gemeten worden dan met een windprofiler. Een nadeel van de SODAR is het beperkte verticale bereik, vaak (veel) minder dan  $1000$  meter. Het hooggebied hangt af van de frequentie van de SODAR, omgevingsgeluid en atmosferische conditie. Omdat de SODAR zelf geluid produceert kan je dit apparaat ook niet overal neerzetten i.v.m. geluidsoverlast. De gevoeligheid voor omgevingsgeluid betekent bijvoorbeeld dat bij veel wind het verticale bereik van een SODAR heel erg klein kan worden. Een voorbeeld hiervan is dat de SODAR op Schiphol geen wind meer kan meten tijdens storm. Ook andere meteorologische omstandigheden kunnen het bereik van een SODAR sterk beperken. Lagen met zeer weinig turbulentie (stabiel) geven bijna geen reflecties waardoor bijvoorbeeld 's nachts het bereik meestal terugvalt. Ook door regenval kan het bereik sterk gereduceerd worden (Beljaars, 1985).

### 2.4.3 Nauwkeurigheid

Onder normale omstandigheden leveren SODAR metingen vrij nauwkeurige windgegevens op. De standaarddeviatie van de windsnelheid bepaald uit vergelijkingen met torenmetingen ligt tussen

de 0.5 en 1.0  $\text{ms}^{-1}$  (Finkelstein et al., 1986; Chintawongvanich et al., 1989; Nash and Bond, 1989) in het hoogtebereik tot 300 meter. Beljaars (1985) vond RMS verschillen van ongeveer 1  $\text{ms}^{-1}$  met torenmetingen in Cabauw. De random fout in de windrichting zoals die gemeten wordt door SODARs ligt rond de  $10^\circ$ . Overdag waren de random fouten gemeten door Chintawongvanich et al. (1989) veel groter dan  $10^\circ$ . Dit werd veroorzaakt door convectie, waardoor grote verschillen in windrichting optraden over kleine afstanden.

Dit alles leidt tot de conclusie dat een SODAR nauwkeurige windgegevens met een hoge verticale resolutie oplevert tot een gemiddelde hoogte van enkele honderden meters (voor een SODAR van het type dat op Schiphol gebruikt wordt). Het hoogtebereik wordt beperkt door de storende invloed van omgevingsgeluid, windruis bij hoge windsnelheden, en stabiliteit van de atmosfeer zoals bijv. bij nachtelijke inversies. Bij neerslag en harde wind blijven soms helemaal geen metingen meer over.

## 2.5 Weer-radar

### 2.5.1 Meetprincipe

De weerradar is het meest bekend vanwege de neerslagbeelden. De moderne Dopplerweerradars zoals die in Nederland geïnstalleerd zijn kunnen echter veel meer. Doordat deze radars scans kunnen maken onder verschillende hoeken kunnen doorsnedes van de atmosfeer (en dus van buiensystemen) gemaakt worden. Ook kan de hoogte van de toppen van buien gemeten worden met deze systemen en kan aan de hand van de sterkte van de reflecties samen met informatie over de opbouw van de atmosfeer de kans op hagel aan de grond bepaald worden. De primaire echobron voor de weerradar is neerslag, maar soms worden ook clear-air echo's waargenomen.

De Doppler-weerradars meten, evenals windprofilers, ook de snelheidscomponent van de echobronnen in de richting van de bundel (de radiële snelheid). Deze gegevens kunnen samengevoegd worden tot 3-D velden van radiële snelheden. Door de gegevens van de twee radars te combineren kan voor het gebied tussen de twee radars het 3-D windveld bepaald worden. Omdat Schiphol met zijn aanvliegroutes ongeveer tussen beide Nederlandse radarsystemen in ligt kan deze informatie zeer goed voor luchtvaarttoepassingen gebruikt worden.

De gegevens uit een enkele radar kunnen ook al zeer waardevol zijn. De 3-D velden van radiële snelheden kunnen in een 3-D of 4-D variationele assimilatie-cyclus meegenomen worden waarmee deze data zeer goed bruikbare windinformatie voor hoge resolutie weermodellen kan leveren. Zo'n geavanceerd assimilatiesysteem is nodig om de veld-informatie goed te kunnen benutten. Voor Nederland betekent dit dat deze informatie op dit moment nog niet gebruikt kan worden omdat het 3-D Var systeem van HiRLAM nog niet operationeel draait. Een goed overzicht van de mogelijkheden die het gebruik van Doppler radargegevens biedt is te vinden in het overzicht van het gebruik in de VS in Serafin en Wilson (2000).

Naast de veldinformatie kan de radar ook een vertikaal profiel van de wind bepalen (VAD = Velocity Azimuth Display, zie Andersson, 1992, Serafin en Wilson, 2000). Op een soortgelijke manier als met een windprofiler kan met de radiële snelheidsvectoren op één afstand tot de radar (en daarmee één hoogte boven het oppervlak) de snelheidsvector op een bepaalde hoogte boven de radar berekend worden. Omdat de radar onder een bepaalde hoek kijkt liggen de radiële snelheidsvectoren op een cirkel met een bepaalde doorsnede (ordegrootte 30 km). Op deze cirkel zal de wind bijna nooit overal dezelfde snelheid en richting hebben. Om toch een eenduidige snelheid te kunnen bepalen wordt aangenomen dat de windsnelheid een linear verloop in de horizontaal heeft.

Bij het gebruik van twee Dopplerradars kan grofweg alleen in een ellipsvormig gebied tussen deze radars het windsnelheidsveld bepaald worden. Atlas et al. (1968), Doviak en Weil (1972), Crane (1973), Wurman et al. (1993) en Protat en Zawadski (1999) beschrijven een methode om met behulp van één Doppler radar en een aantal passieve ontvangers windvelden over een groot gebied te bepalen. De passieve ontvangers zijn een stuk goedkoper in aanschaf en onderhoud waardoor

dit een relatief goedkope manier is om 3-D windvelden over een veel groter gebied te bepalen. De fouten in de op deze manier verkregen data zijn ongeveer twee keer zo groot als de fouten in de data van een enkele radar (Wurman et al., 1993). Deze gegevens kunnen ook gebruikt worden in een variationeel data-assimilatieschema en daarmee een goede initialisatie van het snelheidsveld geven in buisituaties (Protat en Zawadski, 1999; 2000).

### 2.5.2 Resolutie en bereik

De beschikbaarheid van verticale windprofielen is hoger dan je in eerste instantie zou verwachten (Andersson, 1998). De radarbundel reflecteert niet alleen aan neerslagdeeltjes (regendruppels, hagel en sneeuwvlokken), maar ook aan veranderingen in de brekingsindex van de lucht (clear air echo's), veroorzaakt door turbulente fluctuaties in temperatuur, wind en vochtigheid, en bijvoorbeeld insecten. Omdat insecten meestal random bewegen kan uit hun gemiddelde beweging de wind bepaald worden. De clear-air echo's komen vooral in het zomerhalfjaar voor in de grenslaag. Daarbuiten en boven zijn ze veel minder vaak aanwezig. Hierdoor is het verticale bereik van de windprofielen in de zomer gemiddeld groter dan in de winter. De trekbewegingen van vogels vormen net zoals voor windprofilers een probleem voor de bepaling van windprofielen met behulp van weerradars. In het voor- en najaar veroorzaken deze in de avond en nacht vaak valse echo's, die door hun vrijwel constante richting en snelheid waarschijnlijk wel vrij goed te verwijderen zijn door een kwaliteitscontrole.

De gemiddelde beschikbaarheid van verticale windprofielen gemeten met een Doppler weerradar is in Zweden volgens Andersson (1998) 83% op 925 hPa en dit neemt af tot ongeveer 15% op 400 hPa. Tijdens neerslag is het verticale bereik groter (tot 9 kilometer hoogte) dan wanneer het droog is in het meetvolume. Ook de tijd van de dag is van invloed op het verticale bereik. In de zomer zal de grenslaag aan het eind van de dag dikker zijn dan aan het begin. Dit is terug te vinden in de beschikbaarheid van de data die in de zomer maximaal is om 12 UTC en minimaal om 06 UTC. Om 06 UTC is 59% van de tijd een windsnelheid te bepalen op 850 hPa terwijl dit om 12 UTC 98% van de tijd mogelijk is.

Afgaande op de gegevens die op het KNMI-intranet door Klein Baltink gepresenteerd worden, leveren de Nederlandse weer-radars momenteel veel minder verticale windprofielen dan de Zweedse radars. Alleen als het ergens in het meetvolume regent geven de Nederlandse radars betrouwbaar uitzijnde profielen. Een hele grove schatting is dat dit slechts zo'n 10 tot 15 % van de tijd het geval is. Dit is erg weinig om als betrouwbare databron voor in de weerkamer of voor assimilatie in weermodellen gebruikt te worden. Het meest belangrijke en interessante weer gaat echter gepaard met neerslag, dus in die gevallen zullen de profielen aanwezig zijn (veel vaker dan gemiddeld). De verticale resolutie van de profielen is 250 meter. Mogelijk dat het gekozen algoritme (Volume Velocity Processing i.p.v. VAD) niet optimaal is, en teveel waarnemingen worden afgekeurd.

### 2.5.3 Nauwkeurigheid

De verschillen tussen de radiosonde-oplatingen en radarwindprofielen zijn ongeveer even groot als de verschillen tussen radiosonde-oplatingen en windprofilers (Andersson, 1994; Davis et al., 1995; Andersson, 1998). De verschillen die Andersson (1998) vindt, een rms vector-verskil van 3.5 tot 4  $\text{ms}^{-1}$ , zijn veel kleiner dan die in de studie van Davis et al. (1995). In deze laatste studie is het rms vector-verskil tussen de radiosonde en de radar 5.8  $\text{ms}^{-1}$ . Het grote verschil tussen beide studies wordt waarschijnlijk veroorzaakt door onvoldoende correctie voor vogeltrek in Davis et al. (1995). Tijdens neerslag is het verschil namelijk veel kleiner (rms vector-verskil van 4.6  $\text{ms}^{-1}$ ) omdat vogels dan niet of nauwelijks vliegen maar waarschijnlijk ook doordat in neerslag de SNR veel hoger is.

## 2.6 AMDAR

### 2.6.1 Meetprincipe

AMDARs (Aircraft Meteorological Data Reporting) zijn metingen die automatisch door lijnvliegtuigen worden verricht. De parameters die gemeten worden zijn temperatuur en wind. De temperatuur wordt direkt gemeten. De wind wordt bepaald uit de combinatie van de vliegsnelheid (t.o.v. de grond) en de werkelijke luchtsnelheid waarbij de snelheid en richting van het vliegtuig ten opzichte van het oppervlak bepaald worden met behulp van bijvoorbeeld GPS (Global Positioning System). De AMDAR-metingen worden in rapporten verzonden, een rapport kan meerdere metingen bevatten. Het Amerikaanse "AMDAR-systeem" wordt aangeduid met ACARS.

### 2.6.2 Resolutie en bereik

De metingen van de vliegtuigen die opstijgen of dalen om te landen zijn het meest waardevol omdat hieruit profielen gegenereerd kunnen worden. Tijdens het opstijgen en landen is tevens de dichtheid van de metingen het hoogst. Tabel 2.3 geeft de meetstrategieën voor de Duitse en overige Europese vliegtuigen. In het onderste deel van de atmosfeer ligt de waarneemfrequentie vrij dicht in de buurt van de (ruwe) radiosonde. Van deze laatste worden elke 10 seconden waarnemingen opgeslagen, hetgeen overeenkomt met een resolutie van ongeveer 7 à 8 hPa, terwijl AMDARs in de onderste 100 hPa iedere 10 hPa worden doorgegeven. Vooral boven het 900 hPa-vlak is de verticale resolutie van Duitse vliegtuigwaarnemingen veel hoger dan van de andere Europese vliegtuigen.

Europese vliegtuigen behalve Duitse	
stijgen	om 10 hPa in onderste 100 hPa.
	om 50 hPa tot 500 hPa.
	iedere 7 minuten boven 500 hPa.
dalen	iedere 7 minuten boven 500 hPa.
	om 50 hPa boven 700 hPa.
	om 10 hPa onder 700 hPa.
Duitse vliegtuigen	
stijgen	iedere 10 s tot 150 s.
	iedere 50 s tot 20 min.
	iedere 10 minuten daarna.
dalen	iedere 7 minuten boven 18000 ft.
	iedere 20 s tot landing.

Tabel 2.3: *De verschillende meetstrategieën voor bovenluchtwarnemingen met behulp van vliegtuigen.*

Net zoals bij radiosondes leveren AMDARs schuine profielen door de atmosfeer op. Het verschil met de radiosondes is echter dat de vliegtuigen die metingen verrichten, niet met de lucht meebewegen, maar er met een vrij grote snelheid doorheen vliegen. Het profiel is dus niet representatief voor een kolom lucht, hetgeen bij weinig windschering bij een radiosonde wel het geval is. Een ander verschil met de radiosondes is dat de vliegtuigen niet standaard rond de synoptische hoofduren opstijgen en landen. De AMDAR profielen komen minder regelmatig binnen, waarbij er ook nog eens een verschil in meetdichtheid is gedurende een dag. Vliegtuigen vertrekken en landen vooral tussen 06 en 24 lokale tijd. Gedurende de nacht komen er veel minder metingen binnen dan overdag. Het lijkt er op dat de profielen op basis van AMDAR-metingen met bijna dezelfde frequentie binnenkomen als op dit moment de radiosonde in De Bilt wordt opgelaten, waarbij er overdag meer profielen worden gemeten dan met de radiosonde en 's nachts bijna geen.



### 2.6.3 Nauwkeurigheid

Het KNMI is op dit moment kwaliteitsevaluatiecentrum voor de Europese AMDARs. Voor de kwaliteitscontrole wordt de data vergeleken met HiRLAM-waarden. In eerste instantie wordt daar een (+03) verwachting voor gebruikt, later wordt de vergelijking nog een keer uitgevoerd, maar dan tegen de analyse van HiRLAM en deze laatste wordt gerapporteerd. Het nadeel van deze methode is dat de modeluitvoer en AMDAR niet onafhankelijk zijn. De AMDARs worden namelijk meegenomen in de assimilatie van waarnemingen in HiRLAM. Het zou dus beter zijn om de tweede vergelijking weg te laten. Op het ECMWF wordt de vliegtuigdata wel met een verwachting vergeleken waardoor de resultaten hiervan onafhankelijker zijn en waarschijnlijk een beter inzicht geven in de werkelijke nauwkeurigheid van de metingen. Verder is van de nauwkeurigheid van de metingen nog weinig bekend.

Uit de tussentijdse E-AMDAR rapportage (Van der Meulen, 2000) blijkt dat de verschillen tussen de HiRLAM-analyses en AMDAR-waarnemingen niet groot is. In dit rapport worden de verschillen van individuele vliegtuigen opgesomd. De bias in de temperatuur is meestal kleiner dan  $0.5^{\circ}\text{C}$  terwijl de standaarddeviatie voor de verschillende vliegtuigen tussen de  $1.1$  en  $1.7^{\circ}\text{C}$  ligt. Voor de windsnelheid ligt de bias over het algemeen onder de  $0.5\text{ ms}^{-1}$ . Nabij het aardoppervlak is de bias over het algemeen negatief (windsnelheid van het model groter) terwijl op wat grotere hoogte de bias positief is. Dit verschil hoeft niet alleen van de waarnemingen te komen, het kan ook door een modelbias veroorzaakt worden. De standaarddeviatie van de windsnelheid ligt voor de meeste vliegtuigen tussen de  $2.0$  en  $2.8\text{ ms}^{-1}$ . Het ECMWF (1999) geeft geen waarden voor de individuele vliegtuigen, maar gemiddelden per luchtvaartmaatschappij. De bias in de windsnelheid is voor de meeste maatschappijen kleiner dan  $1\text{ ms}^{-1}$ . De RMS van de windvectoren loopt uiteen van  $4.7\text{ ms}^{-1}$  voor de frequent waarnemende maatschappijen tot  $8\text{ ms}^{-1}$  voor de minder vaak rapporterende maatschappijen. Deze RMS-sen van de windvector zijn groter dan de vectorverschillen die Andersson (1998) vindt voor de windprofielen die gemeten worden met behulp van weerradars.

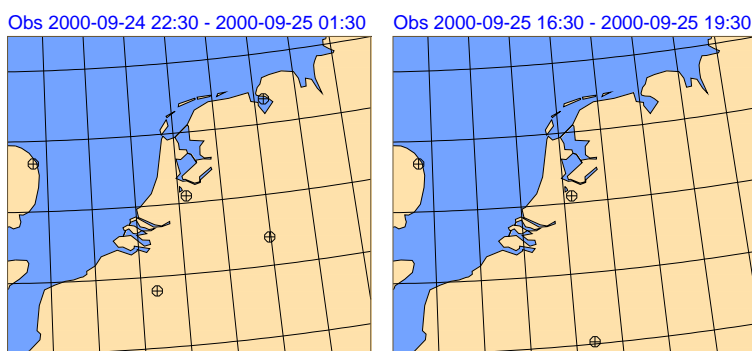
Door het bestuderen van de gegevens die uit de real-time waarnemingen database op het KNMI komen, zijn twee (kleine?) problemen in de AMDAR-rapporten te vinden. Ten eerste wordt de positie van de vliegtuigen niet in alle rapporten op dezelfde manier gerapporteerd. Sommige vliegtuigen geven de positie in graden en minuten, andere geven positie door in tienden van graden ( $4^{\circ}59'$  komt overeen met  $4.98$  graden). Dit kan er voor zorgen dat in extreme gevallen de waarneming ongeveer 44 kilometer van de werkelijke positie af komt te liggen. Voor mesoschaal modellen kan dit een vrij grote afwijking opleveren. Naast het verschil in de rapportage van de positie is de tijd die aan de waarneming wordt toegekend ook een probleem. Af en toe zijn er vliegtuigen te vinden die binnen dezelfde minuut 10 waarnemingen doorsturen. Daarmee lijkt het of dat vliegtuig binnen die minuut soms meer dan 100 kilometer aflegt. De maximale fout die hierbij in de tijd ontstaat is waarschijnlijk kleiner dan 10 minuten, en daarmee te verwaarlozen.

## 2.7 Verdeling van de huidige bovenluchtwaarnemingen

Het huidige bovenluchtwaarneemnetwerk boven Nederland bestaat voornamelijk uit radiosondes en AMDARs. Daarnaast worden in Cabauw verticale profielen van de wind en virtuele temperatuur gemeten met de wind profiler/RASS. Op Schiphol wordt met een SODAR het windprofiel in de onderste (maximaal) 700 meter gemeten. De verdeling van de in situ waarnemingen (radiosonde en AMDAR) in de ruimte en de tijd is voor beide waarneemtypes sterk verschillend. Daarnaast worden beide waarnemingstypes ook nog eens zeer verschillend gebruikt. Zo is de radiosonde zeer belangrijk in de weerkamer en in de analyse van weermodellen, zowel globaal als regionaal, terwijl de AMDARs (op dit moment) eigenlijk alleen in weermodellen gebruikt worden. Op het MWS is wel een mogelijkheid gecreëerd om de AMDAR- en profiler/RASS profielen te bekijken.

Het verschil in gebruik is waarschijnlijk gebaseerd op de historie en het feit dat de AMDAR waarnemingen (nog) niet optimaal gepresenteerd worden. Daarnaast is ook de presentatiekeuze

niet zo gelukkig omdat alleen het laatste profiel van een uurvak bekeken kan worden. Hierdoor kan het gebeuren dat het een zeer ondiep profiel betreft terwijl er in datzelfde uur misschien een veel completer profiel beschikbaar is. Een tweede MWS-presentatieprobleem is dat alleen de waarnemingen uit 1 rapport in een profiel geplot worden, en niet alle waarnemingen van een stijgend of dalend vliegtuig. Hierdoor zijn de profielen veel minder compleet en bruikbaar dan mogelijk is. Ook worden de AMDARs nog niet zo heel lang geproduceerd waardoor nog niet zo goed bekend is wat de karakteristieken van deze waarnemingen zijn. Daarnaast is het voordeel van de radiosonde natuurlijk dat deze op vaste tijdstippen wordt opgelaten waardoor ze makkelijk op te nemen zijn in een vaststaand productieproces. De start- of landingstijd van vliegtuigen met AMDAR kan van dag tot dag behoorlijk verschillen waardoor de AMDAR-profielen niet altijd op hetzelfde moment binnen komen. AMDARs hebben echter als voordeel dat er per dag meer profielen tijdens landingen en starts op Schiphol gemaakt worden dan dat er radiosondes worden opgelaten in De Bilt.

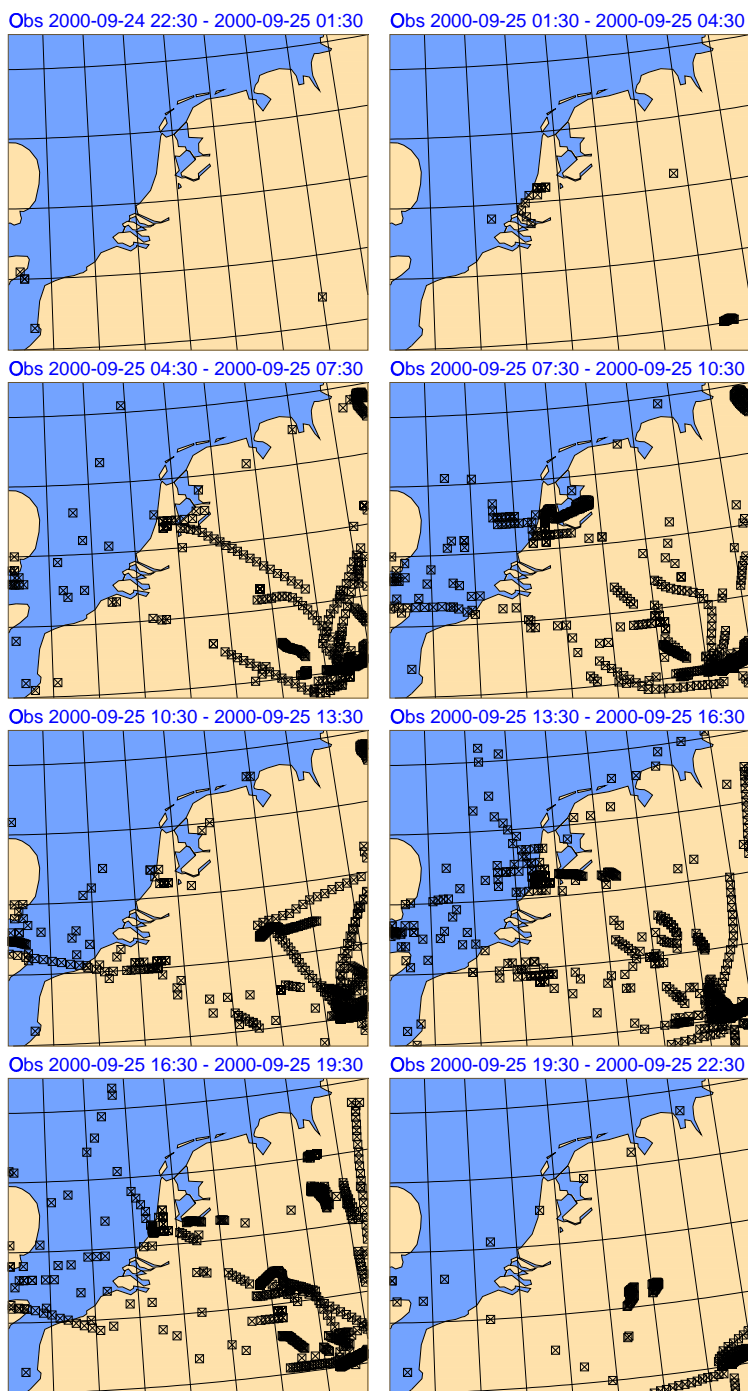


Figuur 2.3: De radiosondeoplatingen rond 00 UTC (links) en 18 UTC (rechts) op 25 september 2000. De cirkels met kruis tonen de plaatsen waar de ballonnen zijn opgelaten waarmee volledige profielen gemeten worden.

Figuur 2.3 geeft de radiosondes weer die in en om Nederland worden opgelaten op de hoofduren (00 en 12 UTC) en de tussenuren (06 en 18 UTC). In deze figuur hebben we alleen 00 en 18 UTC weergegeven omdat het aantal radiosondes dat wordt opgelaten om 12 UTC ongeveer gelijk is aan dat van 00 UTC en het aantal van 06 UTC goed overeenkomt met dat van 18 UTC. In deze figuur is het verschil in bedekking tussen de 00 en 12 UTC en de 06 en 18 UTC oplatingen goed te zien. Om 00 UTC worden er in en vlak bij Nederland 5 radiosondes opgelaten terwijl dat er om 18 UTC 3 zijn. In een iets groter gebied om Nederland heen (Duitsland, Noord Frankrijk en Engeland meegenomen) is het verschil nog groter. Daar worden op de hoofduren gemiddeld 12 radiosondes opgelaten terwijl dat er op de tussenuren 5 zijn.

Voor de bovenlucht zijn er relatief gezien maar heel weinig radiosondewaarnemingen beschikbaar, zeker als we het vergelijken met de oppervlaktestations, waar iedere 6 uur op zo'n 500 plaatsen waarnemingen gedaan worden in het hierboven beschreven ruimere gebied om Nederland. Hiervan is overdag ongeveer 50% door een waarnemer gemeten en de rest door automaten. In de nacht ligt het automatisch gemeten deel hoger. Het is veel lastiger om aan de hand van alleen de radiosondegegevens een compleet beeld te krijgen van de bovenlucht, zeker op de tussenuren als nog maar minder dan de helft van de radiosondes beschikbaar is. Een heel dicht meetnetwerk is in de bovenlucht echter minder noodzakelijk omdat de meteorologische structuren op grotere hoogte vaak groter zijn dan vlak bij het aardoppervlak. Ondanks die grotere structuren voldoet het huidige bovenluchtnetwerk maar net. Samen met meteorologische modellen en satellietwaarnemingen zorgen de radiosondes dat de meteoroloog een goed overzicht van de toestand van de bovenlucht kan krijgen.

Het aantal AMDAR rapporten is sterk afhankelijk van de tijd. Figuur 2.4 toont de AMDAR gegevens op een willekeurige dag in de acht tijdvakken waarin een dag ingedeeld is in de AHOR waarnemingendatabank. Het verloop in de tijd is duidelijk in deze figuur terug te vinden. Veruit



Figuur 2.4: De AMDAR rapporten per 3-uurs tijdvak op 25 september 2000. Linksboven zijn de AMDAR waarnemingen gecentreerd rond 00 UTC, rechtsonder rond 21 UTC. Let op dat de AMDAR-waarnemingen i.t.t. de radiosondes in figuur 2.3 losse waarnemingen zijn. De bedekking lijkt hierdoor veel groter dan van radiosondes.

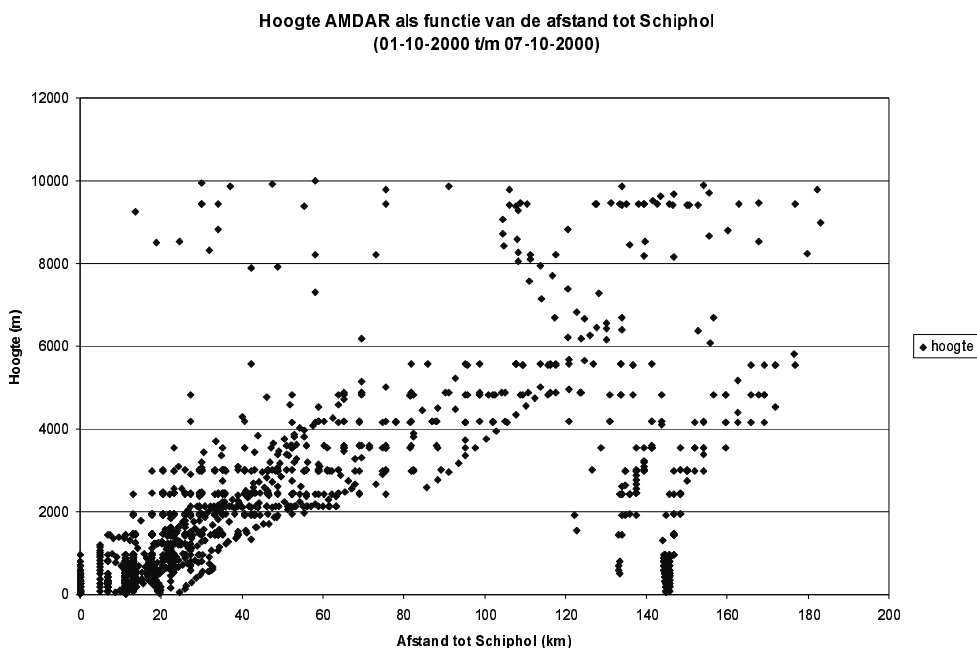
de meeste AMDAR-rapporten liggen tussen 4.30 en 19.30 UTC. Dit beeld komt ook overeen met de gemiddelden die bepaald zijn over een periode van twee weken in de zomer van 2000. Daarnaast is te zien dat er tussen 4.30 en 19.30 UTC per drie uur altijd wel een vliegtuig is dat op Schiphol landt of opstijgt en zodoende een profiel genereert. Een enkele keer is er rond 03 UTC ook een vliegtuig dat landt op of opstijgt van Schiphol. Daarnaast gebeurt het regelmatig dat er tussen

19.30 en 22.30 UTC nog een AMDAR-vliegtuig op Schiphol landt of daarvan opstijgt. Dit betekent dat het gat voor dit waarneemttype tussen 22 en 04 UTC ligt. Ook moet opgemerkt worden dat als de weersomstandigheden heel slecht zijn voor de luchtvaart (zeer dichte mist, zware storm, zware ijzel of sneeuwval) en er dus geen vliegtuigen vertrekken of aankomen, dat er dan ook geen AMDAR-profielen gemeten zullen worden. Op dat soort momenten zijn bovenluchtwaarnemingen echter wel heel belangrijk.

Hoogte (m)	Vertikale resolutie (hPa)
0-1000	10
>1000	50

Tabel 2.4: *De verticale resolutie van de meeste profielen waargenomen door vliegtuigen die op Schiphol landen en opstijgen.*

Voor AMDARs is niet alleen de horizontale bedekking van het gebied waarin we geïnteresseerd zijn van belang, ook de verdeling in de vertikaal is belangrijk. De verticale resolutie bepaald voor een groot deel hoe bruikbaar de AMDAR gegevens zijn voor het maken van verticale profielen. Een inventarisatie van de profielen die door vliegtuigen zijn gemeten die op Schiphol landen of daarvan opstijgen laat zien dat de verticale resolutie voor de meeste vliegtuigen vooral in de onderste kilometer goed is (zie tabel 2.4). Het maximale verticale bereik van de AMDAR-profielen ligt meestal rond de 5500 meter. Daarboven worden door de meeste vliegtuigen geen waarnemingen meer systematisch doorgezonden. Dit geldt niet voor alle vliegtuigen. Een aantal rapporteert ook op grotere hoogte en met een hogere resolutie.



Figuur 2.5: *De hoogte van de AMDAR-rapporten als functie van de afstand tot Schiphol van 1 t/m 7 oktober 2000.*

De representativiteit van de AMDAR-profielen wordt voor een groot deel bepaald door de snelheid (hoek) waarmee vliegtuigen stijgen en dalen. Door de hoogte boven het aardoppervlak als functie van de horizontale afstand van Schiphol uit te zetten voor een groot aantal profielen kan een indruk verkregen worden van deze representativiteit. Figuur 2.5 geeft een goede indicatie van

de representativiteit van de AMDAR-profielen. Overigens moet bij deze figuur opgemerkt worden dat sommige vliegtuigen door verschillen in de rapportage van de positie niet op Schiphol lijken te landen en op te stijgen. Deze vliegtuigen geven de positie door in graden en minuten terwijl de meeste vliegtuigen de positie in tienden van graden doorgeven. Dit verklaart waarom sommige vliegtuigen op 20 tot 30 kilometer van Schiphol de grond lijken te raken.

Uit figuur 2.5 kan geconcludeerd worden dat de meeste AMDARs tot een hoogte van 2 kilometer in een straal van ongeveer 40 kilometer rond Schiphol worden waargenomen. Voor de rapporten tot een hoogte van 4 kilometer is deze afstand ongeveer verdubbeld. Ook zijn in deze figuur een aantal niveaus te vinden waar vaak AMDARs gerapporteerd worden. Onder andere rond 2100, 2400, 2900, 3500, 4100, 4800 en 5500 meter hoogte (50 hPa verticale resolutie) worden veel metingen gedaan. Daarnaast zijn er ook een aantal profielen op ongeveer 145 kilometer van Schiphol te vinden. Dit zijn vliegtuigen die op Zaventem (België) landen of opstijgen.

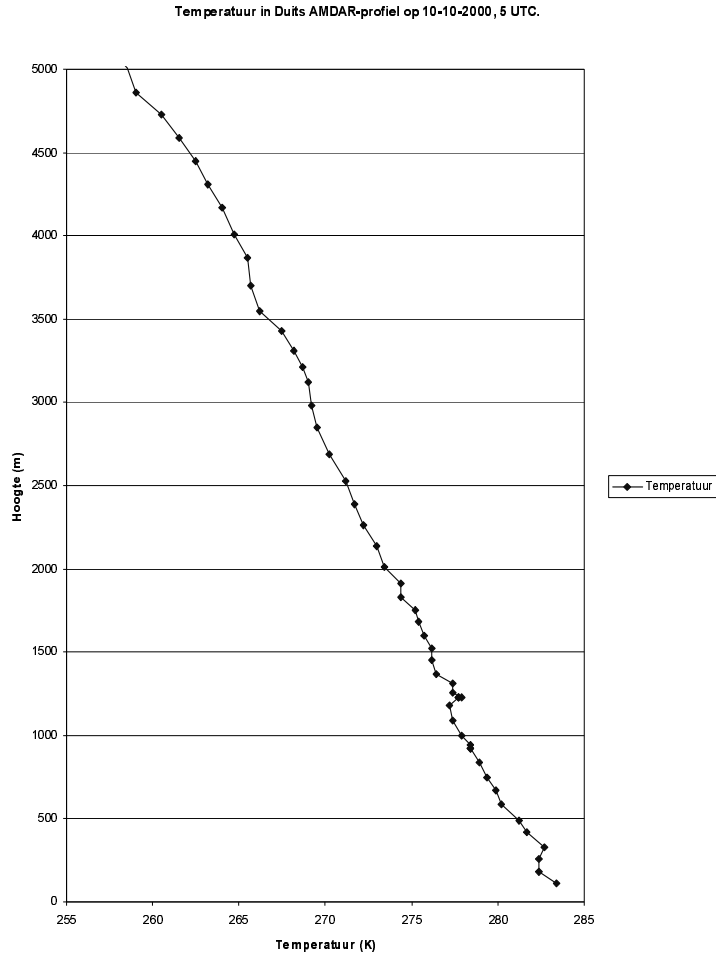
De verticale resolutie van de AMDARs is voor een aantal vliegtuigen die op Schiphol landen boven 1 kilometer hoogte veel beter dan hierboven beschreven. Deze resolutie komt overeen met de resolutie zoals die gevonden kan worden voor veel vliegtuigen die in Duitsland landen (zie figuur 2.6). Boven de 1 kilometer valt de verticale resolutie niet veel verder terug dan 150 tot 200 meter. Deze resolutie is waarschijnlijk beter dan nodig is.

Door de zeer hoge resolutie tot een hoogte van meer dan 5 kilometer en door het grote aantal vliegtuigen dat op Frankfurt landt komen daar per dag zeer veel AMDARs vandaan. Voor de dag van het voorbeeld dat gegeven is in figuur 2.6 werden alleen door de vliegtuigen die vanaf of richting Frankfurt vlogen al meer dan 4000 AMDAR-rapporten verstuurd. Als een vliegtuig ongeveer 100 rapporten doorstuurt per profiel (meestal zijn het er minder) dan betekent dit dat er in de buurt van Frankfurt door vliegtuigen meer dan 40 profielen per dag worden gemeten. Op een aantal tijdstippen werden meer dan 3 of 4 profielen tegelijk gemeten. Het is misschien raadzaam om de meetstrategie van de Duitse vliegtuigen te wijzigen.

Een meet- en rapporteerstrategie zoals voor de radiosonde wordt gebruikt zou het aantal AMDARs, vooral in de grenslaag, sterk terug kunnen brengen. De radiosonde meet met een vrij hoge frequentie (0.8 Hz), maar niet al deze waarnemingen worden bewaard (Zie sectie 2.1.2). Iedere 10 seconden wordt een gemiddelde van 3 metingen bewaard. Ook gaan niet al deze metingen het GTS op. Van de 10-seconden waarnemingen worden alleen de standaard en de significante niveaus geselecteerd en aan de rest van de (meteorologische) wereld doorgegeven. Misschien dat een dergelijke strategie ook op AMDARwaarnemingen toegepast zou kunnen worden. Dit zou het aantal metingen dat doorgegeven wordt niet of nauwelijks laten toenemen terwijl voor de Duitse vliegtuigen zelfs een afname te verwachten is. Een dergelijke rapporteringsstrategie zou de bruikbaarheid van de waarnemingen in modellen, maar vooral in de weerkamer, zeer positief beïnvloeden. Hierbij dient opgemerkt te worden dat in het atmosferisch onderzoek vaak een zo hoog mogelijke resolutie van de bovenluchtwarnemingen gewenst is en de vervanging van de radiosonde door AMDARs met een bovenstaande waarnemingsstrategie als een grote achteruitgang beschouwd wordt.

Als we de verdeling van de AMDARs boven Nederland samenvatten kunnen we zeggen dat de verticale resolutie in de onderste kilometer zeer goed is. Daarboven neemt de verticale resolutie snel af, waardoor het kan gebeuren dat belangrijke overgangen gemist of sterk uitgesmeerd worden. Bij het bekijken van de verticale profielen gemeten door vliegtuigen moet rekening gehouden worden met het feit dat de vliegtuigen op een hoogte van 4 kilometer horizontaal vaak al 40-60 kilometer van Schiphol verwijderd zijn.

Naast de radiosonde en de AMDAR-waarnemingen worden er op dit moment in Nederland ook nog bovenluchtwarnemingen verricht met behulp van een 1290 MHz windprofieler/RASS en met een SODAR. De windprofieler/RASS staat in Cabauw en produceert uurgemiddelden van de windsnelheid en -richting en eenmaal per uur een 5 minuten gemiddeld profiel van de virtuele temperatuur. De SODAR staat op Schiphol en produceert kwartiergemiddelden van de windsnelheid en de windrichting. Naast de Schiphol-SODAR staat er ook nog een SODAR in Borselle. De metingen van deze SODAR zijn momenteel niet beschikbaar voor gebruik door derden. Voor de windprofieler/RASS is op het MWS ook al een weergavemogelijkheid gecreëerd waarbij alle COST-



Figuur 2.6: Een voorbeeld van een AMDAR-profiel van de temperatuur zoals die voor veel vliegtuigen landend en opstijgend in Duitsland kan worden gevonden. Dit voorbeeld is van een vliegtuig dat op 10-10-2000 om ongeveer 5 UTC landt op vliegveld Frankfurt. De verticale resolutie is in bijna het gehele profiel 100-150 meter. De 'hobbel' tussen 1200 en 1300 meter in het temperatuurprofiel wordt veroorzaakt door een tijdelijk stoppen van de daling (cirkelen) waardoor veel waarnemingen van ongeveer dezelfde hoogte komen en de horizontale variabiliteit zichtbaar wordt.

76 windprofilers bekeken kunnen worden die hun gegevens via het GTS versturen. Intranet heeft deze mogelijkheid ook (<http://bgwd59.knmi.nl/~baltink>). Voor de SODAR is nog geen weergave-mogelijkheid op het MWS gecreëerd, maar is wel beschikbaar op de bovenstaande site en op lokale systemen op Schiphol.

## Hoofdstuk 3

# Nieuwe technieken bovenluchtwaarnemingen

Naast de hiervoor beschreven waarneemsystemen zijn er nog een aantal andere technieken voor het waarnemen van wind, temperatuur en luchtvochtigheid. Een aantal van deze (vaak nieuwe) technieken is al zo ver ontwikkeld dat ze nu of binnen enkele jaren operationeel ingezet kunnen worden. In dit hoofdstuk zullen we deze technieken behandelen waarbij eerst de in situ en actieve remote sensing systemen worden behandeld en daarna de passieve systemen.

### 3.1 Pilots

Pilots zijn eigenlijk radiosondes zonder de temperatuur en vochtsensoren. Ze meten alleen het verticale profiel van de windrichting en de windsnelheid. De nauwkeurigheid van deze systemen is vergelijkbaar met die van de wind uit radiosondes.

Pilots zijn bijna net zo arbeidsintensief als radiosondes zelf. Het enige verschil is dat de temperatuur en vochtsensoren niet geijkt hoeven worden voor het oplaten. Doordat ze ook een ballon en helium nodig hebben zijn ze niet veel goedkoper dan radiosondes.

### 3.2 AMDAR vocht

Op dit moment meten vliegtuigen alleen de temperatuur en wind met een verticale resolutie die nabij het aardoppervlak dicht in de buurt van de resolutie van radiosondes komt. De luchtvochtigheid wordt nog niet gemeten doordat er op dit moment nog geen operationele sensoren zijn die nauwkeurig en stabiel genoeg zijn. Hierdoor zijn AMDAR-profielen nog geen volwaardige vervanging voor het huidige radiosondesysteem.

Er wordt echter hard gewerkt aan sensoren die geschikt zijn om goede luchtvochtigheidsmetingen te verrichten onder de extreme condities waaraan instrumenten aan vliegtuigen blootgesteld worden. Fleming and Hills (1993) beschrijven de voorwaarden waaraan dit soort sensoren moeten voldoen. De belangrijkste zijn het stabiel blijven onder een groot aantal omstandigheden, het weinig onderhoud vergen en natuurlijk het voldoende nauwkeurig zijn van de instrumenten. Daarnaast mogen de instrumenten het vlieggedrag niet nadelig beïnvloeden. Tijdens de SRNWP (Short Range Numerical Weather Prediction) workshop over hoge resolutie data assimilatie in Reading (2000) werd duidelijk dat het nog enkele jaren duurt voordat zo'n instrument beschikbaar komt. De schatting was dat het nog minimaal 5 tot 10 jaar zal duren voordat (AMDAR-)vliegtuigen uitgerust kunnen worden met een goed werkende luchtvochtigheidssensor.

## 3.3 LIDAR

### 3.3.1 Raman-LIDAR

LIDAR (light detection and ranging) werkt op het principe van backscattering van door laserlicht "aangeslagen" moleculen. Een LIDAR bestaat uit een laser-transmitter en een telescoop ontvanger waaraan een detector gekoppeld is die het ontvangen signaal om kan zetten in een spectrum. Als het licht van de laser op moleculen valt kunnen bijbehorende electronen aangeslagen worden en op een hoger energieniveau terechtkomen. Als deze electronen daarna terugvallen naar hun oorspronkelijke niveau, dan wordt de vrijkomende energie uitgezonden in de vorm van een foton (met een bepaalde energie). Ieder molecuul heeft 'eigen' niveau's waarop electronen zich kunnen bevinden en dus ook eigen verschil-energieën van fotonen die uitgezonden kunnen worden. Ieder molecuul heeft daardoor zijn eigen karakteristieke lijnspectrum. Waterdamp heeft dus ook zijn eigen lijnen waaraan het herkend kan worden. Door het aantal fotonen te tellen van een specifieke waterdamplijn kan de waterdampconcentratie gemeten worden. Voordelen van LIDAR zijn de hoge resolutie in tijd en ruimte die met deze apparaten gehaald kan worden. Een groot nadeel is het niet functioneren van deze meetmethode tijdens neerslag en in wolken.

Met een Raman-LIDAR (Turner en Goldsmith, 1999; Turner et al, 2000) kunnen zowel temperatuur- als waterdampprofielen gemeten worden. Er zit echter wel een principieel verschil in de manier waarop de waterdamp- en temperatuurprofielen bepaald worden. De hoeveelheid waterdamp wordt gemeten door de intensiteit van bepaalde Raman-scattering frequenties te bepalen. De vertraging in het verkregen signaal is een maat voor de hoogte waar het vandaan komt. Een van de problemen bij deze manier van meten is de storende invloed van verstrooid zonlicht. Hierdoor is het overdag veel minder goed mogelijk om waterdampprofielen te meten met behulp van LIDAR. Turner and Goldsmith (1999) beschrijven een methode waarbij de openingshoek van de telescoop afhankelijk gemaakt wordt van het feit of de zon op is of niet. Door deze hoek overdag kleiner te maken wordt de storende zonsinvloed kleiner. Er is dan echter ook een gevoeliger ontvanger nodig omdat het ontvangen signaal zwakker zal zijn.

Het meten van de temperatuur gaat op een iets andere manier. Het aantal fotonen in een frequentielijn zegt iets over de concentratie van een bepaalde stof. Over de temperatuur zegt dat echter niets. Die informatie komt uit de breedte van de lijn. De moleculen trillen met een bepaalde snelheid die afhankelijk is van de temperatuur. Hoe hoger de temperatuur van een molecuul, des te harder deze trilt. De golflengte van het foton dat uitgezonden wordt hangt door deze trilling af van de richting waarin het molecuul beweegt op het moment dat het foton uitgezonden wordt. Door de verschillende trillingsrichtingen en snelheden zal de uitgezonden lijn een bepaalde breedte krijgen, die groter is naarmate de temperatuur hoger is.

De verticale resolutie van Raman-LIDAR waterdampprofielen is 30 tot 1000 meter waarbij de hoogste resolutie dicht bij het aardoppervlak te vinden is. De tijdsresolutie is 1 tot 60 minuten (afhankelijk van de middelingstijd). De profielen kunnen overdag tot een hoogte van 2-3 kilometer gemeten worden terwijl het bereik 's nachts op kan lopen tot 10-15 kilometer (geen storende invloed zonlicht). Naast een hoge tijdsresolutie heeft de Raman-LIDAR ook een vrij hoge nauwkeurigheid (<10%). Overdag is de nauwkeurigheid slechter dan 's nachts door de verstoring van het zonlicht.

De verticale resolutie van de Raman-LIDAR temperatuurprofielen is wat grover dan de waterdampprofielen (100 meter, Vaughan et al, 1993). Er kunnen profielen gemeten worden tot een hoogte van 15-20 kilometer ('s nachts, overdag 4-8 km) met een nauwkeurigheid van ongeveer 1 K 's nachts en 2-4 K overdag. De tijdsresolutie is weer afhankelijk van de middelingstijd en kan variëren van 1 tot 60 minuten.

### 3.3.2 Differential absorption LIDAR

Naast Raman-LIDARs zijn er ook zogenaamde DIALs (differential absorption LIDARs). Een DIAL gebruikt het verschil in verzwakking van het teruggescatterde signaal in twee golflengtes. De



verhouding tussen de sterktes van de ontvangen signalen is een maat voor de temperatuur. Het voordeel van de DIAL-methode is dat deze minder sterk beïnvloed wordt door het licht van de zon. Er zit een minder groot verschil in de meetnauwkeurigheden overdag en 's nachts. De fijnste verticale resolutie van de temperatuurmetingen is ongeveer 100 meter (Theobald and Bösenberg, 1993; Bösenberg, 1998), waarbij het maximale verticale bereik 3 kilometer is. De nauwkeurigheid van een DIAL temperatuurmeting is ongeveer gelijk aan een Raman-LIDAR meting.

Een DIAL kan naast de temperatuur ook de hoeveelheid waterdamp meten. Deze metingen zijn nauwkeuriger dan de metingen met een Raman-LIDAR (beter dan 5%, Bösenberg, 1998; Wulfmeyer, 1998; Wulfmeyer en Bösenberg, 1998). De verticale resolutie en maximale hoogte zijn, met respectievelijk 60 meter en 10 kilometer, iets minder dan met een Raman-LIDAR. De tijdsresolutie is ongeveer hetzelfde als bij een Raman-LIDAR.

### 3.3.3 Doppler LIDAR

Naast waterdamp en temperatuur kan met een Doppler LIDAR ook de windsnelheid bepaald worden (Frehlich et al, 1994; Klein et al, 1997). Een Doppler LIDAR werkt op hetzelfde principe als bijvoorbeeld een Doppler radar en meet dus de radiële snelheidscomponent. Banta et al. (1993) en Banta (1995) gebruiken de radiële snelheidscomponenten gemeten met een Doppler LIDAR om zeewind aan de Californische kust te bestuderen.

Een verschil met Doppler radars is de gebruikte golflengte van 2-10 micrometer tegen enkele centimeters bij Doppler weerradars. Bij een Doppler LIDAR wordt net zoals bij de radar (zie het vorige hoofdstuk) ook de Velocity Azimuth Display techniek gebruikt om de windsnelheid op een bepaalde hoogte te bepalen. Deze techniek levert profielen op die eigenlijk een gebiedsgemiddelde snelheid weergeven. De grootte van het gebied hangt af van de hoek waaronder de LIDAR omhoog kijkt en de hoogte waarop je kijkt. De verticale en tijdsresolutie van een Doppler LIDAR (5-300 meter, 10 s - 10 min) is veel beter dan van een Doppler Radar, maar de kosten en de ingewikkeldheid van het meten met een Doppler LIDAR, als ook de door wolken, mist, regen en rook gelimiteerde operationele inzetbaarheid zorgen ervoor dat Doppler LIDAR buiten het onderzoek nog niet veel gebruikt wordt.

## 3.4 Ground-based GPS

### 3.4.1 Kolommen

Een van de bijprodukten van GPS, het Global Positioning System, zijn vertragingen van de radiosignalen door de atmosfeer. Uit deze vertragingen en de lokale luchtdruk kan de totale waterdampkolom boven de ontvanger worden berekend. Het eventueel mogelijk om horizontale gradienten in de waterdampkolom af te leiden. Om de waterdampkolom boven een GPS-ontvanger te bepalen moet eerst de invloed van de ionosfeer en de 'droge' atmosfeer (dry-delay) bepaald worden voordat de hoeveelheid waterdamp boven een ontvanger berekend kan worden. De waterdampbijdrage is een vrij klein effect ten opzichte van de andere componenten. De waterdampkolom kan met behulp van GPS tot op 0.5-1 mm nauwkeurig bepaald worden (Rocken et al., 1993; Steinhagen et al., 1998). Momenteel worden o.a. in het kader van het COST-716 project, al semi-operationeel voor een aantal Europese stations near-real time metingen van de waterdamp kolom gegenereerd (zie <http://www.knmi.nl/~haandes/GPS/NRT/>).

### 3.4.2 Tomografie

Met behulp van tomografische technieken is het in principe mogelijk om met een dicht netwerk van ground-based GPS ontvangers het 3-D waterdampveld te reconstrueren (MacDonald et al., 2000). Hierbij maakt men gebruik van de vertraging door de atmosfeer gemeten langs het schuine

pad van het signaal tussen satelliet en ontvanger. Daarvoor moet er dan wel een redelijk dicht netwerk van GPS-ontvangers zijn om voldoende kruisende waterdampvelden te krijgen zodat het 3-D veld daaruit bepaald kan worden. MacDonald et al. (2000) laten in een OSS (Observing System Simulation) zien dat de ruimtelijke en absolute variaties met een netwerk van GPS ontvangers op maximaal 40 tot 60 km onderlinge afstand goed oplosbaar zijn, in de vertikaal met een resolutie van 500 meter en in de horizontaal met een resolutie van ongeveer 40 km. Bij deze stations moet dan ook de luchtdruk (voor de dry delay bepaling) en de luchtvochtigheid (als referentie en constraint bij de variationele assimilatie) gemeten worden. De luchtdruk zou eventueel ook nog uit modelvelden gehaald kunnen worden. Als extra randvoorwaarde moet er ook regelmatig een waterdampprofiel gemeten worden om ook in de vertikaal een referentie te hebben. Vooral onderin de atmosfeer (onderste 2-3 km) is deze methode vrij nauwkeurig. Door bepaalde instellingen in het gebruikte 3D-Var schema is de absolute fout in deze studie overal even groot. Doordat er in bijna alle gevallen minder vocht bovenin de troposfeer zit is de relatieve fout daardoor het kleinst nabij het aardoppervlak. De in Nederland opgestelde GPS-ontvangers staan verder uit elkaar dan 40-60 km. Om deze dichtheid van ontvangers te halen zal het aantal minimaal moeten verdubbelen. Voor een grote en langdurige positieve impact van de GPS-tomografie op de weersverwachting zal er een Europees netwerk met voldoende dichtheid opgezet moeten worden omdat de impact van alleen een netwerk boven Nederland waarschijnlijk te gering of kortdurend is.

Ten opzichte van een radiosondenetwerk levert GPS in de MacDonald-studie niet alleen een superieur horizontaal oplossend vermogen (vertikaal minder dan de radiosonde), ook in de tijd is deze veruit beter (uurlijks ten opzichte van 12-uurlijks). Voor modellen is deze hoge resolutie data zeer interessant omdat bijvoorbeeld buienvorming vaak samenhangt met regionale variaties in de waterdampconcentratie. Het goed assimileren van dit soort data kan een stap voorwaarts opleveren in het juist voorspellen van convectieve systemen. Een van de problemen bij deze methode is dat de nauwkeurigheid van de waterdampvelden afneemt naarmate de GPS-satelliet voor de ontvanger dichterbij de horizon staat. Als blijkt dat hierdoor de waterdampvelden voor de kleinste hoeken boven de horizon een te slechte kwaliteit hebben om meegenomen te worden in de variationele analyse, dan zal het onderste niveau waarop waterdamp met deze methode bepaald kan worden boven een kilometer liggen, bij een horizontale afstand van 40-60 km tussen de ontvangers. Deze minimale hoogte neemt evenredig af met een afnemende afstand tussen de ontvangers. Voor de onderste kilometer is dan nog een andere methode nodig om de waterdampconcentratie te bepalen.

### 3.5 GPS Radio Occultatie

Radio occultatie is de methode waarbij uit de vertraging van het signaal tussen twee satellieten (een GPS satelliet en een LEO, Low Earth Orbiter) de dichtheid van de atmosfeer in het pad, dat het signaal tussen de twee satellieten aflegt, bepaald wordt. Door met een satelliet die achter de aarde wegduikt het GPS-signaal een aantal maal te meten kan een profiel van de dichtheid gemeten worden. In het bovenste deel van de troposfeer en in de stratosfeer is de bijdrage van de waterdamp aan de dichtheid te verwaarlozen en kan uit de metingen de temperatuur redelijk nauwkeurig worden bepaald. Voor de afzonderlijke bepaling van temperatuur of waterdamp in het onderste deel van de troposfeer is een aanname of meting van de andere component noodzakelijk (of men kan met een 3D of 4D variationeel schema direct de vertraging assimileren). De profielen die hieruit te verkrijgen zijn hebben een verticale resolutie van ongeveer een halve kilometer. Ook kunnen ze niet te dicht in de buurt van het oppervlak komen in verband met te grote verstoringen door reflecties aan inversies of het oppervlak.

Het is niet de verwachting dat temperatuur- en waterdampprofielen verkregen met behulp van radio-occultatie een grote rol gaan spelen in de mesoschaal meteorologie. Dit komt doordat ten eerste het aantal profielen niet erg groot is als je een klein gebied rond Nederland bekijkt. Op wereldschaal worden er per dag wel een groot aantal profielen gemeten hetgeen voor globale modellen vooral boven oceanen een welkome aanvulling op de huidige metingen oplevert. Een nadeel van de RO-profielen is tevens dat ze gemiddelden zijn over vrij lange horizontale paden,

met een representatieve lengte van ongeveer 200 km. Hierdoor zullen ze geen variaties op kleine schaal vertonen en zijn ze voor de mesoschaal van relatief weinig waarde.

### 3.6 Passieve profilers: temperatuur

Voor het passief meten van temperatuurprofielen zijn twee soorten instrumenten beschikbaar: Microwave Radiometer Profilers (MRP) en Fourier-Transform Infrared Radiometers (FTIR). MRP's meten in het frequentiegebied van 50 tot 60 GHz. Het spectrum en de sterkte van de uitgezonden straling rond 60 GHz is afhankelijk van de temperatuur van de atmosfeer. De radiometer meet de geïntegreerde emissie van de atmosfeer op speciaal gekozen frequenties. Deze zogenaamde brightness temperaturen zijn afhankelijk van de atmosferische absorptie bij deze frequenties. Hierna kan het temperatuurprofiel bepaald worden met behulp van wegingsfuncties voor de verschillende brightness temperaturen en bijbehorende frequenties. Dit inversieprobleem wordt de radiometrische retrieval genoemd (Askne en Westwater, 1986).

Solheim et al. (1998) gebruiken verschillende methoden voor deze retrieval in een vergelijkingsstudie. Zij vinden geen noemenswaardige verschillen tussen de onderzochte methoden. De nauwkeurigheid van de microwave radiometrische profielen ligt tussen de 0.5 en 2 K. De resolutie van de profielen is ongeveer 200 meter in de grenslaag en neemt af tot meer dan een kilometer op een hoogte van 10 kilometer.

FTIR's meten de neerwaarts gerichte straling in het golflengtegebied tussen 3 en 18  $\mu\text{m}$ . Spänkuch et al. (1996) toont aan dat temperatuurprofielen afgeleid kunnen worden van metingen aan de  $\text{CO}_2$  emissies in de buurt van 15  $\mu\text{m}$ . Door speciale wegingsfuncties te gebruiken in het gevoelige golflengtegebied kunnen dezelfde retrievalmethoden gebruikt worden als in de microwave radiometrie. De nauwkeurigheid van met FTIR gemeten profielen is nabij het aardoppervlak vrij hoog (0.2 K). Boven 300 meter neemt de nauwkeurigheid af. De resolutie van FTIR-profielen is ongeveer 50 meter nabij het oppervlak en deze loopt terug tot 200 meter op 2 kilometer hoogte. Het maximale hoogtebereik is 3 km.

Het nadeel van deze beide instrumenten is dat ze nogal gladgestreken profielen opleveren. Dit komt door de wegingsfuncties die gebruikt worden in de retrieval van het temperatuurprofiel. Deze kunnen niet scherper gedefinieerd worden omdat daarvoor te weinig gegevens beschikbaar zijn.

### 3.7 Passieve profilers: waterdamp

Waterdampprofielen kunnen met dezelfde methoden en instrumenten gemeten worden als de passief gemeten temperatuurprofielen zoals hiervoor beschreven is. Daarnaast kan er ook met een zon- of ster-fotometer gemeten worden hoeveel waterdamp er in de atmosfeer aanwezig is. De zon en ster fotometers meten de extinctie van het zon- en sterrenlicht in een band waar waterdamp licht absorbeert. Het nadeel van deze methode is dat ze niet werkt als het bewolkt is.

De nauwkeurigheid van alle beschikbare methodes is voor de totale hoeveelheid waterdamp 1-2 mm (ongeveer 10%). De resolutie van de verkregen profielen is hetzelfde als voor de temperatuur. Met de zon- en ster-fotometer methode is alleen het totaal aan waterdamp in de atmosfeer te bepalen. Ook hierbij moet weer opgemerkt worden dat als deze instrumenten al profielen opleveren, dat ze dan weer zeer weinig detail opleveren.

## Hoofdstuk 4

# Het gebruik van bovenluchtwaarnemingen in Nederland

Op dit moment wordt er in Nederland voornamelijk gebruik gemaakt van radiosondewaarnemingen voor gegevens over de temperatuur, wind en luchtvochtigheid in de bovenlucht. Vliegtuigwaarnemingen worden alleen gebruikt om de bovenluchtwind (op jet-niveau) in de modellen te checken en verder wordt er op Schiphol nog gebruik gemaakt van SODAR, profiler en mastgegevens om de ontwikkeling van low-level jets te volgen en om te kunnen waarschuwen voor (low-level) windshear. Ook in het onderzoek worden de mast-, windprofiler- en RASS-gegevens van Cabauw gebruikt.

De alternatieven voor bovenluchtwaarnemingen worden nog niet of nauwelijks benut. Hierdoor is het belang van de radiosonde van De Bilt voor de Nederlandse meteorologie (operationeel en onderzoek) op dit moment groot. In dit hoofdstuk geven we de resultaten van de inventarisatie van het gebruik van de radiosonde van De Bilt op een aantal verschillende terreinen. Als eerste wordt het gebruik in de weerkamer besproken, daarna het gebruik binnen het onderzoek en als laatste het gebruik in weermodellen.

### 4.1 Het gebruik van de radiosonde in de weerkamer

Een van de werkterreinen waar de radiosonde een belangrijke rol speelt is de weerkamer. Hier wordt de radiosonde voor zeer verschillende doeleinden gebruikt in de weerbewaking en de korte termijn voorspelling. In deze paragraaf geven we een zo volledig mogelijk overzicht van dit gebruik waarbij eerst het directe gebruik wordt beschreven en daarna de parameters afgeleid van de radiosondegegevens. We geven ook aan voor welke onderdelen van het weerkamergebruik de radiosonde van essentieel belang is, en waar nog geen kwalitatief voldoende alternatieven voorhanden zijn.

#### 4.1.1 Rechtstreeks gebruik van radiosondemetingen

De radiosonde wordt in de weerkamer veel gebruikt in de nowcasting. Uit de temperatuuropbouw in de radiosonde kan in kritische situaties bepaald worden óf en in welke vorm neerslag het aardoppervlak zal bereiken. De radiosonde is in dit opzicht vooral van groot belang in de winter, als de neerslag in de vorm van sneeuw of ijzel kan vallen. In deze situaties wordt sterk geleund op de temperatuurinformatie in de radiosondegegevens. Het antwoord op de vraag of neerslag het oppervlak kan bereiken, vooral ook weer van belang bij sneeuwval en ijzel, kan gehaald worden

uit de vochtinformatie in de radiosonde, samen met de intensiteit van de neerslag zoals die op de radar te zien is.

De dikte van de grenslaag, te bepalen uit het temperatuur- en vochtprofiel in de onderste kilometers, is bij calamiteiten van groot belang omdat schadelijke gasvormige stoffen voor een groot deel door deze laag heen gemengd worden. Ook de dikte en sterkte van de inversie aan de bovenkant van de grenslaag kan uit de radiosondegegevens bepaald worden. De verticale resolutie van de radiosonde (ongeveer 60 meter) en de representativiteit van de radiosondemeting zijn de beperkende factoren bij deze bepaling. De sterkte en hoogte van de inversie zijn onder andere van belang voor de kans op buienvorming, voor de grote luchtvaart omdat de prestaties van motoren bij grote temperatuursprongen veranderen en voor de kleine luchtvaart voor de maximale hoogte van de thermiek (zweefvliegen).

De basis en dikte van wolkenlagen kan uit de combinatie van het temperatuur- en vochtigheidsprofiel gehaald worden. De wolkenbasis is van groot belang voor de luchtvaart terwijl de dikte van de wolkenlaag (vooral van stratocumulus) samen met grootschalige dalende bewegingen een maat is voor de kans dat deze bewolking gedurende de forecasttermijn op kan lossen. De temperatuur aan de top van de bewolking is van belang voor de kans op neerslagvorming. Zit de wolkentop 'in het ijs' (temperatuur onder nul) dan kan er uit de aanwezige bewolking (mot-)regen of sneeuw vallen. Het temperatuur- en vochtprofiel bepalen ook de kans dat er in de loop van een mooie zonnige dag cumulus kan ontstaan, die onder een aanwezige inversie mogelijk kan uitspreiden.

Het windprofiel dat met de radiosonde gemeten wordt heeft een verticale resolutie van ongeveer 60 meter. Hier wordt bij lage windsnelheden (minder dan  $5 \text{ ms}^{-1}$ ) in de onderste kilometer echter wel een filter (gewogen gemiddelde over 240 s!) overheen gehaald om het effect van slingeren van de meetinstrumenten aan het lange touw onder de ballon uit de metingen te halen. De verticale resolutie is voldoende om wind shear en low-level jets nabij het aardoppervlak te detecteren. De tijdsresolutie van de radiosonde is echter te gering om het ontstaan en de evolutie van dit soort fenomenen goed te kunnen volgen. De wind shear en low-level jets zijn zeer belangrijk voor de luchtvaart omdat vliegtuigen dicht tegen de kritische snelheid aanzitten als ze bezig zijn met de landing. Een grote verandering in windsnelheid of richting kan dan zeer gevaarlijk zijn. Dit is ook de reden waarom er op Schiphol een SODAR is geïnstalleerd. Op grotere hoogte kan wind shear ook voor problemen in de luchtvaart zorgen. Als de wind shear een kritische grens overschrijdt kan Clear Air Turbulence (CAT) ontstaan. Omdat een vliegtuig zeer snel door de wervels in CAT heenvliegt, ondergaat zo'n toestel zeer snelle veranderingen in verticale snelheid. De verticale snelheden in CAT kunnen groot zijn waardoor het verblijf in vliegtuigen zeer onaangenaam of zelfs gevaarlijk kan worden. Piloten proberen daarom zware CAT vaak te ontwijken. Omdat de omstandigheden die tot CAT leiden vaak over grotere gebieden voorkomen is de horizontale en tijdsresolutie van de radiosonde om de condities waaronder dit fenomeen voorkomt te bemeten en voorspellen boven het Europese continent waarschijnlijk goed genoeg.

De radiosonde wordt ook gebruikt om de wind in de bovenlucht te bepalen. Deze is van belang voor het ontstaan en de trekrichting van buien en kleinschalige weersystemen en voor de routeplanning in de luchtvaart. Door mee te vliegen met de sterkste winden probeert men brandstof te besparen terwijl deze in omgekeerde richting juist vermeden moet worden. Voor de mogelijke snelle ontwikkeling van kleine weersystemen is de windsnelheidsverdeling boven de grenslaag van belang. Als kleine verstoringen in de buurt van rechteringangen of linkeruitgangen van jet streaks (gebieden met een relatief hoge bovenluchtwindsnelheid t.o.v. omgeving) terecht komen kunnen deze kleine storingen een zeer snelle ontwikkeling ondergaan. Door jet streaks te volgen kunnen snelle ontwikkelingen voorspeld worden of kan de meteoroloog er in ieder geval op bedacht zijn dat ze kunnen optreden.

Naast het specifieke gebruik van de radiosonde in het detecteren en voorspellen van bepaalde fenomenen wordt de radiosonde ook gebruikt om de modellen waarmee meteorologen werken te valideren. Als de overeenkomst tussen de radiosonde en het model slecht is kan dit betekenen dat het model op dat moment minder betrouwbaar is. In sommige gevallen kan het echter ook voorkomen dat er tijdens de radiosondeoplating iets fout is gegaan of dat de radiosonde (puntme-

ting) niet representatief is.

### 4.1.2 Afgeleide parameters

Aan de hand van de radiosonde worden in de weerkamer een vrij groot aantal diagnostische parameters berekend die op het Meteorologische Werkstation (MWS) naast de radiosonde worden afgedrukt. Een groot aantal van deze parameters zijn zogenaamde onweer- of zwaar weer indices. Als deze indices onder of boven een bepaalde grenswaarde komen is de kans op onweer groot. De indices die in de radiosonde vermeld staan zijn de K-Index (KI), de Lifted Index (LI), de SWEAT Index (SI, waarbij SWEAT staat voor Severe WEATHER), de Total Totals Index (TTI), de veelgebruikte Boyden index, de Bradbury index en de Rackliff index. Een overzicht van hoe deze indices berekend worden is als bijlage te vinden in Geertsema e.a. (2000). CAPE (Convective Available Potential Energy) staat overigens nog niet bij de radiosonde vermeld.

Een groot aantal van deze indices zijn afgeleid met behulp van waarnemingen boven de Verenigde Staten. Het is dus maar de vraag of deze indices ook goed in Europa werken vanwege het verschil in de meteorologische omstandigheden. Daarnaast zijn deze indices ontwikkeld in een tijd dat computers nog geen grote rol speelden en de berekening van de indices met de hand moest gebeuren waardoor ze redelijk simpel moesten worden gehouden. Omdat de meeste indices gebaseerd zijn op bovenluchtparameters zoals de temperatuur (of  $\theta_w$ ) op 850 en 500 hPa en de wind op vergelijkbare hoogtes, kunnen ze ook heel goed met behulp van modellen berekend worden. De nauwkeurigheid van bovenluchtparameters in modellen is hiervoor goed genoeg. De Boyden index wordt al berekend op basis van uitvoer van modellen. Het voordeel hiervan is dat deze indices in de vorm van velden beschikbaar zijn waardoor de meteoroloog een goed overzicht kan krijgen van de ruimtelijke verdeling van zo'n index. Ook kan met behulp van modeluitvoer het verloop van de onweerskans in de tijd goed gevolgd worden, omdat door een model alle processen (waaronder advectieve) meegenomen kunnen worden.

Naast de onweersindices staan in de radiosonde op het MWS ook parameters zoals het LFC (Level of Free Convection) en LCL (Lifting Condensation Level) weergegeven. Deze parameters zijn belangrijk voor het bepalen van de stabiliteit, het ontstaan van bewolking en de kans op buien. Voor deze parameters is vooral de opbouw van de grenslaag van belang. Het LFC wordt bijvoorbeeld gebaseerd op de 2-meter temperatuur en vochtigheid en de rest van het profiel. Als startwaarden worden voor het bepalen van het LFC de 2-m temperatuur en luchtvochtigheid gebruikt. Deze kunnen afwijken van de radiosondemeting waarvoor eigenlijk gecorrigeerd zou moeten worden. Op dit moment gebeurt dit nog niet waardoor het kan gebeuren dat de starttemperatuur en dauwpunt voor het bepalen van het LFC niet passen bij de rest van het profiel. Dit zal meestal een onjuiste LFC opleveren. Deze verschillen tussen radiosondemetingen en oppervlaktemeting kunnen ook voor het schijnbaar voorkomen van een extreem superadiabatische laag nabij het aardoppervlak zorgen. Hiermee moet bij de interpretatie van de radiosonde rekening gehouden worden.

Uit de radiosonde wordt ook de hoeveelheid waterdamp in de atmosfeer bepaald (Precipitable Water). Deze is een maat voor de hoeveelheid water die uit een bui kan vallen en dus voor de mogelijke maximale intensiteit van een bui. Ook wordt uit de radiosonde de Gold-temperatuur berekend (de maximaal mogelijke maximumtemperatuur afhankelijk van de zonnestand), welke een hulp kan zijn bij de voorspelling van de maximum temperatuur en de mogelijkheid van buienvorming.

De maximale sterkte van windstoten bij buien kan met behulp van de methode Ivens (1987) bepaald worden uit de radiosondeoplating. Deze gebruikt naast de wind op 850 en 250 hPa en  $\theta_w$  op 850 en 500 hPa ook de oppervlaktetemperatuur en de maximale dagtemperatuur. In het kader van GUSTO wordt uitgezocht of deze methode net zo goed werkt als hij toegepast wordt op modeluitvoer als wanneer de radiosonde als basis voor de berekeningen dient.

### 4.1.3 Specifiek gebruik in de luchtvaartmeteorologie

Voor de luchtvaart zijn een aantal toepassingen van de radiosonde van essentieel belang. Deze zijn in de vorige sectie al genoemd, maar hier willen we ze toch nog eens noemen omdat ze van zulk groot belang zijn.

In verband met ijsaanzetting op vliegtuigen is het voor de luchtvaart van groot belang om het 0°C niveau goed te kennen als mede de wolkenbasis en de verticale uitgestrektheid van bewolking. Daarnaast zijn sterke temperatuurinversies van groot belang voor vliegtuigen, omdat het motorvermogen door grote temperatuurveranderingen sterk beïnvloed kan worden. Ook van low-level-jets en andere low-level wind shear moeten piloten van landende vliegtuigen op de hoogte zijn. De laatste belangrijke luchtvaarttoepassing van de radiosonde is het detecteren van omstandigheden die kunnen leiden tot CAT.

### 4.1.4 Alternatieven voor radiosondegebruik in de weerkamer

Een redelijk groot deel van de parameters die op basis van radiosondes berekend worden kunnen tegenwoordig ook op basis van modeluitvoer of met andere meetsystemen bepaald worden. Een goed voorbeeld hiervan zijn de onweer- of zwaar weer indices. Van de Boyden-index worden al velden geproduceerd op basis van HiRLAM-uitvoer. Deze geven een veel beter ruimtelijk beeld van de verdeling van de kans op onweer dan wanneer een meteoroloog alle individuele radiosondes moet nakijken op deze parameter. Ook kan de meteoroloog met behulp van de modeluitvoer het verloop van deze parameters gedurende de forecasttermijn bekijken.

Er zijn echter ook fenomenen die door de huidige modellen nog niet goed opgelost worden, hetzij door een te grove verticale resolutie, hetzij door ontoereikend fysicapakket. Een goed voorbeeld hiervan zijn subsidentie-inversies. Door de toch al vrij grove modelresolutie op een hoogte van 1000 tot 2000 meter en door problemen met de grenslaag wordt dit fenomeen door HiRLAM op dit moment nog niet goed opgelost. De sterkte en hoogte van een grenslaaginversie zijn echter wel zeer belangrijke parameters voor de weersvoorspelling. Een mogelijke oplossing zouden temperatuurprofielen gemeten door vliegtuigen kunnen zijn. Hierbij speelt echter hetzelfde probleem als bij de modellen, de resolutie. Afgezien van de Duitse AMDAR-profielen hebben de Europese AMDAR-profielen bij het opstijgen een resolutie van 50 hPa op een hoogte van meer dan 100 hPa boven het oppervlak. Tijdens het dalen voor de landing zou de verticale resolutie onder de 700 hPa 10 hPa moeten zijn, maar daar is in de waarnemingen niet veel van terug te vinden.

Zoals hierboven al vermeld is een inversie (positie en intensiteit) een van de fenomenen die (nog) niet goed door modellen beschreven wordt. In de voorgaande paragrafen zijn een aantal fenomenen beschreven die uit de radiosonde afgeleid worden, maar die ook op een andere manier bepaald kunnen worden. Hieronder geven we in tabelvorm de van de radiosondegegevens afgeleide parameters of uit de radiosondeprofielen af te lezen fenomenen die belangrijk zijn voor het weerkamergebruik en mogelijke alternatieven voor de bepaling van deze fenomenen/parameters.

Tabel 4.1 geeft aan dat het huidige HiRLAM duidelijk nog niet geschikt is om de meteoroloog onder alle omstandigheden van voldoende nauwkeurige profielen te voorzien voor de nowcasting. De verticale resolutie van HiRLAM is nog verre van optimaal, vooral in en aan de top van de grenslaag. Daarnaast heeft het model nog veel te veel problemen met diezelfde grenslaag. In de winter is die vaak te vochtig en raakt bewolkt waardoor het regelmatig te koud is, vooral op dagen met redelijk wat zon en de aanvoer van warme lucht. In het voorjaar en de zomer lijkt de oppervlakteflux van voelbare warmte te klein waardoor de grenslaag zich niet diep genoeg ontwikkelt en het model te lage temperaturen en te ondiepe grenslagen voorspelt. Het gedrag van de grenslaag in het HiRLAM is dus de grote bottleneck die het intensievere gebruik van het model tegenhoudt in de weerkamer als mogelijke vervanging van/aanvulling op de radiosonde. Het grote voordeel van het uiteindelijke (als het model op het gebied van de grenslaag beter presteert) gebruik van HiRLAM als basis voor de profielen is dat in de modelprofielen alle waarnemingen die gedaan worden geïntegreerd zijn. Het model levert een integraal beeld van de opbouw van de

Fenomeen/parameter	Goed gerepresenteerd in radiosonde?	alternatief	
		model	waarnemingen
Neerslagtype	goed	redelijk	AMDAR
Stabiliteit	goed	redelijk	AMDAR
Profiel luchtvochtigheid	goed	matig	
Inversie	goed	slecht	AMDAR
Grenslaagbewolking	redelijk	slecht	
Wind shear/low-level jet	goed/matig (tijd)	redelijk	SODAR/toren
Bovenluchtwind	goed	goed	
Afgeleide parameters			
Zwaar weer indices	goed	goed	
Windstoten	goed	?	
LFC, LCL, etc	redelijk	matig	AMDAR
Precipitable water	goed	goed	GPS
Gold temperatuur	goed	goed	AMDAR
Belangrijk voor luchtvaart			
0°C niveau	goed	redelijk	AMDAR
Zeer sterke inversies	goed	matig/slecht	AMDAR
CAT	goed	goed	AMDAR

Tabel 4.1: Voor de meteorologen en luchtvaart belangrijke parameters en fenomenen, de representatie in de radiosonde en mogelijke alternatieven. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat, wil AMDAR een bruikbaar alternatief zijn, de significante niveau's doorgegeven moeten worden in plaats van de huidige starre, op grotere hoogte ver uit elkaar liggende niveau's. Daarnaast moet ook de presentatie op het MWS duidelijk verbeteren.

atmosfeer, waarbij men niet meer afhankelijk is van het oplaattijdstip of een bepaald fenomeen wel of niet zichtbaar is in het profiel. Ook het verloop van alle parameters in de tijd en de distributie in de ruimte zijn in een model veel beter te overzien.

Het HiRLAM is natuurlijk niet het enige alternatief voor de radiosondeprofielen. Een heel grote rol kan weggelegd zijn voor de AMDARs. Voordat AMDARs als volwaardig alternatief van radiosondeoplatingen voor gebruik in de weerkamer kan worden ingezet moeten er echter wel eerst een aantal wijzigingen komen in de doorgeefstrategie van de waarnemingen en het instrumentarium. Allereerst moeten de AMDAR-meetsystemen uitgebreid worden met een betrouwbare vochtigheids-sensor. Het ontbreken van goede luchtvochtigheidsinformatie maakt de door vliegtuigen gemeten profielen een stuk minder bruikbaar. Ook de zeer grove verticale resolutie boven de eerste 100 hPa maakt de profielen minder interessant voor het gebruik in de weerkamer. Dit laatste probleem kan mogelijk opgelost worden door de data tijdens landing en opstijgen op een zo hoog mogelijke resolutie op te slaan (er wordt nu iedere seconde gemeten), er dan boven een bepaalde hoogte (bij opstijgen), of op de grond de significante punten uit te selecteren en deze data door te geven. De selectie van significante punten zou op dezelfde manier als voor de radiosonde kunnen plaatsvinden. Hiermee neemt waarschijnlijk de hoeveelheid data die doorgegeven moet worden toe (niet voor de Duitse profielen), maar die extra kosten vallen waarschijnlijk in het niet bij de veel grotere bruikbaarheid van de data.

Naast het HiRLAM (op hoge verticale resolutie) en AMDARs kunnen ook windprofielen gemeten met de Cabauw-toren, de Schiphol SODAR en de Cabauw windprofiler een belangrijke rol spelen in het detecteren van belangrijke weersverschijnselen. Hierbij moet gedacht worden aan het ontstaan en de evolutie van low-level jets, windsprongen op inversies en wind shear op grotere hoogte die tot instabiliteiten en CAT kunnen leiden. Door de hoge tijdsresolutie van de windprofiler, SODAR en Cabauw-meetmast kan met deze instrumenten vooral ook de ontwikkeling van deze fenomenen goed in de gaten gehouden worden.



## 4.2 Overzicht van gebruik van radiosonde gegevens De Bilt voor onderzoek

### 4.2.1 Inleiding

Het KNMI fungeert als nationaal onderzoek- en informatiecentrum voor klimaat en klimaatverandering. In het kader van deze missie worden binnen de sector Klimaatonderzoek en Seismologie zowel experimenteel als theoretisch onderzoek verricht. Het KNMI heeft een lange traditie op het gebied van experimenteel atmosferisch onderzoek en heeft als overheidsinstituut ook de mogelijkheid de infrastructuur die daarvoor vereist is te ontwikkelen en beheren. KS heeft zich de afgelopen jaren ingezet om de experimentele infrastructuur te verbeteren, met name rond de Cabauw meetmast. Dit heeft o.a. geleid tot deelname in een aantal grote internationale projecten waarin Cabauw een vooraanstaande rol speelt of zal spelen. Ook speelt KS een belangrijke rol bij ontwikkeling en validatie van satelliet retrieval algoritmes en in het ozon-onderzoek. De sectie seismologie houdt zich o.a. bezig met het modelleren van laag frequent geluidsvoortplanting. In veel van deze onderzoeken speelt de radiosonde meting van De Bilt een belangrijke rol. Op basis van de reacties van onderzoekers bij KS op een inventarisatie via email wordt in dit hoofdstuk het belang en gebruik van de radiosonde binnen KS beschreven.

### 4.2.2 De inventarisatie

Om een representatief beeld te krijgen van het gebruik van de radiosonde van De Bilt in het onderzoek is gekozen voor een inventarisatie per email. De vragen die gesteld zijn in de inventarisatie zijn hieronder weergegeven.

- Doel:  
waarvoor worden de radiosondegegevens gebruikt (verificatie, klimatologie, invoer in modellen, etc.)?
- Grootheden:  
welke van de gemeten grootheden wind, temperatuur en relatieve vochtigheid worden gebruikt?
- Nauwkeurigheid:  
van welke nauwkeurigheid van de metingen ga je uit, en welke nauwkeurigheid is voldoende en/of gewenst?
- Periode:  
hoe vaak maak je gebruik van radiosondegegevens (incidenteel / specifieke periodes / continu)?
- Beschikbaarheid:  
welke frequentie van oplaten is voldoende voor jouw toepassing?
- Hoogtebereik:  
gebruik je de gegevens over het totale hoogtebereik of alleen op specifieke hoogtes?
- Overige parameters:  
worden naast de hierboven genoemde grootheden nog andere parameters afgeleid uit de metingen (bijv. tropopause hoogte, inversie hoogte, specifieke vochtigheid)?
- Samenwerking:  
worden de radiosondegegevens ook door derden gebruikt binnen bijv. (inter-) nationale samenwerkingsverbanden?

Aan de email waren toegevoegd: de probleemstelling, doel en begrenzing van het project zoals beschreven in het projectplan.

Op de email zijn reacties gekomen uit de secties Atmosferisch Onderzoek (AO), Atmosfeer Samenstelling (AS) en Seismologie (SO) en één reactie vanuit Oceanografische Onderzoek (OO). In totaal hebben 15 onderzoekers individueel gereageerd en een gezamenlijk reactie van de AS

werkgroepen "Waarnemingen van de atmosfeersamenstelling" en "OMI" (in totaal 21 personen). We kunnen aannemen dat deze reacties een goed overzicht geven van het huidige radiosondegebruik binnen KS. Het radiosondegebruik heeft zowel betrekking op de dagelijkse oplating als ook op de ozonsondes.

### 4.2.3 Samenvatting van de reacties

Een opsomming van alle genoemde toepassingen is weergegeven in bijlage A. Samengevat kunnen uit de reacties in grote lijnen de volgende doelen (in willekeurige volgorde) worden herleid:

1. Validatie van satelliet-retrievals (oa. Voor GOME, SCHIAMACHY en OMI)
2. Invoer in stralingstransportmodellen zoals DAK en MODTRAN (o.a. voor berekening atmosferische correctie)
3. Afleiden van wolkenparameters
4. Collocatie/koppeling van grond- en satellietwaarnemingen
5. Modelleren laag-frequent geluidspropagatie
6. Validatie remote sensing metingen met ground based systemen (profilers, RASS, lidars)
7. Initialisatie van LES en mesoschaalmodellen
8. Tropopausehoogte bepaling
9. Validatie/verificatie forecast en trajectoriemodellen (oa. RACMO, ECMWF)
10. Invoer in re-analysismodellen
11. Karakterisering luchtlagen (vertikale structuur van de atmosfeer)
12. Interpretatie van andere metingen (bijv. vliegtuigmetingen, ozon, aerosol lidar)
13. Analyse incidentele fenomenen (bijv. tropopausevouwen, condensstrepen, mini-ozongaten)

Van de gemeten grootheden worden temperatuur, vocht en hoogte/druk het meest gebruikt. Voor sommige toepassingen zijn ook wind en ozon van belang. Verder worden de volgende grootheden uit de direct gemeten grootheden afgeleid: specifieke vochtigheid, potentiële temperatuur, tropopausehoogte, wolkenbasis - en hoogte, inversiehoogte, geluidssnelheid en CAPE.

De gewenste nauwkeurigheid van gemeten grootheden varieert nogal. Verder is voor veel toepassingen de verticale structuur van de atmosfeer van groot belang, en worden er eisen aan de verticale resolutie gesteld. De nauwkeurigheden van de huidige radiosonde sensoren voor temperatuur, relatieve vochtigheid, en druk zijn beschreven in bijlage A. Op vraag wat men aanneemt als nauwkeurigheid van de huidige meetwaarden is slechts door een enkeling beantwoord. De gewenste nauwkeurigheid is in het algemeen voor temperatuur 0.5-1°C, vocht 5% à 10%, maar voor sommige toepassingen is een grotere nauwkeurigheid gewenst: vocht beter dan 2%, en temperatuur 0.1°C. De verticale resolutie zou tenminste 50 m moeten bedragen (de huidige methode met opslag elke 10 sec. geeft ongeveer deze resolutie). Met name voor onderzoek in de atmosferische grenslaag geeft men aan over een "zo hoog mogelijke" resolutie te willen beschikken.

Het hoogtebereik is meestal toereikend, al zou een standaard hoogte zoals bereikt wordt door de ozonsondes voor een enkele toepassing gewenst zijn. Voor modellering van de laag frequentie geluidsvoortplanting is zelfs een meting tot 200 km gewenst.

Voor de meeste toepassingen is de huidige frequentie van 4x per etmaal voldoende. Vooral tijdens meetcampagnes is een hogere frequentie gewenst dan wel noodzakelijk, tot 8x per etmaal. Dit is nodig om een representatief beeld te krijgen van de atmosferische condities waaronder de experimenten plaatsvinden, en om modelberekeningen te kunnen toetsen.

Gebruik van radiosondegegevens van andere stations is vanwege de representativiteit voor de meeste toepassingen niet of (veel) minder geschikt. Zo is de verdere uitbreiding van Cabauw als een belangrijke internationale experimentele site voor atmosferisch onderzoek sterk gebaat bij de beschikbaarheid van de radiosondegegevens van De Bilt. Ook zijn er metingen zoals bijv. de ozonwaarnemingen waarvan langjarige meetreeksen worden samengesteld, die een continuering van de radiosondeoplatingen vereisen. KS speelt een belangrijke rol in ontwikkeling van satellietretrievals voor bijv. GOME, SCHIAMACHY en OMI. Ook hiervoor zijn radiosondegegevens van De Bilt

een onmisbare databron.

De conclusie op basis van de inventarisatie is dat de radiosonde gegevens van de De Bilt intensief worden gebruikt en momenteel onmisbaar en noodzakelijk zijn voor een aanzienlijk deel van het atmosferisch onderzoek en voor het laag-frevente geluidsvoortplantingsonderzoek bij KS.

### 4.3 Radiosondes in modellen

De radiosondewaarnemingen worden niet alleen in de weerkamer of in het onderzoek gebruikt, maar ze zijn ook een belangrijke databron voor weermodellen. Het is op dit moment het enige instrument dat complete thermodynamische profielen kan leveren (van het oppervlak tot in de stratosfeer van zowel wind, temperatuur als vochtigheid). Hieronder beschrijven we waarom de radiosonde in weermodellen zo'n belangrijke plaats innemen.

De verificatiescores van modellen zijn voor de bovenlucht goed, hetgeen betekent dat de radiosondes gemiddeld gezien niet ver afwijken van de modelvelden. Dit betekent ook dat radiosondes gemiddeld gezien niet zo veel toevoegen aan de analyse. De gemiddeld goede bovenluchtvoorspellingen worden veroorzaakt door het feit dat de meteorologische structuren in de bovenlucht veelal groter zijn dan bij het aardoppervlak.

Radiosondes zijn desalniettemin nog steeds de belangrijkste leverancier van bovenluchtgegevens voor weermodellen. Uit onderzoek (Graham e.a., 2000) blijkt dat radiosondes de grootste verbetering veroorzaken in globale modellen wanneer recente waarnemingen een grote invloed hebben op de korte termijn verwachting (tot 72 uur vooruit). Uit case-studies blijkt dat vooral de windgegevens van de radiosonde een relatief grote impact hebben. Windwaarnemingen van vliegtuigen leveren na de windgegevens uit radiosondes de grootste verbetering. Temperatuur en relatieve vochtigheid hebben een veel geringere invloed op de ontwikkeling van de door Graham e.a. (2000) onderzochte depressies.

Voor mesoschaalmodellen geldt ook dat windwaarnemingen zeer belangrijk zijn. Deze modellen rekenen echter op een veel kleiner domein en met een veel hogere resolutie. Belangrijke verschijnselen die met dit soort modellen goed verwacht moeten (gaan) worden zijn vooral convectieve weersystemen en andere kleinschalige, snel ontwikkelende mesoschaalsystemen. Voor een juiste ontwikkeling van dit soort systemen zijn goede windvelden alleen niet voldoende. Het ontstaan en de evolutie van mesoschaal convectieve systemen zijn ook sterk afhankelijk van een juiste vochtverdeling (Nuret e.a., 2000).

Omdat Nederland omgeven is door radiosondestations zijn de grootschalige ontwikkelingen veelal al goed in de modellen opgenomen voordat de radiosonde van De Bilt enige invloed kan uitoefenen op de analyse. Kleinschalige systemen leveren nog wel eens verrassende ontwikkelingen op en kunnen ook door de mazen van het huidige radiosondemetnet heenglippen. De radiosonde van De Bilt kan tijdens het optreden van dit soort systemen veel extra informatie aan een mesoschaalmodel leveren. Echter de tijdsresolutie van de radiosondeoplatingen is hier een sterk beperkende factor. Een mesoschaalsysteem kan het radiosondestation allang gepasseerd zijn tussen twee opeenvolgende oplatingen.

Vanwege de tijdsresolutie meten de radiosondes dus vooral grootschalig weer. Daarom is het interessant om te onderzoeken of en onder welke omstandigheden een minder dicht radiosondenetwerk een negatieve invloed op de weersverwachting heeft. Anderson (2000) heeft dit onderzocht voor het Engelse meetnet. Hij vergeleek tijdens een speciale meetcampagne de situatie van een gereduceerd (t.o.v. het huidige netwerk) met een t.o.v. nu uitgebreid netwerk. Uit deze studie blijkt dat een geringer aantal radiosondes slechts in een klein aantal gevallen een slechtere verwachting oplevert. De grootste negatieve impact werd gevonden tijdens rustige weersituaties. Door het geringere aantal vochtprofielen was in deze situaties de bewolgingsverwachting slechter. Overigens moet bij deze studie wel opgemerkt worden dat vergeleken is met een situatie met extra radiosondes. De verschillen ten opzichte van de huidige situatie zullen kleiner zijn.

Volgens de World Weather Watch zou het radiosondenetwerk een dichtheid van 400-500 km moeten hebben om de grootschalige modellen van goede informatie te voorzien. Hierbij is het beter om op minder plaatsen regelmatig te meten dan de huidige praktijk waarbij de meeste radiosondes om 00 UTC en 12 UTC worden opgelaten (en veel minder om 06 UTC en 18 UTC). Wat dat betreft voldoet de Nederlandse meetstrategie dus aan deze eis. Het is ook de verwachting dat het tijdstip waarop radiosondes opgelaten worden minder kritiek wordt omdat in de nieuwste analyseschema's de waarnemingen op het juiste tijdstip meegenomen kunnen worden (Dabbert en Schlatter, 1996).

Mesoschaalmodellen zijn gebaat bij een zo hoog mogelijke resolutie van de waarnemingen in de ruimte en de tijd. Hierbij moet gedacht worden aan een resolutie in de horizontaal van maximaal 50 km en in de vertikaal van ongeveer een kilometer. De ideale tijdsresolutie is 1-3 uur. Conventionele (in-situ) meetinstrumenten kunnen dit soort resoluties niet leveren (vooral de horizontale en tijdsresolutie). Remote sensing apparatuur zal voor de mesoschaaltoepassingen de enige manier zijn om een modeldomein te kunnen vullen met waarnemingen. Hierbij moet dan vooral aan windprofilers, RASS, Doppler-weerradar en GPS worden gedacht. Voor de mesoschaalanalyses en verwachtingen met numerieke modellen lijkt de rol van de radiosonde in de toekomst dan ook beperkt.

## Hoofdstuk 5

# Het toekomstige bovenluchtmeetnet

In dit hoofdstuk schetsen we een aantal mogelijke scenario's welke de ontwikkeling van het bovenluchtmeetnet zou kunnen volgen. Het toekomstige meetnet moet ons in staat stellen om mesoschaalverwachtingen met behulp van modellen te maken en te verbeteren ten opzichte van de huidige situatie. Het vaststellen van de optimale configuratie van zo'n toekomstig meetnet kan plaatsvinden in gevoeligheidsstudies zoals die ook in het ASWAN-project (Tijm en Wu, 2000) zijn uitgevoerd. Daarnaast kan zo'n studie antwoord geven op de invloed die het opheffen van de radiosonde van De Bilt heeft op de kwaliteit van de modelverwachtingen.

De hierna geschetste scenario's zijn het resultaat van literatuurstudies waarbij we per scenario zullen proberen aan te geven op welk terrein de mesoschaalverwachtingen beter (of slechter) kunnen worden. Hierbij kijken we alleen naar de verbeteringen voor de analyse en verwachting met behulp van modellen. De invloed die deze scenario's op de weerkamerpraktijk en het onderzoek hebben laten we hierbij buiten beschouwing. In de laatste paragraaf van dit hoofdstuk bespreken we de financiële consequenties van de verschillende scenario's.

### 5.1 Toekomstscenario's

Hieronder bespreken we een achttal verschillende mogelijkheden van het toekomstige bovenluchtmeetnet. Aan het eind van deze paragraaf vatten we deze mogelijkheden samen in een tabel (zie tabel 5.1) om een goed overzicht van de verschillende opties te krijgen.

#### **Scenario 1: Nul-optie.**

Het eerste mogelijke scenario is de nul-optie, waarin niets aan het huidige meetnet verandert. Dit betekent dan dat het bovenluchtmeetnet zal blijven bestaan uit de radiosonde van De Bilt, de AMDARs op Schiphol, de windprofiler + RASS te Cabauw, de SODARs op Schiphol en bij Borssele en, bij neerslag, de weerradarprofielen van De Bilt en Den Helder. Het nadeel van dit bovenluchtmeetnet is dat een groot deel van de bovenluchtmetingen geconcentreerd zijn in het midden van het land. Alleen de radar van Den Helder (als er regen valt) en de SODAR bij Borssele leveren profielinformatie buiten midden Nederland. Dit zorgt ervoor dat mesoschaalverschijnselen in de bovenlucht half Nederland al bedekken of gepasseerd zijn voor ze gedetecteerd kunnen worden. Daarnaast levert de SODAR bij Borssele slechts ondiepe profielen waardoor een groot deel van de troposfeer niet bemeten wordt.

Naast de windprofielen zullen de Doppler-radars in de toekomst ook 3-D en radiële windvelden produceren. Deze kunnen in 3D- en 4D-Var geassimileerd worden. In het huidige weermodel is dit nog niet mogelijk. Aan het eind van 2001, met de nieuwe rekencomputer en de nieuwste HiRLAM-

versie zou dit wel moeten kunnen. Het is echter maar de vraag of 3D- of 4D-Var op een relatief klein mesoschaaldomein goed werkt. Daarnaast geven de radars alleen informatie als er neerslag is, terwijl je graag extra informatie wilt hebben voor er neerslag valt zodat deze beter te verwachten is. Samenvattend kunnen we stellen dat de nul-optie voor mesoschaalverwachtingen met behulp van mesoschaal modellen (te) weinig vooruitgang zal betekenen, tenzij de impact van radiële en 3-D windvelden zeer groot en gunstig is.

### **Scenario 2: min-een optie.**

De min-een optie is het scenario waarin de radiosonde van De Bilt wordt afgeschaft, maar waarin er geen extra geld gestoken wordt in het opzetten en onderhouden van een nieuw bovenluchtmeetnet. Deze optie is niet geheel onrealistisch aangezien in EUMETNET-verband is afgesproken dat het geld dat vrijkomt door het afschaffen van radiosondes gestoken moet worden in metingen op de oceaan. Een uitbreiding van het Nederlandse bovenluchtmeetnet zal daarom nooit uit de bezuiniging van het wegsaneren van de radiosonde van De Bilt kunnen komen. Daarom is het goed om ook de invloed van het weglaten van de radiosonde van De Bilt in de gevoeligheidsstudies te onderzoeken. Overigens is het de verwachting dat het opheffen van de radiosonde van De Bilt geen grote negatieve gevolgen zal hebben voor numerieke mesoschaalverwachtingen, omdat er in de buurt windprofielen gemeten worden met de profiler en wind- en temperatuurprofielen beschikbaar zijn uit AMDARs.

Voor de hierna volgende scenario's zijn extra financiële inspanningen nodig omdat in deze scenario's nieuwe instrumenten worden toegevoegd aan het bovenluchtmeetnet waarbij deze instrumenten ook nog onderhouden en operationeel gehouden moeten worden. Voor een mesoschaalnetwerk moeten een aantal keuzes gemaakt worden, al naar gelang het gewenste resultaat (welke fenomenen moeten beter bemeten en verwacht worden?). In de hieronder volgende scenario's gaan we ervan uit dat de radiosonde in De Bilt opgeheven is, hoewel dat geen bindende randvoorwaarde is. In de financiële beschouwing zullen we proberen de bijbehorende investering en operationele kosten af te zetten tegen die van een operationeel radiosondestation De Bilt.

### **Scenario 3.**

De derde optie (na nul en min-een) bestaat uit het bijplaatsen van een aantal windprofilers in de uithoeken van Nederland (voor een zo vroeg mogelijke detectie van mesoschaalsystemen). Een van de eindresultaten van het ASWAN-project (Tijm en Wu, 2000) is de conclusie dat 4-6 windprofielen voldoende zijn om mesoschaalverschijnselen goed in modellen te kunnen assimileren. Aangezien er in Cabauw al een windprofiler staat en er in Borssele een SODAR operationeel hoort te zijn, zouden 3 à 4 nieuwe windprofilers geplaatst moeten worden om tot 4-6 windprofielen boven Nederland te komen. Hierbij moet onderzocht worden of SODARs voldoende diepe profielen genereren voor het gebruik in weermodellen. Indien dit niet het geval is moet er naast de SODAR in Borssele een extra profiler geplaatst worden in zuidwest Nederland.

Graham en Anderson (1995) concluderen dat nauwkeurige windmetingen tot een grotere verbetering van modelverwachtingen leiden dan goede temperatuur- of vochtmetingen. Ook Bouttier (2000) verwacht dat vooral windprofilers regionale weersvoorspellingen kunnen verbeteren. Dit is de reden waarom wij denken dat windprofilers de grootste bijdrage kunnen leveren aan verbeterde mesoschaalverwachtingen en waarom daar de grootste inspanning zou moeten liggen. In tegenstelling tot temperatuur- en vochtmetingen introduceren windmetingen coherente structuren in zowel het wind- als het massa-veld. Deze blijven na de aanpassing van het temperatuur- en vochtveld aan de nieuwe stroming vrij lang in het model aanwezig. Verbeteringen in de temperatuur- en vochtstructuur die door de analyse zijn aangebracht kunnen door verkeerde windvelden (zowel horizontaal als vertikaal) vrij snel weer teniet gedaan worden.

### **Scenario 4.**

Tegen (relatief) geringe meerkosten kan aan een windprofiler ook een RASS gekoppeld worden voor het meten van virtuele temperatuurprofielen. In het vierde scenario zal dat uitgezocht moeten worden. Bij al deze experimenten moet wel rekening gehouden worden met de instrumenteigenschappen. Een van de RASS-eigenschappen is dat de temperatuurprofielen lang niet zo diep zijn

als die van de windprofiler.

#### **Scenario 5.**

Bij het wegvallen van de radiosonde zijn er ook geen vochtprofielen meer beschikbaar boven Nederland. Dit kan ondervangen worden door naast de windprofilers en RASS een aantal LIDARs of passieve profilers (scenario 5) te plaatsen. Het grote probleem van LIDARs is echter de beperkte gebruiksmogelijkheden. Ze geven geen profielen in en boven wolken. Tijdens mist kunnen met LIDAR helemaal geen profielen gemeten worden. De passieve instrumenten (radiometers) kunnen onder meer omstandigheden profielen opleveren. Het nadeel van deze instrumenten is echter dat de profielen zeer glad zijn waardoor scherpe overgangen en kleinschalige details niet gemeten kunnen worden. In de gevoeligheidsstudies moeten deze aspecten meegenomen worden en er moet ook uitgezocht worden of de waterdampprofielen het best op dezelfde plaats gemeten kunnen worden als de wind- en temperatuurprofielen, of dat het meten op andere plaatsen een grotere en betere invloed op de modelverwachtingen heeft.

#### **Scenario 6.**

Een zesde mogelijke scenario is het meten van alleen de waterdampverdeling boven Nederland met behulp van GPS-tomografie in plaats van het meten van vochtprofielen met LIDAR of passieve profilers (dus zonder de windprofilers en RASS). Met GPS-tomografie kunnen 3-D velden van de hoeveelheid waterdamp geconstrueerd worden indien er een voldoende dicht netwerk van GPS-ontvangers opgesteld is. Omdat er in dit netwerk ergens een vochtprofiel gemeten moet worden kan dit netwerk bij het opheffen van de radiosonde van De Bilt niet alleen uit GPS-ontvangers in Nederland bestaan. Landen als België, Duitsland of Engeland zullen ook mee moeten doen om deze randvoorwaarde in te kunnen vullen. In die landen zullen radiosondestations namelijk wel blijven bestaan als besloten wordt tot het opheffen van de radiosonde in De Bilt. Een andere mogelijkheid is dat de vochtigheidsinformatie in de toekomst misschien uit de AMDARs kunnen worden gehaald. GPS-tomografie kan ervoor zorgen dat de mesoschaalvochtverdeling goed in modellen geanalyseerd kan worden. Deze mesoschaalvochtverdeling is vooral van belang in convectieve situaties. Een relatief hoge luchtvochtigheid in de grenslaag kan de trigger zijn voor het ontstaan van zware buien en is dus vooral van belang in het zomerhalfjaar.

#### **Scenario 7.**

Een zevende scenario dat uitgezocht moet worden is het vaststellen van de waterdampverdeling door middel van GPS-tomografie in samenhang met wind- en temperatuurprofielen gemeten met behulp van windprofilers en RASS. Omdat de grootste impact waarschijnlijk gegenereerd wordt door de windprofielen is het interessant om te zien wat scenario zes oplevert t.o.v. scenario zeven.

#### **Scenario 8.**

Als laatste mogelijke scenario zien wij het vervangen van de radiosondewaarneming door complete AMDAR-profielen. Hierbij moet dan bij de AMDARs wel de luchtvochtigheid ook worden gemeten en de meet- en doorgeefstrategie moet aangepast worden zodat significante punten worden doorgegeven i.p.v. vaste hoogtes (of drukvlakken). Dit scenario voegt in feite niets toe voor mesoschaalmodellen, afgezien van het waarschijnlijk grotere aantal profielen. Het toevoegen van de luchtvochtigheid aan AMDARs zou er wel voor kunnen zorgen dat het verlies van de radiosonde opgevangen kan worden, ook voor het weerkamergebruik.

## **5.2 Kosten verbonden aan de scenario's**

De voorstellen die hierboven gedaan zijn vergen, indien er sprake is van het opstellen van extra instrumenten, een behoorlijke investering. Om een inzicht te geven in de kosten van een mesoschaal bovenluchtmeetnet hebben we geprobeerd een schatting te maken van de jaarlijkse kosten die gekoppeld zijn aan de verschillende instrumenten. Deze schatting is gebaseerd op informatie uit Steinhagen (2001), een overzicht van de jaarlijkse kosten van verschillende windprofilers verzameld in het kader van COST-76 en een overzicht van de werkelijke kosten van de windprofiler in Cabauw.

nr	rs?	andere instrumenten	extra instrumenten	verbetering
1	ja	windprofiler, RASS, AMDAR, 2 SODARs 2 RADARs	-	-
2	nee	windprofiler, RASS, AMDAR, 2 SODARs 2 RADARs	-	nee
3	nee	windprofiler, RASS, AMDAR, 2 SODARs 2 RADARs	3-4 windprofilers	mesoschaal storingen
4	nee	windprofiler, RASS, AMDAR, 2 SODARs 2 RADARs	3-4 windprofilers + RASS	mesoschaal storingen
5	nee	windprofiler, RASS, AMDAR, 2 SODARs 2 RADARs	3-4 windprofilers + RASS + 3-4 LIDARs	mesoschaal storingen
6	nee	windprofiler, RASS, AMDAR, 2 SODARs 2 RADARs	GPS tomografie	zware buien
7	nee	windprofiler, RASS, AMDAR, 2 SODARs 2 RADARs	3-4 windprofilers + RASS + GPS tomografie	mesoschaal storingen + zware buien
8	nee	windprofiler, RASS, AMDAR, 2 SODARs 2 RADARs	AMDAR-vocht	nee

Tabel 5.1: *De mogelijke scenario's voor het bovenluchmeetnet boven Nederland. In deze tabel staat rs? voor het wel of niet oplaten van de radiosonde van De Bilt.*

De gegevens over de kosten van reserve-onderdelen en personele kosten voor onderhoud zijn alleen beschikbaar voor windprofilers. Om de jaarlijkse kosten van de andere systemen te schatten (LIDAR, RASS en GPS) is uitgegaan van de complexiteit van de systemen en zijn de kosten van reserve-onderdelen proportioneel genomen t.o.v. de kosten van het instrument zelf. Er is rekening gehouden met een levensduur van deze drie instrumenten van 20 jaar (standaard KNMI richtlijnen houden een economische afschrijvingstermijn van 15 jaar aan). De bedragen per jaar per instrument die we verkrijgen uit al deze informatie zijn samengevat in tabel 5.2. Deze bedragen bevatten de jaarlijkse afschrijving, de kosten van reserve-onderdelen, het geld dat nodig is voor data-transmissie, stroom e.d. en de kosten van het onderhoudspersoneel. In de hieronder genoemde bedragen is geen post opgenomen voor het valideren van de data, hetgeen zeker zal moeten gebeuren omdat deze data vooral in modellen gebruikt moet worden. Gezien de grote onzekerheid in de kosten van de diverse posten (vooral onderhoud)

De kosten voor aanschaf van de VHF-grenslaagprofiler (50 MHz, geleverd door ATRAD) zijn lager dan in het kader van COST-76 wordt aangenomen ( $\pm 120.000$  Euro i.p.v. 300.000 Euro). Hierdoor zijn de jaarlijkse kosten ook een lager (minder afschrijving en minder dure onderdelen) zodat de VHF-profiler een goedkoper uitvalt dan de UHF-profiler die nu in Cabauw staat, dit in tegenstelling tot de informatie in het COST-76 document. Overigens kunnen de kosten van de VHF-profiler wel weer hoger uitvallen als de huur van de grond waar de profiler geplaatst wordt tegenvalt omdat voor de VHF-profiler meer ruimte nodig is dan voor een UHF-profiler. De jaarlijkse kosten van de UHF-profiler zijn relatief gezien laag ten opzichte van de kosten voor de VHF-grenslaagprofiler. Dit wordt veroorzaakt doordat voor de VHF-profiler is uitgegaan van de relatieve kosten van de reserve-onderdelen (gehaald uit het COST-76 document) terwijl het getal voor de UHF gebaseerd is op werkelijk gemaakte kosten (ongeveer 1400 Euro tegen 14.000 Euro



Instrument	aanschaf (Euro)	jaarlijkse kosten (Euro)	aantal	totale kosten (Euro)
VHF profiler	120.000	35.000	4	140.000
UHF profiler	300.000	40.000	4	160.000
RASS	50.000	10.000	4	40.000
GPS ontvanger	30.000	6.000	20*	180.000
LIDAR	1.000.000	100.000	4	400.000

Tabel 5.2: Een indicatie van de jaarlijkse kosten (inclusief afschrijving) per instrument, het aantal instrumenten nodig in een netwerk en de totale kosten in een netwerk.

\* Door de bestaande ontvangers mee te nemen kan het aantal ontvangers dat nodig is voor een Nederlands netwerk met voldoende dichtheid waarschijnlijk verlaagd worden naar 15.

in het COST-76 document). Als de kosten voor reserve-onderdelen voor de VHF-profiler net zo meevallen als voor de UHF-profiler dan kunnen de jaarlijkse kosten van deze profiler nog 5.000 tot 10.000 Euro lager uitvallen dan in tabel 5.2. Als echter metingen dicht bij het aardoppervlak noodzakelijk zijn is de VHF-profiler niet geschikt.

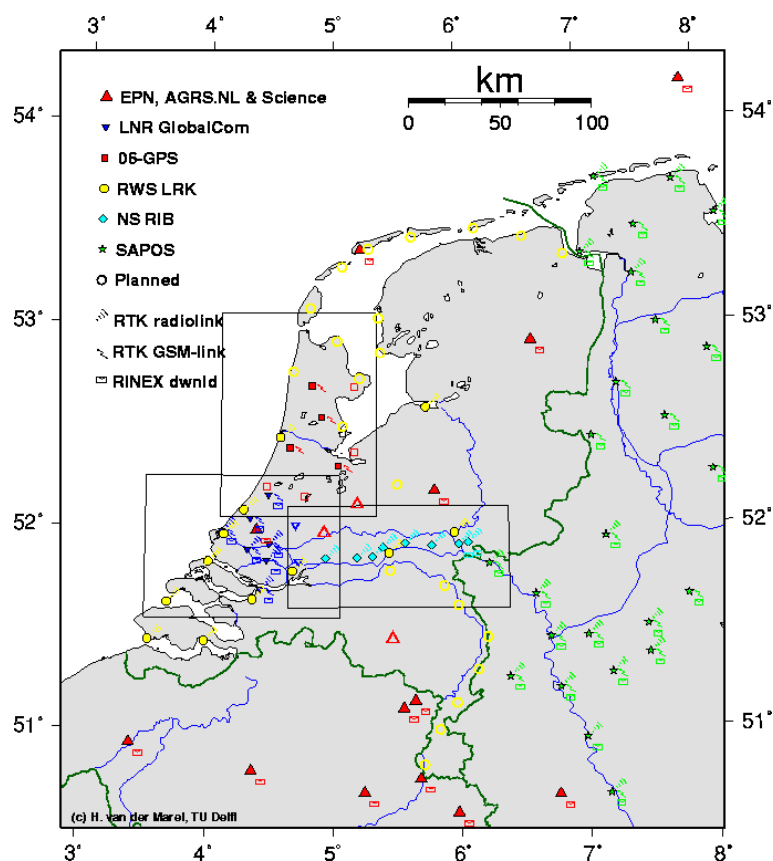
Voor een schatting van het aantal GPS-ontvangers dat nodig is om Nederland goed te bedekken is uitgegaan van het feit dat Nederland ongeveer 200 kilometer breed is en 250 kilometer lang. Voor het vullen van een rooster met een afstand van ongeveer 60 kilometer tussen de verschillende ontvangers zijn dan 20 ontvangers nodig (4 bij 5). Op dit moment zijn er in Nederland al 5 ontvangers die geschikt zijn om informatie voor een GPS-netwerk te leveren. Er moeten dus nog minimaal 15 ontvangers bijkomen om Nederland zo goed te bedekken dat mesoschaalstructuren in het vochtveld gedetecteerd kunnen worden.

Er staan overigens al veel meer GPS-ontvangers opgesteld in Nederland en er komen er nog steeds meer bij. Figuur 5.1 geeft een overzicht van de huidige en toekomstige posities van GPS-ontvangers in Nederland en België (afkomstig van de website van H. van der Marel, TU Delft: <http://www.geo.tudelft.nl/mgp/cors/>). Een van de problemen van dit netwerk is dat de data van de verschillende instanties die de ontvangers hebben geplaatst (nog) niet centraal worden verzameld. Ook is de bedekking van Nederland niet homogeen en moeten er nog een aantal gaten gevuld worden voordat de data gebruikt kan worden om de vochtverdeling boven heel Nederland af te kunnen leiden. Verder is er nog het probleem van de beschikbaarheid van de data voor operationele toepassingen. Het is niet zeker dat alle instanties meewerken om deze data operationeel beschikbaar te krijgen. Als er echter gebruik gemaakt kan worden van deze data dan zijn er waarschijnlijk nog maar 5 ontvangers nodig om Nederland geheel goed te kunnen bedekken. Er zullen dan alleen wel relatief meer kosten gemaakt moeten worden voor de opslag, transmissie en verwerking van de data.

De kosten voor de verschillende subsystemen van een mesoschaal bovenluchtmeetnet worden hierboven weergegeven in tabel 5.2. Om een duidelijk overzicht te geven van de kosten die verbonden zijn aan de verschillende scenario's zoals die geschetst zijn in de vorige paragraaf hebben we de kosten van deze scenario's opgeteld in tabel 5.3. Naast de kosten van een mesoschaal bovenluchtmeetnet wordt ook de besparing van het mogelijk afschaffen van de radiosonde gegeven. De kosten van de scenario's zijn gebaseerd op het aantal instrumenten in tabel 5.2.

Tabel 5.3 laat zien dat een netwerk van windprofilers met RASS waarschijnlijk kosten neutraal uitgevoerd kan worden. Alles wat daar nog bij komt zal extra geld kosten t.o.v. de huidige radiosonde. Hierbij moet nog wel opgemerkt worden dat de kosten van een GPS-netwerk lang niet zo hoog hoeven te zijn als in deze tabel wordt weergegeven. Dan moet de data gegenereerd door netwerken van andere instituten of instellingen wel beschikbaar gemaakt worden voor het gebruik in de meteorologie. Mocht dit lukken dan zal dit wel enige investering vergen in de datacommunicatie, de dataopslag en de verwerking van de datastroom.

Het operationele gebruik van LIDARs valt hoogstwaarschijnlijk af door de relatief hoge kosten. Ook het beperkte operationele bereik (in neerslag, mist en in en boven (rook-)wolken zijn metingen



Figuur 5.1: Het huidige en toekomstige GPS-net in Nederland en directe omgeving.

Scenario	extra kosten (Euro)	'besparing' radiosonde (Euro)	t.o.v. nu (Euro)
1	0	0	0
2	0	200.000	-200.000
3 VHF	140.000	200.000	-60.000
3 UHF	160.000	200.000	-40.000
4 VHF	180.000	200.000	-20.000
5 VHF	580.000	200.000	380.000
6	180.000*	200.000	-20.000
7 VHF	360.000*	200.000	160.000
8	nihil	200.000	-200.000

Tabel 5.3: Een schatting van de jaarlijkse kosten van de verschillende scenario's, de besparing als de radiosonde niet meer wordt opgelaten in De Bilt en de balans (kosten nieuwe instrumenten - besparing). 'Besparing' staat tussen aanhalingstekens omdat het vrijkomende geld in EUCOS gestoken zal moeten worden en niet beschikbaar komt voor een mesoschaal bovenluchtmeetnet in Nederland.

\* Door het bestaande netwerk te gebruiken met nog enkele toevoegingen kunnen de kosten voor GPS veel lager uitvallen.

onmogelijk) zorgen voor het minder aantrekkelijk zijn van LIDARs als operationeel mesoschaal meetinstrument. Daarnaast zijn LIDARs ook nog vrij arbeidsintensief omdat de optiek goed schoon

gehouden moet worden.

# Hoofdstuk 6

## Conclusies

In dit rapport beschrijven we de samenstelling van het huidige bovenluchtmeetnet van Nederland voor de grootheden wind, temperatuur en luchtvochtigheid. Ook geven we de verschillende mogelijkheden aan om het Nederlandse bovenluchtmeetnet uit te breiden met nieuwe bestaande of binnenkort beschikbare instrumenten. Het huidige gebruik van de bovenluchtwaarnemingen onderzocht, waarbij duidelijk werd dat de radiosonde het meest gebruikte instrument is. Het gebruik van de radiosonde is uitgesplitst in weerkamergebruik, het belang voor het onderzoek en het gebruik in modellen. Als laatste zijn een aantal scenario's geschetst voor de toekomstige ontwikkeling van het Nederlandse bovenluchtmeetnet.

Op dit moment bestaat het Nederlandse bovenluchtmeetnet uit de radiosonde van De Bilt, de windprofiler, RASS en meteomast te Cabauw, de SODARs op Schiphol en in Borssele en de vliegtuigen die AMDARs doorsturen. De radars te De Bilt en Den Helder zullen in de nabije toekomst (tijdens neerslag) ook windprofielen kunnen leveren. Het grote nadeel van dit netwerk is dat vrijwel alle profielen in het midden/westen van Nederland geconcentreerd zijn. Buiten neerslag (weerradar De Bilt/Den Helder) en als we de SODAR van Borssele niet meetellen zijn er niet of nauwelijks bovenluchtgegevens beschikbaar in het noorden, oosten en zuiden van Nederland. Dit betekent voor de modellen dat er op de mesoschaal niet veel bovenluchtgegevens beschikbaar zijn. Windprofilers uitgerust met RASS en een GPS-netwerk voor de waterdampverdeling kunnen de mesoschaal variabiliteit wel in modellen krijgen. Hoe het optimale bovenluchtmeetnet eruit ziet dient in een vervolgstudie uitgezocht worden.

Voor het gebruik in de weerkamer is er op dit moment nog geen redelijk alternatief beschikbaar voor de 6-uurlijkse radiosonde van De Bilt. AMDARs geven nog te weinig waarnemingen door en meten nog geen vochtigheid. Een andere meet- en doorgeefstrategie zou AMDARs veel bruikbaar maken voor verschillende doeleinden waaronder het weerkamergebruik. Ook modellen, waar alle waarnemingen in samenkomen, zijn op dit moment nog geen goed alternatief voor het radiosondegebruik in de weerkamer omdat de verticale resolutie nog niet hoog genoeg is en de grenslaag nog teveel problemen geeft. Indien deze zaken worden aangepakt en er op een andere manier voldoende bovenluchtwaarnemingen in het model geanalyseerd kunnen worden (bijvoorbeeld via een mesoschaal bovenluchtmeetnet), dan kunnen modeltemps op termijn een goed alternatief voor de radiosonde van De Bilt worden voor het gebruik in de weerkamer. In modellen voegt de radiosonde onder de meeste omstandigheden niet zo veel meer toe, omdat de bovenlucht gemiddeld gezien al goed voorspeld wordt en er upstream voldoende radiosondestations liggen (behalve bij een noordwestelijke stroming). Voor de mesoschaal is de tijdsresolutie van de radiosondeoplatingen te gering om alle systemen goed te bemeten. Voor het onderzoek dat op en buiten het KNMI gedaan wordt is momenteel de radiosonde echteronvervangbaar. Samen met de meetmast en andere instrumenten te Cabauw vormt de radiosonde een voor onderzoeksdoeleinden onmisbare combinatie. De informatie die uit de radiosondegegevens gehaald wordt kan niet op een andere manier verkregen worden. Hiervoor zijn ook AMDARs geen alternatief.

Om mesoschaal systemen goed met mesoschaalmodellen te kunnen analyseren en voorspellen is een uitbreiding van het Nederlandse bovenluchtmeetnet gewenst. De belangrijkste kandidaat-meetsystemen voor deze uitbreiding zijn remote-sensing systemen voor het meten van wind en temperatuur: windprofilers en RASS, voor vocht: tomografie met behulp van GPS-systemen. De optimale configuratie van een mesoschaal bovenluchtmeetnet moet in een gevoeligheidsstudie uitgezocht worden (effectiviteit en kosten).

Samengevat is de radiosonde van De Bilt op dit moment voor de weerkamer onmisbaar wegens een gebrek aan kwalitatief voldoende alternatieven. De radiosonde van De Bilt zal in de toekomst onmisbaar blijven voor onderzoekdoeleinden en als component van de internationaal belangrijke experimentele site Cabauw. Mesoschaalmodellen hebben meer baat bij profielen op meer plaatsen en met een hogere tijdsresolutie.

# Literatuur

- Anderson, S.R., M. Bader and R. Dumelow, 2000: Mesoscale forecasts at The Met. Office - The effect of reducing the radiosonde network. UK MetOffice Mesoscale Variational Data Assimilation Workshop, May 8-10, 2000, Reading, UK.
- Andersson, T., 1992: A method for estimating the wind profile and vertical speed of targets from a single Doppler radar. *Instruments and observing methods*, Rep. No. **49**, WMO/TD, No. 462, P. 380-386.
- Andersson, T., 1994: Tests of a method for recovering winds from a single Doppler weather radar. *COST-75, Weather radar systems*, International seminar, Brussels, Belgium, 333-344.
- Andersson, T., 1998: VAD winds from C band Ericsson Doppler weather radars. *Meteorol. Zeitschr.*, **7**, 309-319.
- Angevine, W.M., and W.L. Ecklund, 1994: Errors in radio acoustic sounding of temperature. *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 1767-1785.
- Askne, J.I.H., and E.R. Westwater, 1986: A review of ground-based remote sensing of temperature profiles by passive microwave radiometers. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, **GE-24**, 340-352.
- Atlas, D., K. Naito and R.E. Carbone, 1968: Bistatic microwave probing of a refractively perturbed clear atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, **25**, 257-268.
- Banta, R.M., L.D. Olivier and D. H. Levinson, 1993: Evolution of the Monterey Bay sea-breeze layer as observed by pulsed Doppler Lidar. *J. Atmos. Sci.*, **50**, 3959-3982.
- Banta, R.M., 1995: Sea breezes shallow and deep on the California coast. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 3614-3622.
- Beljaars, A.C.M., 1985: Verification of Doppler sodar measurements. *KNMI Scientific Report*, **85-02**, KNMI, De Bilt.
- Bösenberg, J., 1998: Ground-based differential absorption Lidar for water vapour and temperature profiling methodology. *Appl. Opt.*, **37**, 3845-3860.
- Bouttier, 2000: The use of profiler data at ECMWF. *Ninth international workshop on technical and scientific aspects of MST radar*, Toulouse, France, March 13-18, 2000, 515-524.
- Chintawongvanich, P., R. Olsen and C.A. Biltoft, 1989: Intercomparison of wind measurements from two acoustic Doppler SODARs, a laser Doppler lidar and in situ sensors. *J. Atmos. Oceanic. Technol.*, **6**, 786-797.
- Cole H.L., and E. Miller, 1995: A correction for low-level radiosonde temperature and relative humidity measurements. *proceedings 9th Symp. on Met Obs. & Instr.*, Charlotte, USA, 32-36.

- Coulter, R.L., and D.J. Holdridge, 1995: A three-month comparison of hourly winds and temperatures from co-located 50-MHz and 915 MHz RASS profilers. *Ninth symposium on meteorological observations and instrumentation*, 195-199.
- Coulter, R.L., 1998: A study of the effect of an additional sound source on RASS performance. *Tenth symposium on meteorological observations and instrumentation*, 223-227.
- Crane, R.K., 1973: Analysis of the data from the Avon-to-Westford Experiment. *Technical Report*, **498**, Lincoln Laboratory, Massachusetts, Institute of Technology, 45 pp.
- Crook, N.A., 1996: Sensitivity of moist convection forced by boundary layer processes to low-level thermodynamic fields. *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 1767-1785.
- Dabbert W.F., and T.W. Schlatter, 1996: Research Opportunities from Emerging Atmospheric Observing and Modeling Capabilities. *Bul. Am. Met. Soc.*, **77**, 305-323.
- Davis, J.L., R.R. Lee and J.L. Ingham, 1995: Comparing rawinsonde and WSR-88D wind profiles. *Preprints 27th conference on radar meteorology*, Vail, Colorado, 409-411.
- Doviak, R.J., and C.M. Weil, 1972: Bistatic radar detection of the melting layer. *J. Appl. Meteor.*, **11**, 1012-1016.
- Engelbart, D., H. Steinhagen, U. Görsdorf, J. Lippmann and J. Neisser. 1996: A 1290 MHz profiler with RASS for monitoring wind and temperature in the boundary layer. *Beitr. Phys. Atmosph.*, **69**, 63-80.
- ECMWF. 1999: ECMWF global data monitoring report. *ECMWF*, Reading, England, 51 pp.
- Finkelstein, P.L., J.C. Kaimal, J. E. Gaynor, M.E. Graves and T.J. Lockhart, 1986: Comparison of wind monitoring systems. Part II: Doppler sodars. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **3**, 594-604.
- Fleming, R.J., and A. J. Hills, 1993: Humidity profiles via commercial aircraft. *Eighth symposium on meteorological observations and instrumentation*, J125-J129.
- Frehlich, R., S. Hannon and S. Henderson, 1994: Performance of a 2 $\mu$ m coherent Doppler Lidar for wind measurements. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **11**, 1517-1528.
- Geertsema, G.T., A. Maas, H.R.A. Wessels, H. Benschop, D. Blaauboer en C.J. Kok, 2000: Inventarisatie nowcasting technieken voor gevaarlijk weer: Eindrapport. *KNMI*, De Bilt, 41 pp.
- Görsdorf, U., and V. Lehmann, 2000: Enhanced accuracy of RASS-measured temperatures due to an improved range correction. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **17**, 406-416.
- Graham, R.J., and S.R. Anderson, 1995: The relative utility of current observation systems to global-scale NWP forecasts, preliminary results. *UK Met. Office FR Division Tech. Report*, **173**.
- Graham, R.J., S.R. Anderson and M.J. Bader., 2000: The relative utility of current observation systems to global-scale NWP forecasts. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **126**, 2435-2460.
- Guichard F., D. Parsons, and E. Miller, 2000: Thermodynamic and Radiative Impact of the Correction of Sounding Humidity Bias in the Tropics. *Journal of Climate*, **13**, 3611-3624.
- Ivens, R.A.A.M., 1987: Forecasting the maximum wind velocity in squalls. *Proc. symp. mesoscale analysis and forecasting*, Vancouver, Canada, 17-19 August 1987, ESA SP-282.
- Jaatinen, J. and E. Pl, 1998: Windfinding Accuracy of Terrestrial Nav aids. *Vaisala News*, **146**, 35-38.

- Jaatinen, J. and J. Elms, 2000: On the Windfinding Accuracy of Loran-C, GPS and Radar. *Vaisala News*, **152**, 30-33.
- Kitchen, H., 1989: Representativeness errors for radiosonde observations. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **115**, 673-700.
- Klein, V., J. Roths and B. Hilber, 1997: The eye-safe Doppler Lidar 'ODIN' - a versatile tool for spatial wind monitoring. *Proc of the 9<sup>th</sup> conference on Laser Radar*, June 23-27, 1997, Linköping, 281-284.
- Klein Baltink, H., 1997: A long-term intercomparison between boundary layer wind profiler/RASS, tower and radiosonde measurements. *Extended abstracts, COST-76 profiler workshop 1997*, Engelberg, Switzerland, 74-77.
- Klein Baltink, H., 1998: A long-term intercomparison of wind profiler/RASS and tower measurements. *Meteorol. Zeitschrift*, **7**, 271-279.
- Klein Baltink, H., 2000: Resultaten CaPRIX: een eerste indruk. *notitie KS-AO, KNMI*, De Bilt, 11 pp.
- Lafaysse, C., 1994: Utilization of UHF/VHF radar wind profiler networks for improving weather forecasting in Europe. *Cost 74 final report, European Commission*, EUR 15450, 333 pp.
- Leiterer U., H. Dier and T. Naebert, 1997: Improvements in Radiosonde Humidity Profiles Using RS80/RS90 radiosondes of Vaisala. *Beitr. Phys. Atm.*, **70**, 319-336.
- Lorenc, A.C., D. Barker, R.S. Bell, B. Macpherson and A.J. Maycock, 1996: On the use of radiosonde humidity observations in mid-Latitude NWP. *Meteor. Atm. Phys.*, **60**, 3-17.
- Lucas C. and E.J. Zipser, 2000: Environmental Variability during TOGA COARE. *J. Atm. Sci.*, **57**, 2333-2350.
- MacDonald, A.E., X. Yuanfu and R.H. Ware, 2000: Diagnosis of three-dimensional water vapor using slant observations from a GPS network. *COST 716 action workshop*, Oslo, July 2000.
- Marseille, G.J., and F. Bouttier, 2000: EUCOS study: Climatology of sensitive areas: Mid term report. *EUCOS*, 21 pp.
- Matuura, N., Y. Masuda, H. Inuki, S. Kato, S. Fukao, T. Sato and T. Tsuda, 1986: Radio acoustic measurement of temperature profile in the troposphere and stratosphere. *Nature*, **323**, 426-428.
- May, P.T., R.G. Strauch and K.P. Moran, 1988: The altitude coverage of temperature measurements using RASS with wind profiler radars. *Geophys. Res. Lett.*, **15**, 1381-1384.
- Nash, J., and F. Bond, 1989: An operational evaluation of wind measurements by two Doppler SODARs. *WMO/TD-No. 303*, Fourth WMO technical conference on instruments and methods of observation (TECIMO-IV), instruments and observing methods report no. 35, 407-412.
- Nash, J., 1994: Upper wind observing systems used for meteorological operations. *Ann. Geophysicae*, **12**, 691-710.
- Neisser, J., U. Görtdorf and H. Steinhagen, 1994: Comparison of wind profiler and rawinsonde measurements. *Instruments and observing methods*, Rep. No. **57**, WMO/TD, No. 588, P. 349-354.
- Nuret, M., M. Chong, J-P Lafore, O. Bousquet and V. Gouget, 2000: On the impact of Doppler derived wind fields in a mesoscale non-hydrostatic model. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **126**, 2435-2460.



- Oakley, T., and J. Nash, 1997: Evaluation of LAP-3000 profiler in UK, Feb./Mar. 1995. *Extended abstracts, COST-76 profiler workshop 1997*, Engelberg, Switzerland, 322-325.
- Pailleux, J., M. Bader, W. Wergen, X.-Y. Huang and H. Bottger, 1998: Improving EUCOS in data-sparse areas by conventional means. *EUCOS-document*, 4 pp.
- Protat, A., and I. Zawadzki, 1999: A variational method for real-time retrieval of three-dimensional wind field from multiple-Doppler bistatic radar network data. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **16**, 432-449.
- Protat, A., and I. Zawadzki, 2000: Optimization of dynamic retrievals from a multiple-Doppler radar network. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **17**, 753-760.
- Rocken, C., R. Ware, T. van Hove, F. Solheim, C. Alber and J. Johnson, 1993: Sensing atmospheric water vapor with the Global Positioning System. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 2031-2034.
- Schwartz, B.E., and C.A. Doswell, 1991: North American rawinsonde observations: problems, concerns and a call to action. *Bull. Am. Met. Soc.*, **72**, 1885-1896.
- Serafin, R.J., and J.W. Wilson, 2000: Operational weather radar in the United States: Progress and opportunity. *Bull. Am. Met. Soc.*, **81**, 501-518.
- Solheim, F., J.R. Godwin, E.R. Westwater, Y. Han, S.J. Keihm, K. Marsh and R. Ware, 1998: Radiometric profiling of temperature, water vapour and cloud liquid water using various inversion methods. *Radio Science*, **33**, 393-404.
- Spänkuch, D., W. Döhler, J. Güldner and A. Keens, 1996: Ground-based passive atmospheric remote sounding by FTIR emission spectroscopy - First results with EISAR. *Contr. to Atm. Phys.*, **69**, 97-111.
- Steinhagen, S., S. Bakan, J. Bösenberg, H. Dier, D. Engelbart, J. Fischer, G. Gendt, U. Görsdorf, J. Güldner, F. Jansen, V. Lehmann, U. Leiterer, J. Neisser and V. Wulfmeyer, 1998: Field campaign LINEX 96/1 - Possibilities of water vapour observation in the free atmosphere. *Meteorol. Zeitschrift*, **7**, 248-261.
- Steinhagen, S., 2001: Annex G in concept of final report COST 76
- Theopold, F.A., and J. Bösenberg, 1993: Differential absorption Lidar measurements of atmospheric temperature profiles: theory and experiment. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **10**, 165-179.
- Tijm, A.B.C., en H.T. Wu, 2000: ASWAN: Assessment of the impact of wind profiler/sodar data on the mesoscale wind analysis in the Netherlands. 48 pp.
- Tijm, A.B.C., 2000: De radiosonde van 02 augustus 2000. *Meteorologica*, **9**, 23-25.
- Turner, D.D., and J.E.M. Goldsmith, 1999: Twenty-four-hour Raman Lidar water vapour measurements during the Atmospheric Radiation Measurement program's 1996 and 1997 water vapor intensive observation periods. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **16**, 1062-1076.
- Turner, D.D., W.F. Feltz and R.A. Ferrare, 2000: Continuous water vapor profiler from operational ground-based active and passive remote sensors. *Bull. Am. Met. Soc.*, **81**, 1301-1317.
- Van Der Meulen, J.P., 2000: Quarterly reports of the E-AMDAR quality evaluation centre on AMDAR data, Report no. 1. *EUMETNET & KNMI*, De Bilt, The Netherlands, 22 pp.
- Vaughan, G., D.P. Wareing, S.J. Pepler, L. Thomas and V. Mitev, 1993: Atmospheric temperature measurements made by rotational Raman scattering. *Appl. Opt.*, **32**, 2758-2764.

- Williams, C.R., W.L. Ecklund, P.E. Johnston and K.S. Gage, 2000: Cluster analysis techniques to separate air motion and hydrometeors in vertical incident profiler observations. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **17**, 949-962.
- WMO, 1996: Guide to meteorological instruments and methods of observation. *WMO publication.*, **8**.
- Wulfmeyer, V., 1998: Ground-based differential absorption Lidar for water vapor and temperature profiling: Requirements, development and specifications of a high-performance laser transmitter. *Appl. Opt.*, **37**, 3804-3824.
- Wulfmeyer, V., and J. Bösenberg, 1998: Ground-based differential absorption Lidar for water vapor profiling: Assessment of accuracy, resolution and meteorological applications. *Appl. Opt.*, **37**, 3825-3844.
- Wurman, J., S. Heckman and D. Boccipio, 1993: A bistatic multiple-Doppler radar network. *J. Appl. Meteor.*, **32**, 1802-1814.
- Yeung, K.K., 1998: Use of wind profiler in severe weather monitoring. *Meteorol. Zeitschrift*, **7**, 326-331.

## Appendix A: Overzicht gebruik radiosondegegevens KS.

Doelen waarvoor de radiosondegegevens worden gebruikt:

1. Afleiden wolkenbasis en -hoogte
2. Validatie satellietretrievals GOME/SCHIAMACHY
3. Verificatie microgolfradiometer
4. Invoer stralingstransportmodellen
5. Koppeling IR-radiometer metingen aan wolkenhoogtemeter en satellietmetingen
6. Emissiviteit van wolken
7. Atmosferische correctie satellietwaarnemingen
8. Berekenen stralingstransport
9. Wolkenophoogte waterwolken
10. Collocatie grond- en satellietwaarnemingen
11. Validatie chemische satellietwaarnemingen (GOME/SCHIAMACHY/OMI)
12. Grootschalige meetcampagnes (THESEO,SESAME,MATCH)
13. Processtudies
14. Validatie SCHIAMACHY water, temperatuur en drukprofielen
15. Kwaliteitcontrole ozonprofielen (internationale verplichting)
16. Correlatie tussen CAPE en convectieve neerslag
17. Gegevens over verticale verdeling vocht in en temperatuur in grenslaag
18. Initialisatie LES en mesoschaalmodellen (vocht, temperatuur, u,v)
19. Verificatie modellen, dagelijks voor forecasts, tijdens campagnes
20. Interpretatie van remote sensing metingen wolken
21. Berekenen stralingscorrectie tgv. vocht
22. Invoer in stralingstransportmodel DAK (wordt gebruikt voor validatie en interpretatie van bijv. GOME/SCHIAMACHY/OMI.
23. Invoer voor stralingstransportmodel MODTRAN (wordt gebruikt voor interpretatie stralingsfluxen aan de grond)
24. Voor berekening atmosferische correctie satelliet-retrievals
25. Voor grenslaagforcering voor retrievals
26. Bepaling trend tropopauzehoogte
27. Interpretatie van metingen samenstelling van atmosfeer (vliegtuigmetingen, ozon- en aerosol-lidar)
28. Incidentele analyses van bijv. mini-ozongaten, tropopauzevouwen, vliegtuigcondenssporen
29. Aanvulling waarnemingen meetmast Cabauw
30. Initialisatie en validatie van model case studies
31. Modelleren propagatie Laag-frequent geluid
32. Verificatie van ECWMF model
33. Verificatie van trajectoriemodel
34. Invoer in stralingsmodel
35. Invoer voor re-analysis modellen
36. Validatie windprofiler/RASS metingen
37. Validatie kolom geïntegreerd vocht gemeten met GPS
38. Optreden van vliegtuigcondensstrepen