

**KONINKLIJK NEDERLANDS  
METEOROLOGISCH INSTITUUT**

TECHNISCHE RAPPORTEN

T.R. - 35

P.W. Rosier, J. Reiff, C.J. van der Goot en A. Steenhuisen.

Het gebruik van trajektoriën bij een korte-termijn verwachting

De Bilt, 1983

Publikatienummer : K.N.M.I. TR 35 (CWD/DM)

Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut  
Centrale Weerdienst / Dynamisch Meteorologisch Onderzoek  
Postbus 201  
3730 AE DE BILT  
Nederland

U.D.C. : 551.511.2

HET GEBRUIK VAN TRAJEKTORIEN BIJ DE  
KORTE-TERMIJN WEERSVERWACHTING

P.W. Rosier, J. Reiff, C.J. v.d. Goot en A. Steenhuisen

INHOUD

1. INLEIDING
2. TRAJEKTORIEN
  - 2.1. Het operationeel trajektoriënmodel
  - 2.2. De nauwkeurigheid van het trajektoriënmodel
3. HET GEBRUIK VAN TRAJEKTORIEN IN DE WEERDIENST
  - 3.1. De konstruktie van verwachte temperatuur- en vochtigheidsprofielen.
  - 3.2. Enkele praktijkvoorbeelden
  - 3.3. De betrouwbaarheid van de gekonstrueerde profielen
4. KONKLUSIE EN DISKUSSIE
5. LITERATUUR
6. BIJLAGEN
  - A Het gebruik van het  $\theta_s$ -p diagram (KNMI)
  - B Enkele gebruikte meteorologische grootheden



## 1. Inleiding

Onder de trajektorie van een luchtdeeltje wordt de baan verstaan, die dat deeltje gedurende een bepaalde periode doorloopt.

Het trajektoriënmodel, zoals dat sinds het voorjaar 1979 in de weerdienst gepresenteerd wordt, geeft de verwachte 24 uren (sinds enige tijd ook de 12 uren) baan van luchtpakketjes die in De Bilt aankomen op 1000-, 850-, 700- en 500 mbar. Bij het berekenen van deze baan worden de windcomponenten  $u$ ,  $v$  en  $\omega$ , afgeleid uit de hoogtevelen, voorspeld door het vierlagen vorticeitsmodel BK-4 [4]. Behalve de horizontale verplaatsing wordt ook de verticale beweging langs de gehele trajektorie berekend. Naast trajektoriën, bepaald met voorspelde winden, "voorspelde trajektoriën", worden ook trajektoriën berekend met winden afgeleid uit analyses, "geanalyseerde trajektoriën". In dit verslag worden de resultaten van vergelijking tussen "voorspelde" en "geanalyseerde" trajektoriën gegeven.

Met behulp van de trajektoriën wordt een brongebied bepaald: een gebied waarvan verwacht wordt dat de lucht, die zich daar bevindt, 24 uur later (respectievelijk 12 uur later) boven De Bilt aankomt. Door de eigenschappen van de lucht in het brongebied na te gaan (temperatuur- en vochtigheidsprofielen in het brongebied) en te postulieren dat deze profielen, nog gewijzigd door de op- en neerwaartse beweging van de luchtdeeltjes langs de trajektoriën, in De Bilt zullen aankomen, is het mogelijk 24-uren (respectievelijk 12 uren) temperatuur- en vochtigheidsprofielen, "Temps", voor De Bilt te konstrueren.

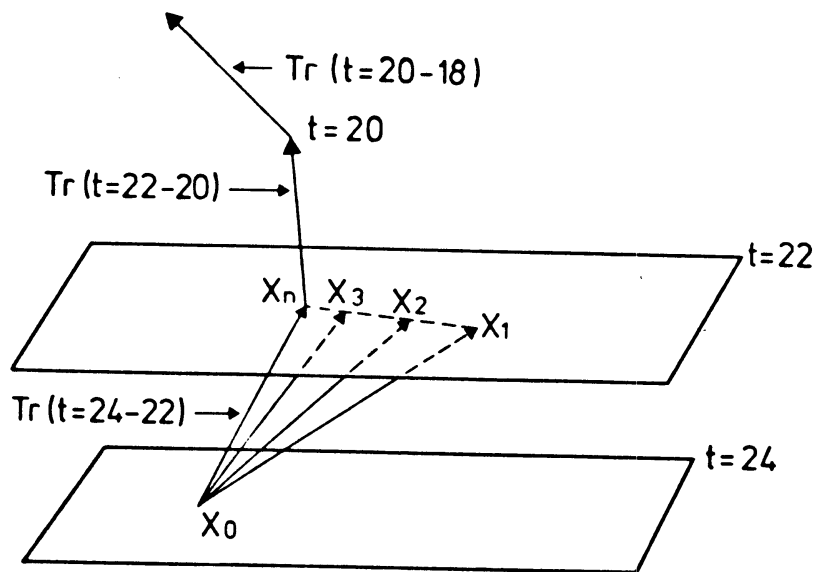
Voor een jaar is nagegaan, hoe de verwachte dauwpuntsdepressie ( $T-T_d$ ) op 850- en 700 mbar zich verhoudt tot de opgetreden dauwpuntsdepressie in De Bilt.

De verticale resolutie van het verwachte temperatuur- en vochtigheidsprofiel is in grootte orde van 20 mbar, veel groter dan de verticale resolutie in grootschalige modellen. (Het ECMWF bijvoorbeeld heeft een gemiddelde verticale resolutie van 80 mbar in de laag 900-500 mbar). Dit betekent, dat het in principe mogelijk is dunne wolkenlagen te verwachten, hetgeen grootschalige modellen niet kunnen [8]. De interpretatie van een verwacht profiel in de weerdienst is subjektief, omdat bij de konstruktie van de temperatuur- en vochtigheidsprofielen slechts op subjektieve wijze rekening wordt gehouden met condensatie en verdamping. Bovendien wordt deze wolkenvoorspelling slechts toegepast op de vrije atmosfeer, daar voor een voldoende nauwkeurige beschrijving van de grenslaagprocessen een grenslaagmodel noodzakelijk is [10]. In dit rapport worden enkele voorbeelden van het operationeel gebruik van zo'n verwachte Temp gegeven.

## 2. Trajektoriën

### 2.1. Het operationele trajektoriënmodel

Het berekenen van een 24 uren trajektorie gaat in het kort als volgt. In De Bilt (plaats  $x_0$ ) wordt op  $t=24$  de snelheid en richting van de verwachte wind bepaald. Met deze gegevens wordt de lucht 2 uur teruggetransporteerd tot plaats  $x_1$ , zie figuur 1. Er is nu een fout gemaakt omdat de lucht onderweg een andere snelheid en richting heeft gekregen. Dit wordt hersteld door op plaats  $x_1$  de aldaar verwachte windsnelheid en richting te bepalen op  $t=22$ . Met het gemiddelde van de snelheden en windrichtingen van  $x_0$  op  $t=24$  en  $x_1$  op  $t=22$  wordt nu opnieuw

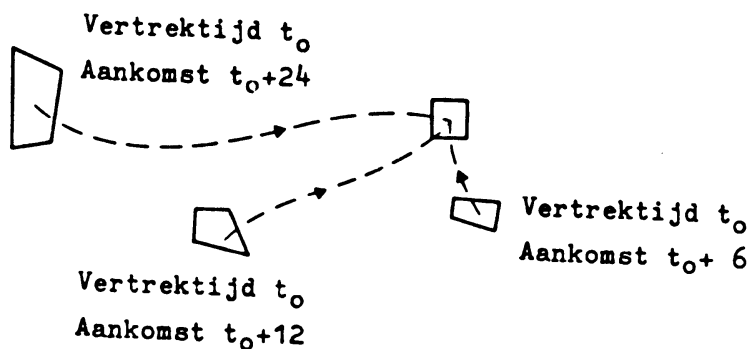


Figuur 1. "Iteratieve" berekening van een trajectorie.

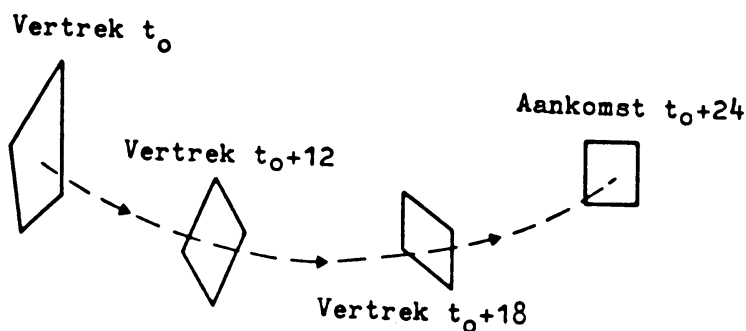
vanuit  $x_0$  een plaats bepaald:  $x_2$ . De windsnelheid en richting op  $x_2$  en  $t=22$  wordt gebruikt om samen met die van  $x_0$  op  $t=24$  een nieuwe plaats te bepalen:  $x_3$ . dit gaat door tot er een plaats  $x_n$  is bereikt die nauwelijks meer verandert. Het aantal iteratiestappen  $n$  is afhankelijk van een criterium waarin het maximale verschil in plaats tussen iteratiestap  $n-1$  en  $n$  gegeven wordt,  $n$  is normaal 2 à 3 en maximaal 10.  $x_n$  is nu de positie van het luchtdeeltje dat na 2 uur in De Bilt aankomt. Deze plaats zal in het algemeen niet meer op hetzelfde drukvlak liggen van waaruit vertrokken is, omdat ook de verticale windcomponenten in de berekening meedoen. Hetzelfde "iteratieve" proces, dat tussen de tijden  $t=24$  en  $t=22$  plaatsvond, wordt herhaald tussen de tijdstippen  $t=22$  en  $t=20$  tot een trajectorie tot  $t=0$  gevonden is.

Enkele opmerkingen:

- Het trajectoriënprogramma kan winden interpoleren, zodat op elke plaats in het verwachtingsgebied, ook tussen de drukvlakken waarmee BK-4 rekent, de wind bekend is op  $t=24, 22, 20, \dots, 0$ .
- Het BK-4 model berekent voorspelde hoogtevelden. De uit deze hoogtevelden afgeleide windvelden, die in het trajectoriënprogramma gebruikt worden zijn geostrofisch.
- Een deeltje dat over 24 uur in De Bilt aankomt, zal in het algemeen uit een heel ander gebied kunnen komen dan een deeltje dat over 12 uur in De Bilt aankomt, zie figuur 2.a.. In het bijzonder: Het brongebied van een deeltje dat 12 uur onderweg is ligt niet meer halverwege de trajectorie van een deeltje dat er 24 uur over doet om op dezelfde tijd in De Bilt aan te komen. Het is echter wel zo, dat alle brongebieden voor lucht die op één bepaald tijdstip boven De Bilt aankomen langs dezelfde trajectorie liggen, zie figuur 2.b..



Figuur 2a. Trajektoriën met dezelfde vertrektijd, maar verschillende aankomsttijden. Brongebieden liggen niet op één trajektorie.



Figuur 2b. Trajektoriën met dezelfde aankomsttijd, maar verschillende vertrektijd. Brongebieden liggen langs één trajektorie.

## 2.2. De nauwkeurigheid van het trajektoriënmodel

Vanaf maart 1981 worden er ook trajektoriën met behulp van BK-4 analyses berekend. De posities van de brongebieden (zowel de geografische positie als het drukvlak waarop de trajektorie vertrekt) van de trajektoriën gebaseerd op analyses zijn vergeleken met de posities van de brongebieden van de

Periode	N	1000 mbar		850 mbar		500 mbar	
		afstand	MAE	afstand	MAE	afstand	MAE
Maart '81	36	933	379	980	412	1538	535
April	46	606	326	619	293	1132	424
Mei	56	617	277	741	262	1390	398
Juni	56	703	232	796	242	1490	414
Juli	59	564	182	660	198	1243	383
Augustus	55	476	156	511	151	1022	250
September	56	652	233	720	275	1399	448
Oktober	56	848	323	920	362	1642	547
November	46	1038	264	1166	357	1912	535
December	36	752	363	812	313	1364	532
Januari '82	54	855	404	881	385	1486	578
Februari	50	730	295	844	428	1311	821

Tabel 1. De per maand in 24 uur afgelegde afstand in km en de gemiddelde absolute fout (MAE) in het verwachte +24 brongebied.

trajektoriën gebaseerd op voorspelde windvelden. Dit is gebeurd voor de trajektoriën, die na 24 uur aankwamen op 1000-, 850- en 500 mbar. De over de verschillende maanden en seizoenen gemiddelde cijfers worden weergegeven in tabel 1 en 2. De gemiddelde absolute fout in de 850 mbar-trajektoriën is voor de horizontaal afgelegde weg ca. 306 km voor de vertikaal afgelegde weg ca. 36 mbar. Zowel de lengte van de trajektoriën als de gemiddelde absolute fout is in de zomer het kleinst en in de winter het grootst. Beide namen tevens met de hoogte toe.

Periode	1000 mbar			850 mbar			500 mbar			
	N	afst.	syst. MAE	afst.	syst. MAE	afst.	syst. MAE	afst.	syst. MAE	
Maart '81	36	19	17	27	3	10	30	44	19	62
April	46	-24	-5	29	-26	-4	41	7	-5	46
Mei	56	-31	9	23	-6	9	29	34	1	66
Juni	56	-7	-1	13	-13	-5	31	6	2	55
Juli	59	-16	-5	14	3	-4	18	8	-3	52
Augustus	55	-9	0	12	-18	-4	17	-8	-10	35
September	56	-24	1	18	-14	1	30	11	-25	77
Oktober	56	-15	1	21	-7	9	42	26	5	81
November	46	-4	-9	16	-33	-13	45	-1	2	78
December	36	-35	4	32	-15	-2	43	37	15	93
Januari '82	54	-41	4	37	-33	0	46	-8	18	66
Februari	50	-51	7	29	-40	-12	59	3	3	89

Tabel 2. De per maand gemiddeld in 24 uur afgelegde verticale weg (afst.) in mbar, systematische fout (syst.) de gemiddelde absolute fout (MAE)

De fout in de horizontaal afgelegde weg, uitgezet tegen de afstand, is scheef verdeeld, zie figuur 3. De mediaan, dat is de straal van het gebied rondom de voorspelde brongebieden, waarbinnen zich 50% van de geanalyseerde brongebieden bevinden, is in het algemeen kleiner dan de gemiddelde fout. In ons voorbeeld ongeveer 15% kleiner. Ook de in andere maanden en op andere drukvlakken opgemaakte mediaan, die hier niet worden gegeven, blijken circa 10% kleiner te zijn dan de bijbehorende gemiddelde absolute fouten.

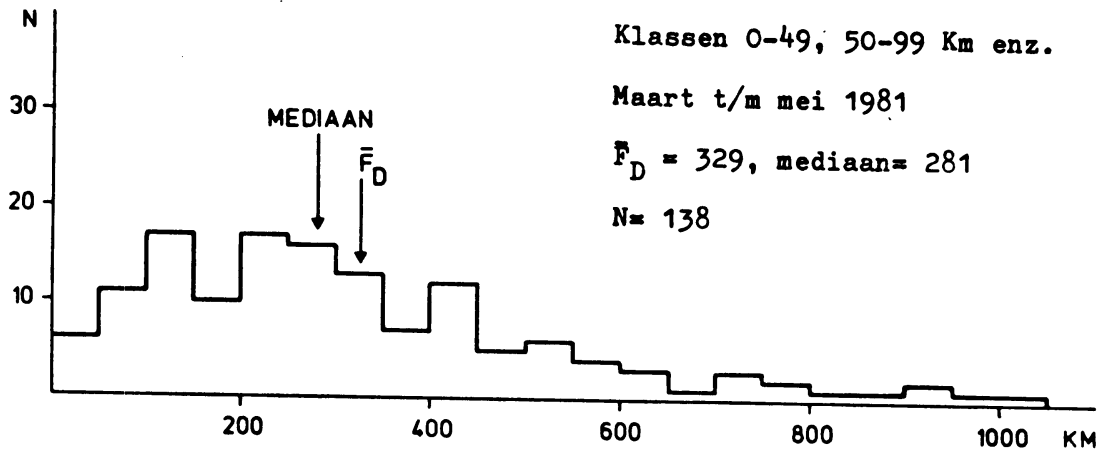
De grootte van de fout in de positie van het brongebied in de oost-west richting,  $f_x$ , in een individuele trajektorie wordt in goede benadering bepaald door de formule:

$$\frac{\partial f_x}{\partial t} = \epsilon_{v_x}(\bar{x}, t) + \sum_i f_i \frac{\partial v_i(\bar{x}, t)}{\partial x} \quad (1)$$

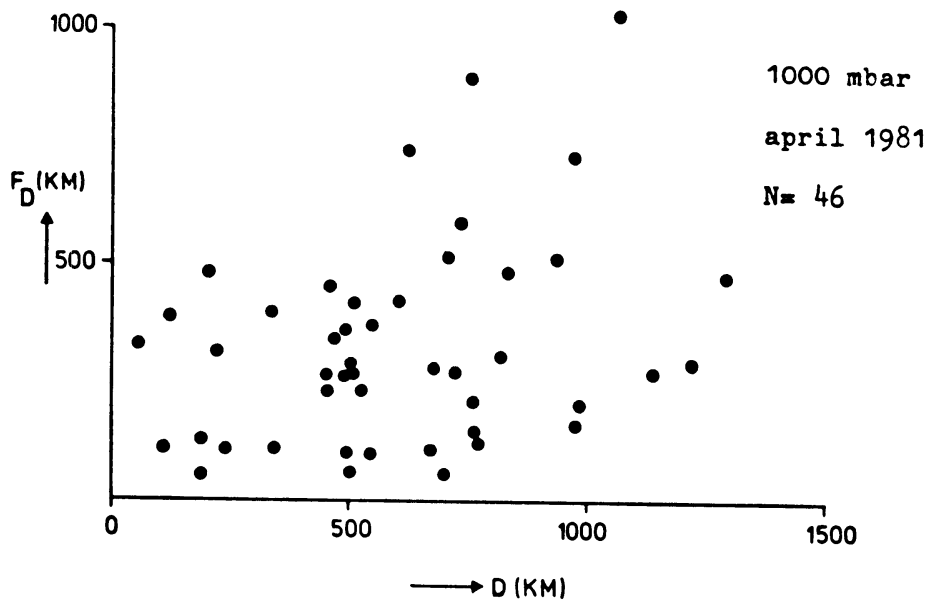
Hierin geeft  $\frac{\partial f_x}{\partial t}$  de groei van de fout met de tijd in de x-richting weer. Deze ontstaat ten gevolge van een toevallige fout in het voorspelde windveld,  $\epsilon_{v_x}$ , en een fout in het windveld,  $\sum_i f_i \frac{\partial v_i}{\partial x}$  (het improduct tussen de fout in de x-, y-, respectievelijk p-richting met de gradiënt van de wind), omdat het windveld op een "verkeerde plaats" wordt afgelezen ten gevolge van reeds eerder gemaakte fouten. De bijdrage aan de fout ten gevolge van de eindige tijdstap van twee uur is over het algemeen te verwaarlozen [9].

Dat de in tabel 1 en 2 gegeven fouten 's zomers kleiner zijn dan 's winters en met de hoogte toenemen, hangt samen met het feit dat de toevallige fout in de BK-4 winden,  $\epsilon_{v_i}$ , 's zomers kleiner is dan 's winters en met de hoogte toeneemt. Het seizoens- en hoogte-afhankelijke gedrag van de toevallige fout in de





Figuur 3. Histogram van de fout,  $F_D$ , in de horizontaal afgelegde afstand op 1000 mbar.



Figuur 4. De fout in de positie van het verwachte brongebied,  $F_D$ , (brongebieden bepaald met "voorspelde"- en "geanalyseerde" trajektoriën) tegen de afgelegde afstand,  $D$ .

BK-4-winden kan verklaard worden door aan te nemen dat de toevallige windfout,  $\epsilon_{vi}$ , boven een zeker minimum met de wind toeneemt. Tabel 1. laat zien dat dit voor gemiddelde fouten zo is. De gemiddelde absolute fout in de geografische positie van het brongebied is ca. 30% van de gemiddelde afgelegde afstand. Ook voor fouten in individuele berekende trajectoriën geldt dit. Een voorbeeld hiervan wordt gegeven in figuur 4., waar voor april 1982 de absolute fout tegen de afgelegde weg uitgezet is.

De bovengeschetste fouten in de berekende brongebieden hangen sterk van de gebruikte windvelden af. Omdat als eerste windveld in de +24 uur trajectoriënberekening, het 24-uurs voorspelde windveld van het BK-4 genomen wordt (zie paragraaf 2.1.) en omdat de toevallige fout in het windveld  $\epsilon_{vi(+24)}$  over het algemeen groter groter zal zijn dan de toevallige fout op eerdere tijdstippen (+22, +20,.....0), mogen we verwachten dat de gemiddelde absolute fout in het +24 brongebied (MAE) gedomineerd zal worden door  $\epsilon_{vi(+24)}$ . Tabel 3. laat zien dat de +24 fout in BK-4 veel groter is dan die in de +24-ECMWF. Daarom mag verwacht worden dat de fout in +24 brongebieden sterk zal verminderen als ECMWF-windvelden in plaats van BK-4 windvelden gebruikt worden.

	mrt '81	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec	jan '82	feb
BK-4												
RMS-fout :ff	11.2	7.9	7.4	7.4	6.1	5.7	8.3	10.5	11.5	14.2	13.5	12.2
:dd	48.1	50.8	44.7	47.7	44.4	50.1	42.3	45.1	44.5	58.0	51.6	49.5
ECMWF												
RMS-fout :ff	8.2	5.2	6.2	5.4	4.7	3.9	6.2	7.5	7.2	8.4	7.3	7.1
:dd	32.5	30.3	35.4	34.3	31.2	36.1	30.1	31.9	27.6	40.3	27.6	24.5
RMS-fout = de wortel uit het gemiddelde kwadratische verschil van zowel windsnelheid als windrichting, voorspel-opgetreden, gemiddeld over een gebied van 100 roosterpunten boven de Noordzee en omgeving												

Tabel 3. De per maand gemiddelde RMS-fout van de geostrofische wind op 1000 mbar van +24 BK-4 en +24 ECMWF, geverifieerd t.o.v. BK-4 analyses, in richting (dd in graden) en snelheid (ff in m/s).

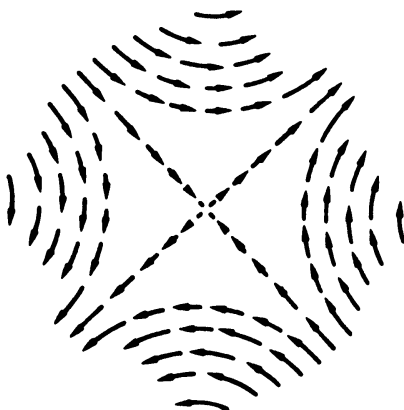
De tweede term in het rechterlid van (1) veroorzaakt op den duur een exponentiële groei van de fout in het brongebied. Tezamen met het feit dat een +12 uren prognose windveld gemiddeld beter is dan een +24 en een +36 uren prognose mogen we aannemen, dat de gemiddelde fout in het brongebied in een +12 uren prognose kleiner is dan 50% van de fout van een +24 uren prognose (zie cijfers van tabel 1 en 2), en de fout in de +36 uren prognose groter dan 150% van de +24 uren cijfers.

Bij het bepalen van de fouten, zoals gegeven in tabel 1, is er van uitgegaan dat de analyse geen fouten bevatte. Dit is in werkelijkheid wel het geval. In de windanalyses van het BK-4 model is de geostrofische benadering gebruikt. De werkelijke fout in de posities van de brongebieden zal dan ook groter zijn dan de getallen in tabel 1 aangeven.

Frontvlakken scheiden lucht van verschillende  $\Theta_w$ . Lucht beweegt niet door frontvlakken, trajektoriën die door frontvlakken gaan zijn dan ook fout. Weerdienstervaring met het model leert, dat trajektoriën slechts zelden door het front heenlopen. Het produkt, de trajektoriën, wordt soms op de volgende, verkeerde wijze, beoordeeld:

1. Het grootschalige model, BK-4, berekent een foute drukverdeling en een daaraan gekoppelde foute positie van het front. Vanzelfsprekend zijn dan ook de trajektoriën, afgeleid van de BK-4 winden, fout.
2. De positie van het front aan het aardoppervlak wordt verward met de positie van het front in de bovenlucht. Trajektoriën op 850 mbar bijvoorbeeld kunnen terecht over de positie van het warmte front aan het aardoppervlak heenlopen.

Een groot verschil in tijdstap tussen het grootschalige model BK-4 en het trajektoriënmodel kan ook tot een foutieve frontpassage leiden. Maar omdat deze tijdstappen weinig verschillen, één respectievelijk twee uur, komt deze fout in de praktijk nauwelijks voor. Toch kunnen trajektoriën soms, foutief, door een front heenlopen: een grootschalig model kent een term, die "fronten schept", de zogenaamde "shearing deformation" term  $H$  [3], zie figuur 5. Deze term wordt ten gevolge van een eindige tijd- en ruimtestap gediscrètiseerd, hetgeen in de praktijk (van BK-4) afvlakking tot gevolg heeft. Het gevolg van het afvlakken van deze term in een roosterpuntsmodel is dat er een kans op het passeren van een frontvlak in het trajektoriënmodel ontstaat: sterke afvlakking in het BK-4 programma van deze term betekent een grote aantal gevallen dat trajektoriën, onterecht, door een front heenlopen. "Shearing deformation" veroorzaakt "instroming" in de ene richting en "uitstroming" in de richting er loodrecht op, zie figuur 5.



Figuur 5. " Shearing deformation "

$$H = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$$

### 3. Het gebruik van trajektoriën in de weerdienst

#### 3.1. De konstruktie van de verwachte temperatuur- en vochtigheidsprofielen

In de inleiding is uiteengezet, dat de trajektoriën gebruikt kunnen worden om verwachte +24 uur (respectievelijk +12 uur) temperatuur- en vochtigheidsprofielen voor De Bilt te konstrueren. De konstruktie gebeurt (nu nog) met de hand, waarbij gebruik gemaakt wordt van het KNMI- $\Theta_s, P$ -diagram. Nadere uitleg over dit diagram wordt gegeven in bijlage A.

De procedure begint met het opzoeken van het radiosondestation dat het dichtst bij het brongebied, bijvoorbeeld het vertrekpunt van de trajektorie die op 500 mbar in De Bilt aankomt, is gelegen. De gegevens van dit station worden representatief geacht voor het brongebied. Eventueel wordt eerst een met de afstand gewogen gemiddelde van verschillende in de buurt van het vertrekpunt gelegen radiosondeprofielen opgemaakt. De luchttemperatuur ( $T$ ) en de dauwpunttemperatuur ( $T_d$ ) wordt nu op de drukwaarde ( $P$ ), die op de vertrektijd geldt, uit het betreffende radiosondeprofiel afgelezen en in het  $\Theta_s, P$ -diagram aangegeven, zie figuur 6. Bij het bepalen van de verwachte lucht- en dauwpunttemperatuur zijn er nu de mogelijkheden:

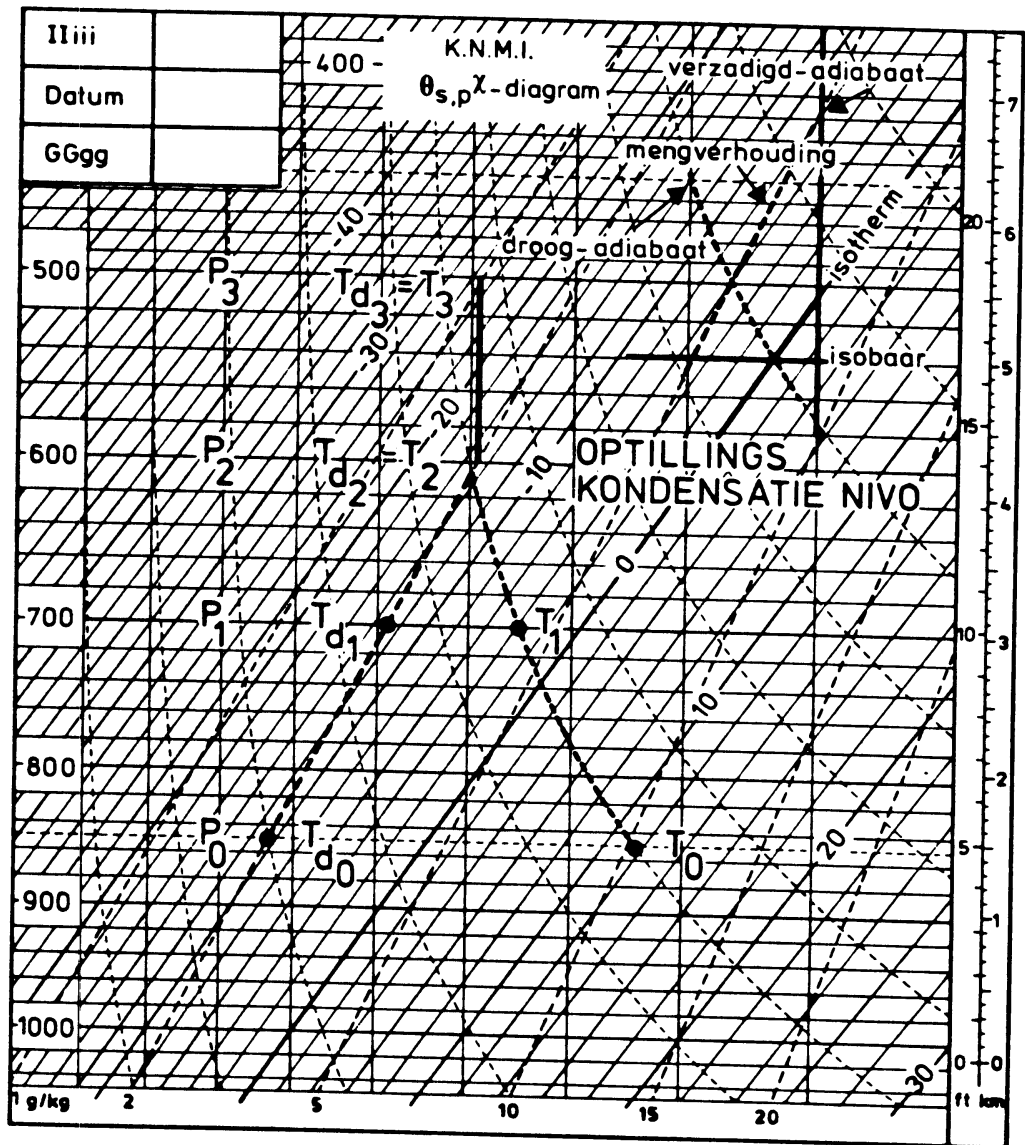
- a. de lucht stijgt (daalt) droogadiabatisch.
- b. de lucht stijgt verzadigd-adiabatisch of raakt gedurende het opstijgen verzadigd.
- c. de lucht daalt verzadigd-adiabatisch of raakt bij het dalen droogadiabatisch.

#### a. De droog adiabatische konstruktie

Aangezien het luchtdeeltje bij het omhooggaan naar  $P_1$  (figuur 6) niet verzadigd raakt, ondergaat het een droogadiabatisch proces. Bij dit proces blijft de potentiële natteboltemperatuur ( $\Theta_w$ ) en de aktuele mengverhouding van het luchtdeeltje konstant. Op het  $\Theta_s, P$ -diagram wordt dit proces weergegeven door vanaf  $T_0$  langs de droogadiabaat en vanaf  $T_{d0}$  langs de lijn van konstante mengverhouding naar  $P_1$  te gaan. De verwachte lucht- en dauwpunttemperatuur op  $P_1$  is nu  $T_1$  en  $T_{d1}$ . Bij een dalende luchtbeweging op weg naar De Bilt wordt er in het  $\Theta_s, P$ -diagram droogadiabatisch gedaald van druk  $P_1$  naar  $P_0$ .

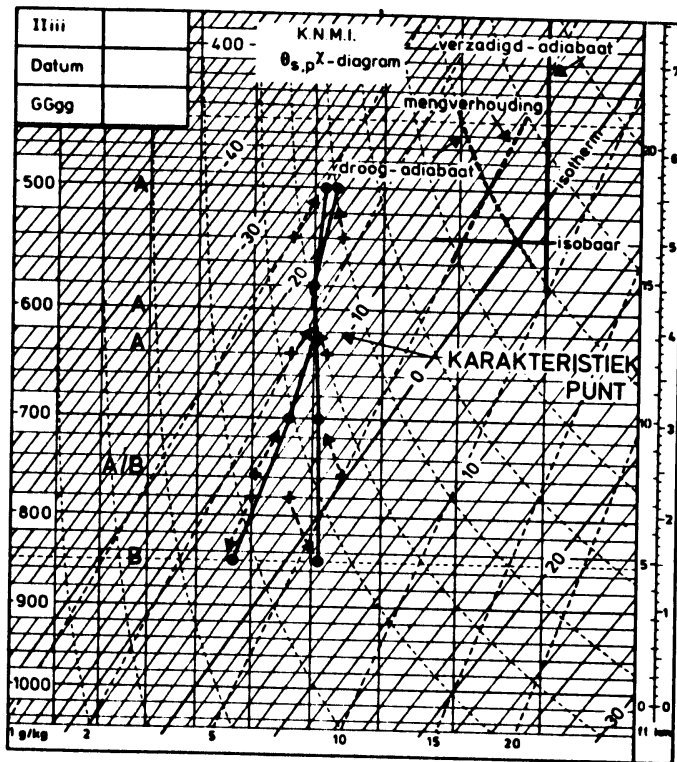
#### b. De verzadigd (nat)-adiabatische konstruktie

Bij het omhooggaan van een luchtdeeltje kan een niveau bereikt worden, waarbij het deeltje verzadigd raakt ( $T=T_d$ ). Bij verdere optilling vanaf dit niveau (het optillingskondensatieniveau) kondenseert er waterdamp en volgt het deeltje een nat-adiabaat. In het  $\Theta_s, P$ -diagram: Vanaf het kondensatieniveau, ( $P_2, P_2 = T_{d2}$  in figuur 6), wordt er langs de verzadigd-adiabaat omhooggegaan tot 500 mbar. De brongebieden van 500-, 700-, 850-, 925- en 1000 mbar over het algemeen een verschillende geografische positie bezitten, zullen de radiosondegegevens, die bij de konstruktie van de verwachte 500 mbar  $T$  en  $T_d$ , 700 mbar  $T$  en  $T_d$ , enz. voor De Bilt gebruikt worden, over het algemeen verschillend zijn. Door de profielen in de verschillende brongebieden van deze trajektoriën te gebruiken kan een  $T$ - en  $T_d$ -profiel voor De Bilt gekonstrueerd worden met waarden op 500-, 700-, 850-, 925- en 1000 mbar. ++Zie bijlage B, e. voor definitie.

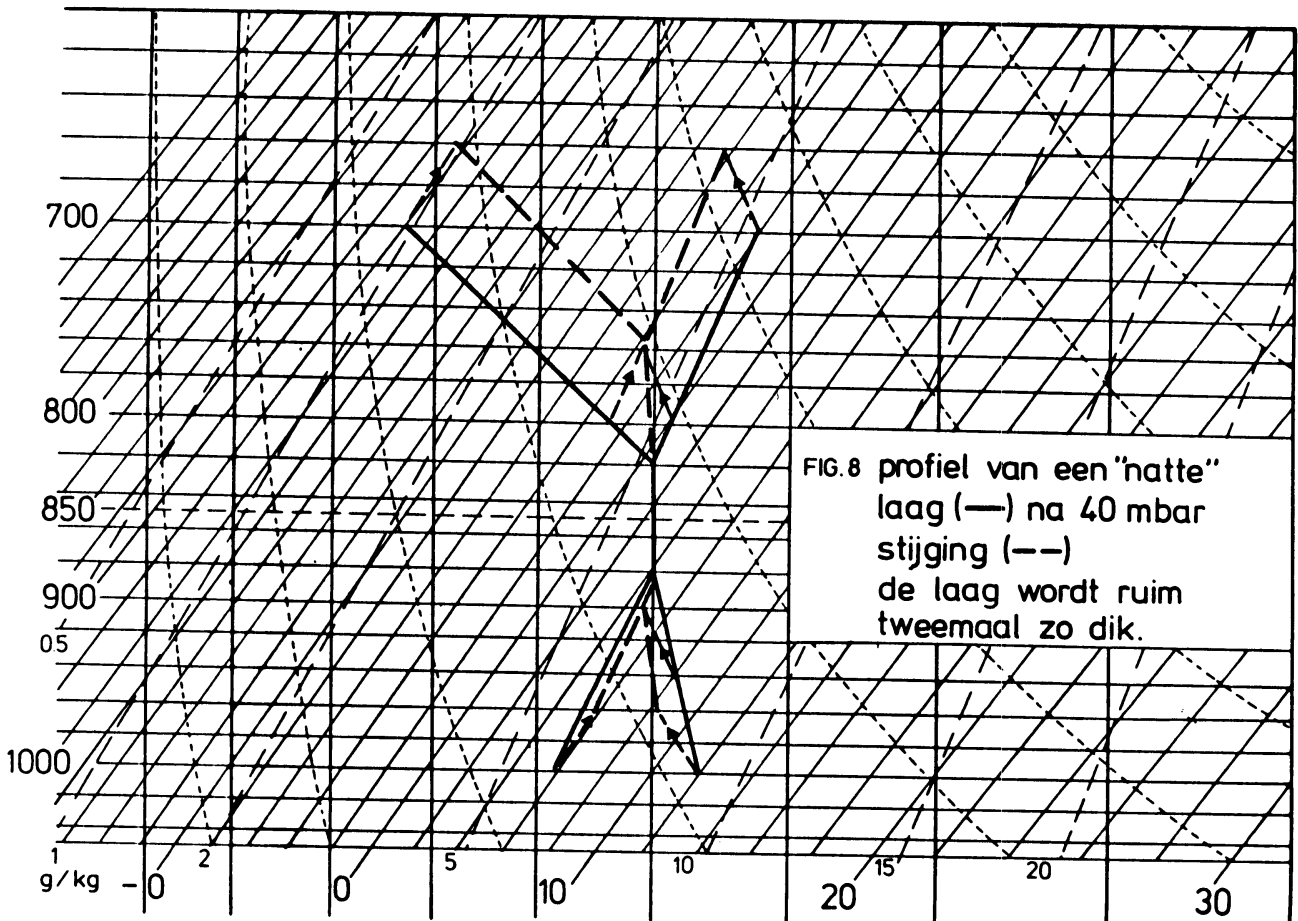


Figuur 6. Droog adiabatise - en verzadigd adiabatise konstruktie.

In de gebruikte profielen zullen zich echter ook zogenaamde "karakteristieke" punten bevinden. Het zijn juist deze punten, waaruit ontbrekende informatie omtrent het mogelijk optreden van wolkenlagen kan worden gewonnen. Om optimaal profijt van deze Temp-konstruktie te verkrijgen moet de geschetste procedure dan ook worden toegepast met gebruikmaking van de karakteristieke punten in de temps van het brongebied. Dit gaat als volg: Uit het (de) radiosondeprofiel(en) in het brongebied worden de T- en  $T_d$ -waarden van de karakteristieke punten overgenomen en op dezelfde manier bewerkt als de standaardpunten. De grootte van de vertikaal af te leggen weg bepaalt men hier uit het gewogen gemiddelde van de waarden van de niveaus waartussen het karakteristieke punt zich bevindt. De gekonstrueerde punten op 500-, 700-, ...mbar en de tussenliggende karakteristieke punten worden verbonden en vormen nu een verwacht temperatuur (T)- en vochtigheids ( $T_d$ ) profiel, een "Prog-Temp". Een voorbeeld van zo'n konstruktie is te zien in figuur 7. In het praktijkvoorbeeld in hoofdstuk 3.2., geval 2, is een compositie van karakteristieke punten uit oplatingen van verschillende stations weergegeven.



Figuur 7. + gebruikte punten uit de sondeoplatingen in de brongebieden.



Enige opmerkingen:

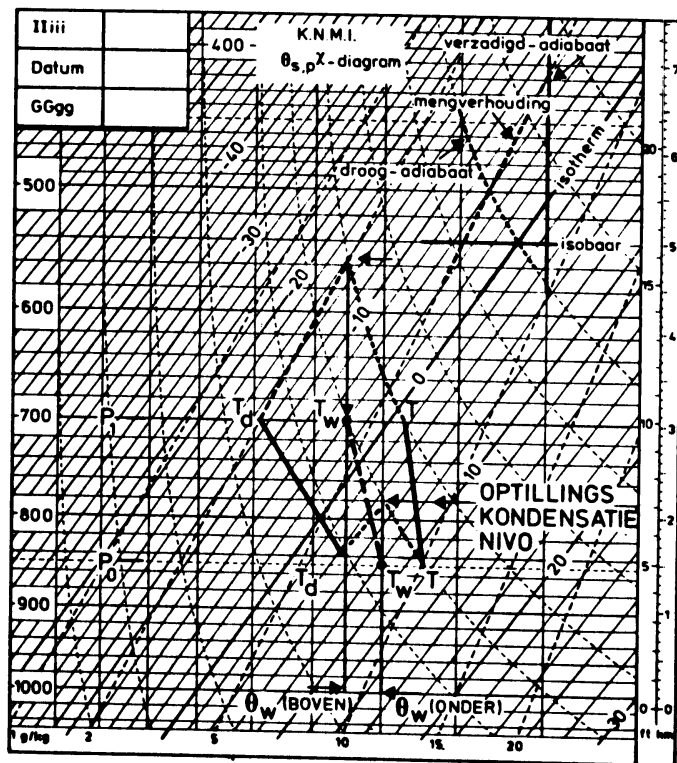
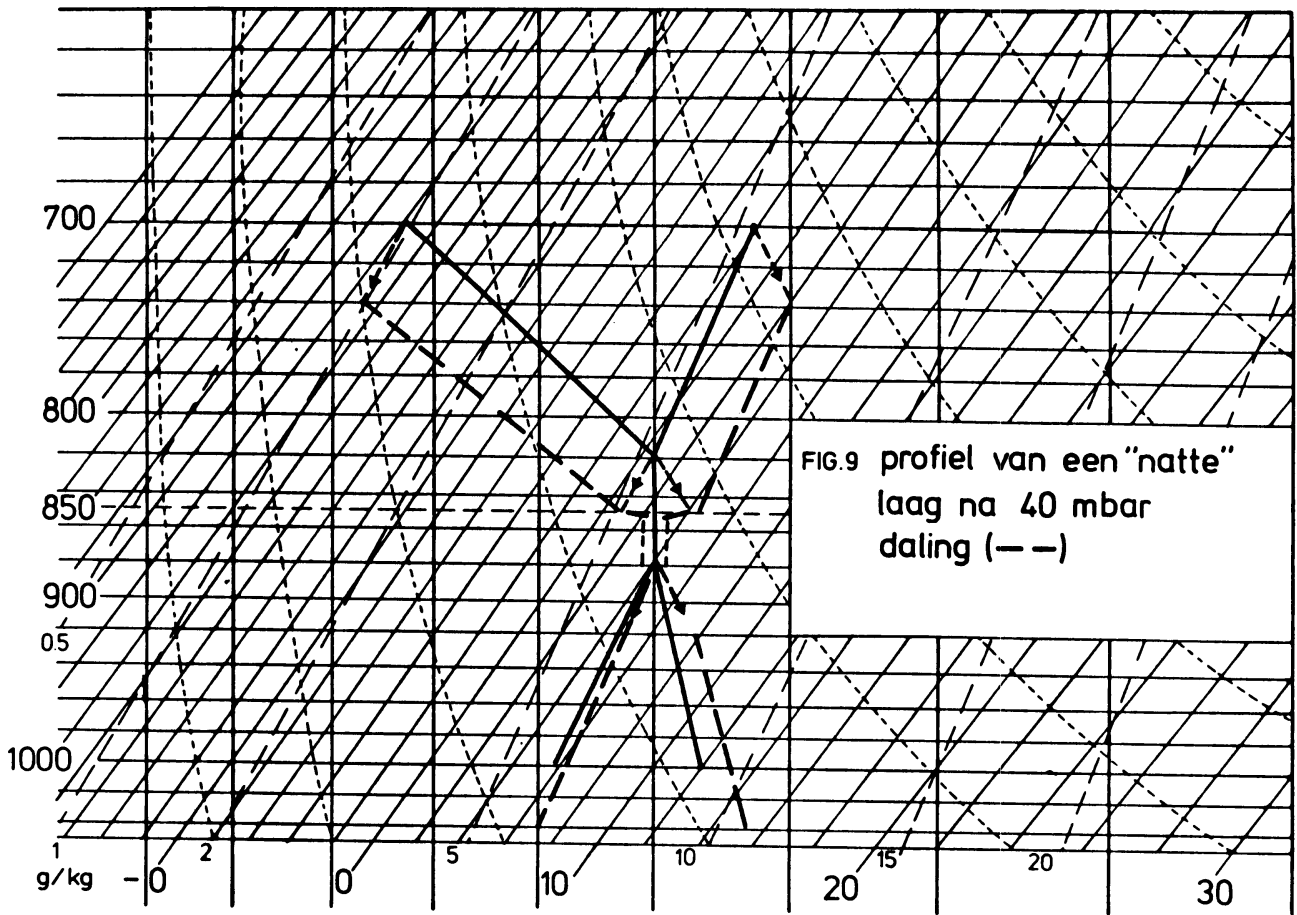
1. In de grenslaag ('s zomers overdag soms reikend tot 850 mbar, 's winters en 's nachts niet hoger dan 950-900 mbar) kan eerdergenoemde procedure niet worden toegepast. Hiervoor wordt op het KNMI een apart grenslaag trajektorienmodel ontwikkeld [10].
2. De keus van de meest representatieve sondeoplating wordt beter bij het bestuderen van het brongebied op de grondkaart en op satellietfoto's (zie hoofdstuk 3.2., praktijkvoorbeelden, geval 1.).
3. In de konstruktie van de Prog-Temp is de invloed van niet-adiabatische processen, zoals straling, vrijkomen van neerslag, menging e.d. verwaarloosd. (In de verwachte windvelden van ECMWF zijn deze processen wel verwerkt, in BK-4 in veel geringere mate.) Deze processen kunnen echter op subjektieve wijze in de konstruktie verwerkt worden. Een aantal voorbeelden van zo'n verfijnde konstruktie wordt hierna gegeven:
  - a. Het omhoog of omlaag brengen van een verzadigde laag, een wolkenlaag.

#### Voorbeeld 1

In figuur 8 is de laag tussen 880- en 820 mbar verzadigd. De toestandskromme van de verzadigde laag is evenwijdig aan de nat-adiabaat gekozen omdat deze toestand het meest voorkomt. Wanneer de lucht opgetild wordt kondenseert er waterdamp in de vochtige laag en de temperatuur neemt verzadigd adiabatisch af, de potentiële natteboltemperatuur  $\Theta_w$  blijft in de laag konstant ( $\Theta_w$  is konservatief voor adiabatische processen). Op de niveaus eronder en erboven is de afname droogadiabatisch, zodat aan de onderzijde van de laag een inversie ontstaat en aan de bovenzijde een (potentieel) onstabiel profiel. In figuur 8 is de situatie weergegeven die ontstaat na 40 mbar optilling. De laag wordt ruim tweemaal zo dik.

#### Voorbeeld 2

In figuur 9 wordt, uitgaande van dezelfde uitgangstoestand, het effect van een dalende luchtbeweging over 40 mbar weergegeven. Er is verondersteld dat in de vochtige laag tussen 880- en 820- mbar vloeibaar water in de vorm van wolkendruppeltjes aanwezig is. Uit de konstruktie blijkt dat de "natte" laag, in tegenstelling tot het vorige geval, steeds dunner wordt. Dit is het gevolg van het feit dat geleidelijk het aanwezige water verdampt, het eerst aan de bovenzijde van de wolk. Ook hier wordt gebruik gemaakt van de konservatieve eigenschap van  $\Theta_w$ . Aan de onderzijde ontstaat in de konstruktie een onstabiel laagje omdat de drogere lucht onder de "natte" laag sneller aanwarmt bij daling dan de "natte" laag zelf. In het onstabiele laagje kan de lucht weer kondenseren door afkoeling ten gevolge van opstijging. De dalende beweging wordt er min of meer teniet gedaan. De wolkenbasis gaat daardoor langzaam omhoog.



Figuur 10. Verandering van de toestandskromme ten gevolge van doorvallende neerslag in een onverzadigde laag.

————— uitgangstoestand

----- toestand na verzadiging door neerslag



b. Neerslag door een onverzadigde laag.

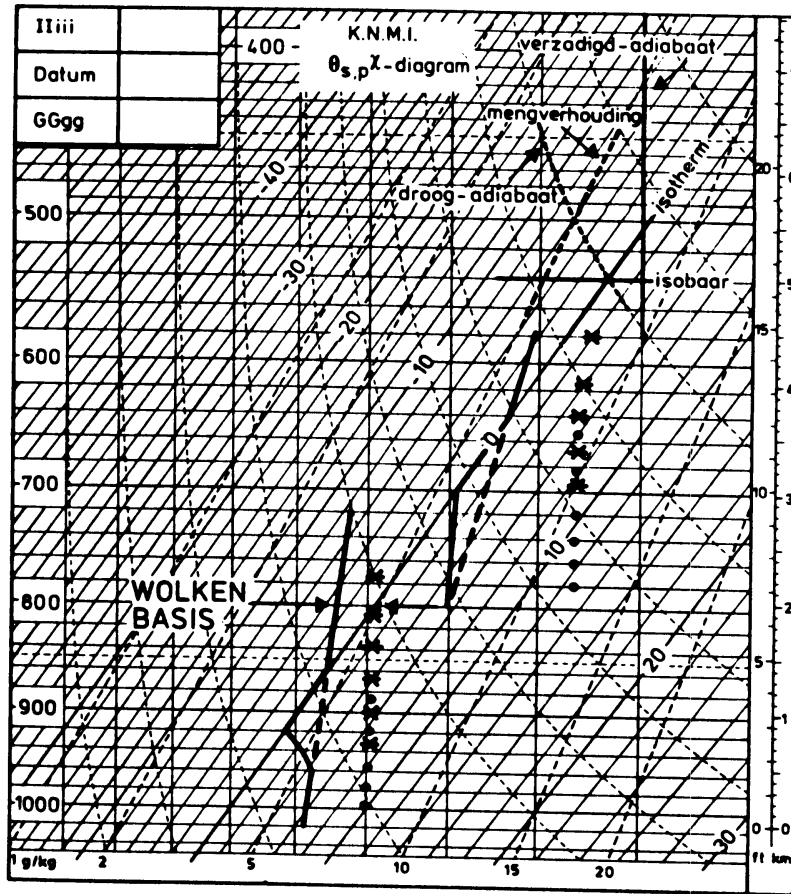
Wanneer neerslag door een onverzadigde luchtlaag valt, zal deze neerslag in die laag gedeeltelijk verdampen, waardoor deze laag (en ook de neerslag) een andere temperatuur ( $T$  en  $T_d$ ) krijgt. In figuur 10 zijn in een  $\Theta_s, P$ -diagram de toestandskrommen van  $T$  en  $T_d$  in een luchtlaag ter dikte van 150 mbar getekend. Door een luchtdeeltje op  $P_1$  eerst droogadiabatisch omhoog te brengen tot zijn condensatieniveau en het deeltje vervolgens -onder toevoeging van zoveel waterdamp, dat het verzadigd blijft- verzadigd adiabatisch omlaag te brengen tot druk  $P_1$ , verkrijgt men de "natteboltemperatuur"  $T_w$  (zie bijlage B) op  $P_1$  (is hier 700 mbar). Hetzelfde doet men voor alle punten tussen  $P_0$  en  $P_1$ . Stel nu dat door deze laag neerslag gaat vallen die op elk niveau direct de aldaar heersende temperatuur aanneemt. Omdat de laag niet verzadigd is treedt verdamping op, de lucht in de laag koelt af, wordt vochtiger en bereikt tenslotte overal de natteboltemperatuur. Dit verzadigingsproces, verzadiging door afkoeling ten gevolge van verdamping, is hetzelfde als die ten gevolge van optilling. Op elk drukniveau tussen 700- en 850-mbar kan men op de beschreven wijze een  $T, T_d$ -paar tot het condensatieniveau brengen en de  $T_w$  op dat drukniveau bepalen. In figuur 10 zijn alleen de  $T_w$ 's voor de drukvlakken 700- en 850-mbar grafisch bepaald. De  $T_w$ 's van de tussenliggende punten, op dezelfde manier bepaald, komen op de gestreepte lijn tussen de  $T_w$  van 850 mbar en die van 700 mbar. Een indicatie over de hoeveelheid neerslag, die uit een wolkenlaag op weg naar De Bilt valt, levert de quasi-objectieve methode van Van der Goot [5].

c. Profielwijziging door verandering aggregatietoestand

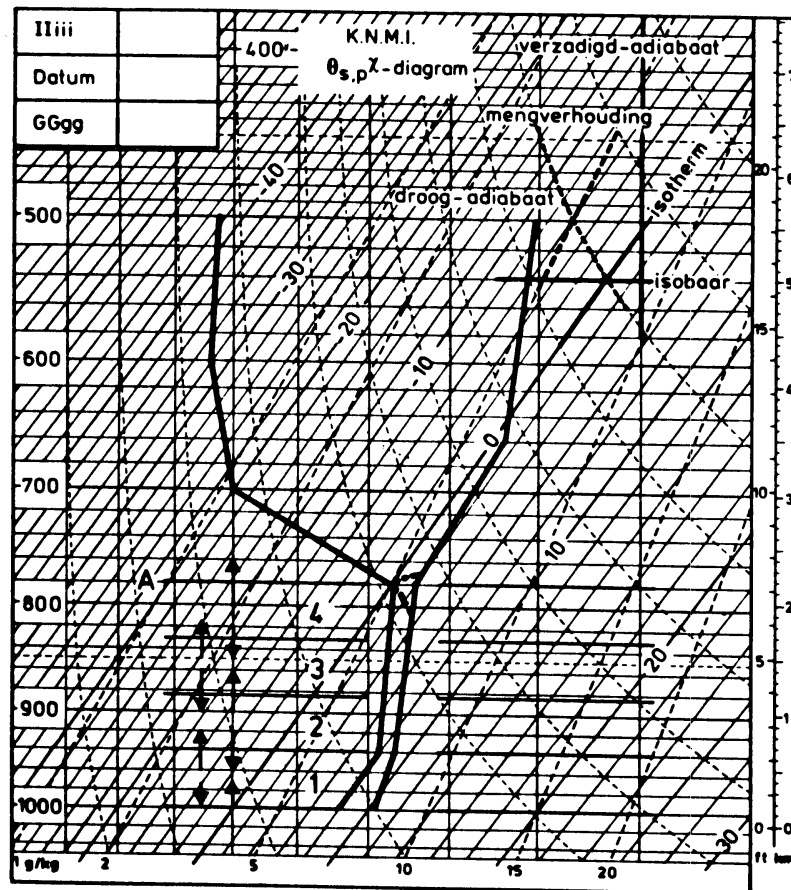
Het kan ook voorkomen dat neerslag tijdens de val een andere aggregatietoestand aanneemt. Als er sneeuw valt door het 0 °C-niveau, zie figuur 11, dan zal het smelten plaatsvinden in de laag direct onder dat niveau. Deze laag zal als gevolg hiervan afkoelen. De toestandskromme wordt isotherm en zal vaak een onstabiel gedeelte eronder vertonen. Dit laatste ten gevolge van de verdampende druppels in een droge laag, als de wolkenbasis hoger dan het 0 °C-niveau ligt, waardoor deze laag afkoelt (zie b.).

d. Straling

Op alle niveaus treden stralingseffecten op die het verwachte profiel kunnen veranderen. Als een voorbeeld mag gelden de uitstraling die plaatsvindt aan het grensvlak van een luchtlaag waarboven zich zeer droge lucht bevindt. Figuur 12 stelt een deel van het  $\Theta_s, P$ -diagram voor, waarin de toestandskromme en de dauwpuntskromme zijn getekend; onder niveau A bevat de lucht vrij veel waterdamp, boven niveau A bevindt zich zeer droge lucht. Laag 1 absorbeert een gedeelte van de door de aarde uitgezonden straling en straalt op zijn beurt ook weer uit, zowel naar beneden als naar boven. Ook de lagen 2 en 3 stralen naar boven en naar beneden evenveel uit. Deze lagen ontvangen dus ongeveer evenveel warmte als ze verliezen. Laag 4 straalt ook naar boven en naar beneden uit, maar ontvangt vrijwel geen straling van boven, vanwege de



Figuur 11. Verandering van het temperatuurprofiel tijdens neerslag bij het nul-grad Celsius niveau.



Figuur 12. Verandering van het profiel door uitstraling.

geringe hoeveelheid waterdamp in deze lagen. Deze laag koelt daardoor aan de bovenzijde het sterkst af. Er ontstaat op deze wijze een onstabiele laag met daarboven een stralingsinversie. Aan de bovenkant van elke wolkenlaag gebeurt hetzelfde mits er zich geen andere wolkenlaag boven bevindt. Volgens Bakan [1] is dan de maximale hoogte van de onstabiele bovenkant 150-200 m. De bovenlaag bestaat dan uit konvektieve cellen die tot een diepte van ongeveer 400 m in de wolkenlaag kunnen doordringen.

### 3.2. Enkele praktijkvoorbeelden

Geval 1. Het bijna oplossen van een wolkenlaag ten gevolge van dalende bewegingen.

De lucht, die op 9 april 1980 0000 GMT, boven De Bilt aanwezig was, had 24 uur tevoren als brongebied de omgeving van weerschip M op ongeveer 65 NB en 2 OL (zie figuur 13<sup>a</sup> en 13<sup>b</sup> voor de synoptische situatie bij respectievelijk vertrek en aankomst van de trajektoriën). In dit geval kan met behulp van een satellietfoto, figuur 14, worden aangetoond dat het sondestation M representatief is voor het brongebied.

De cumuliforme bewolking in het brongebied op de satellietfoto wordt door de meting van schip M, zie figuur 15, duidelijk weergegeven. De voorspelde trajektoriën daalden op alle drukkiveaus (zie tabel 4).

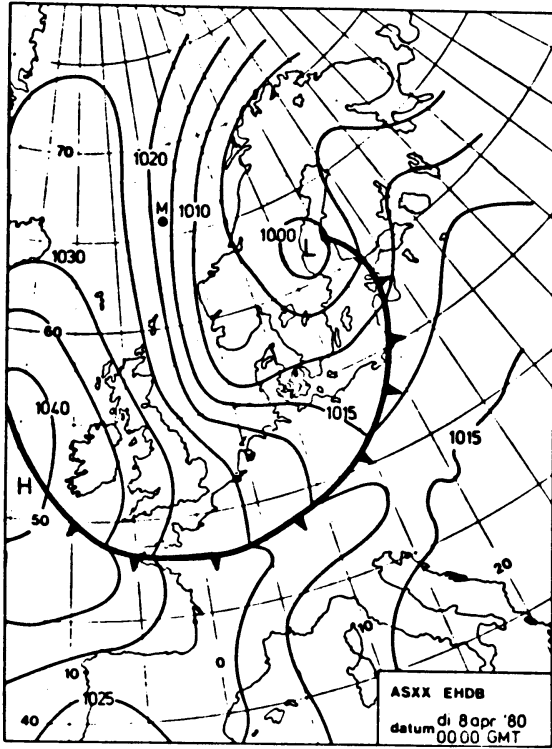
<u>Aankomst niveau (mbar)</u>	<u>Positie vertrek</u>	<u>Niveau ver- trek (mbar)</u>	<u>Gebruikte sonde</u>	<u>Bewolking in brongebied</u>
500	71 NB/01 OL	428	Schip M	6/8 Cb 300-600 m
700	69 NB/02 OL	640	Schip M	
850	67 NB/03 OL	795	Schip M	
925	66 NB/03 OL	881	Schip M	
1000	67 NB/04 OL	975	Schip M	

Tabel 4. Vertrekposities trajektoriën op 8 april 1980, 0000 GMT

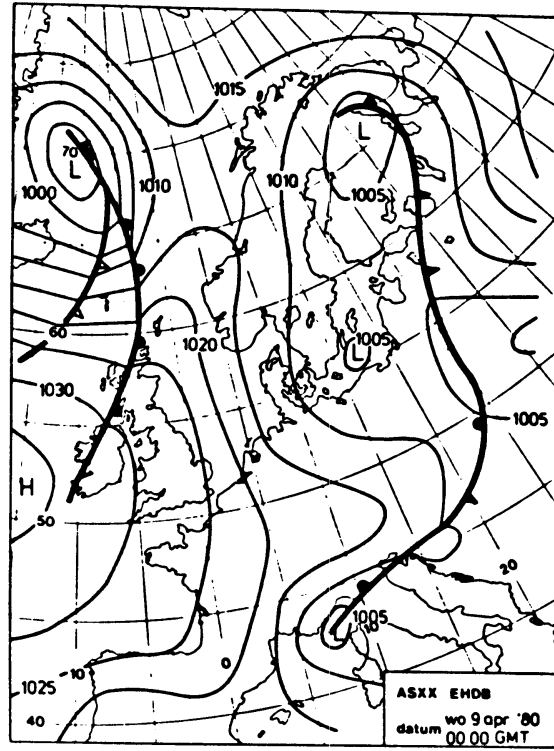
De veronderstelling, dat deze daling voldoende was om de aanwezige bewolking in het brongebied tijdens het transport over de Noordzee volledig op te lossen, werd twijfelachtig na konstruktie van het verwachte temperatuur- en vochtigheidsprofiel. In deze konstruktie, zie figuur 15, zijn o.a. de karakteristieke punten op 480 en 780 mbar gebruikt. Vanaf 820 mbar werd nat-adiabatisch over 55 mbar gedaald. Uit de konstruktie blijkt een "nat" stuk in het verwachte profiel tussen 940 en 860. De verwachting dat de cumulonimbi in het brongebied tijdens het transport overgaan in een stratocumuluslaag werd hierdoor gestaafd. In De Bilt werd 5/8 Sc waargenomen. In figuur 16 zijn de verwachte en opgetreden profielen voor De Bilt weergegeven.

Geval 2. Het vormen van middelbare bewolking.

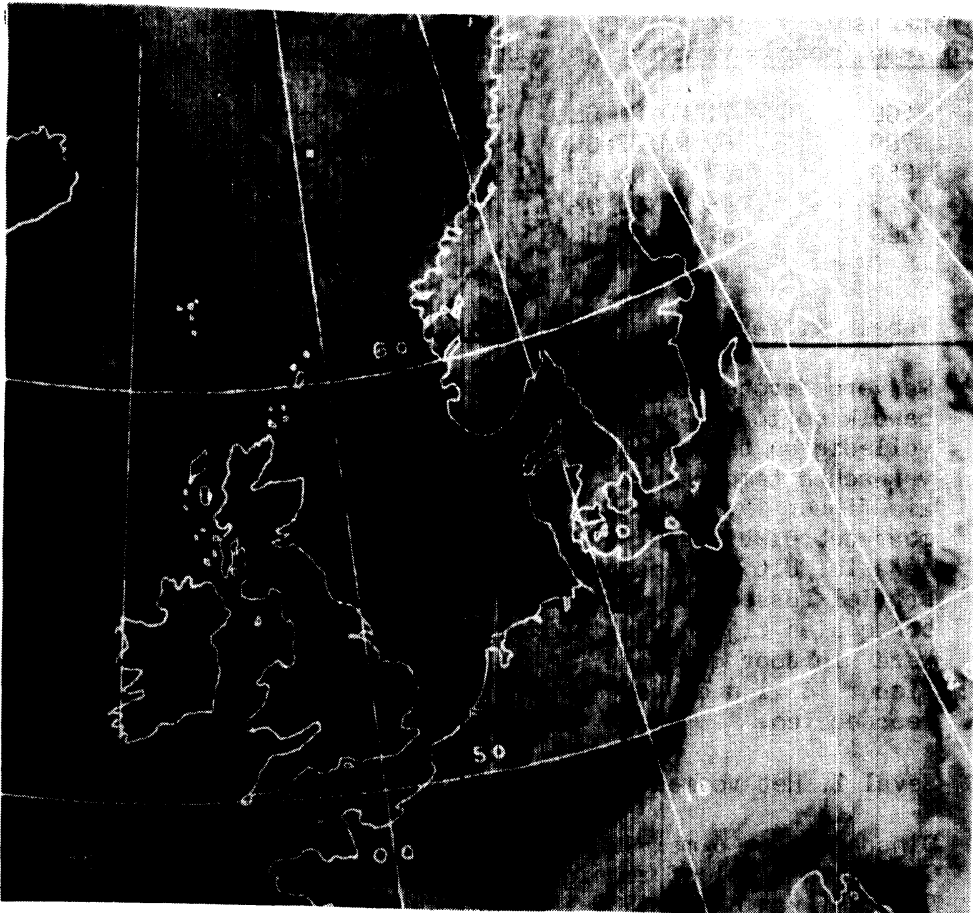
Dinsdagmorgen 6 mei 1980 begon te De Bilt zonnig (1/8 Sc om 0600 GMT) en het bleef zonnig tot de avond. De synoptische situaties om 0000 GMT van 6 mei 1980 is weergegeven in figuur 17.a.. In Nederland en Duitsland was het onbewolkt, in Payerne (Zwitserland) veel



Figuur 13a. Synoptische situatie op 8 april 1980, 0000 GMT.

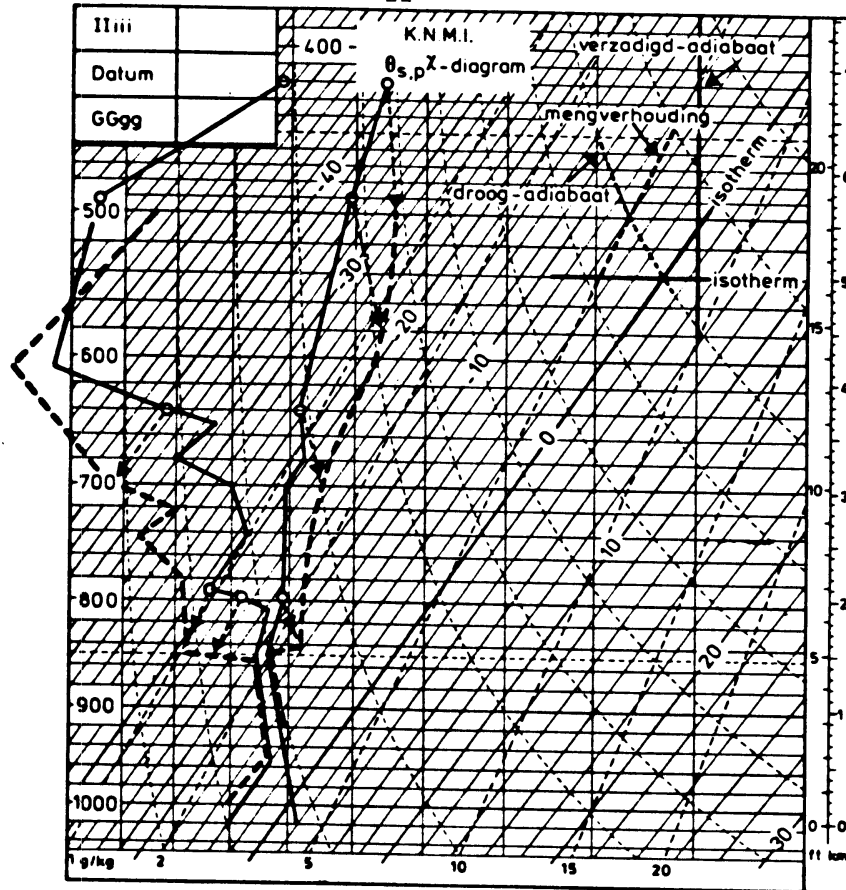


Figuur 13b. Synoptische situatie op 9 april 1980, 0000 GMT.

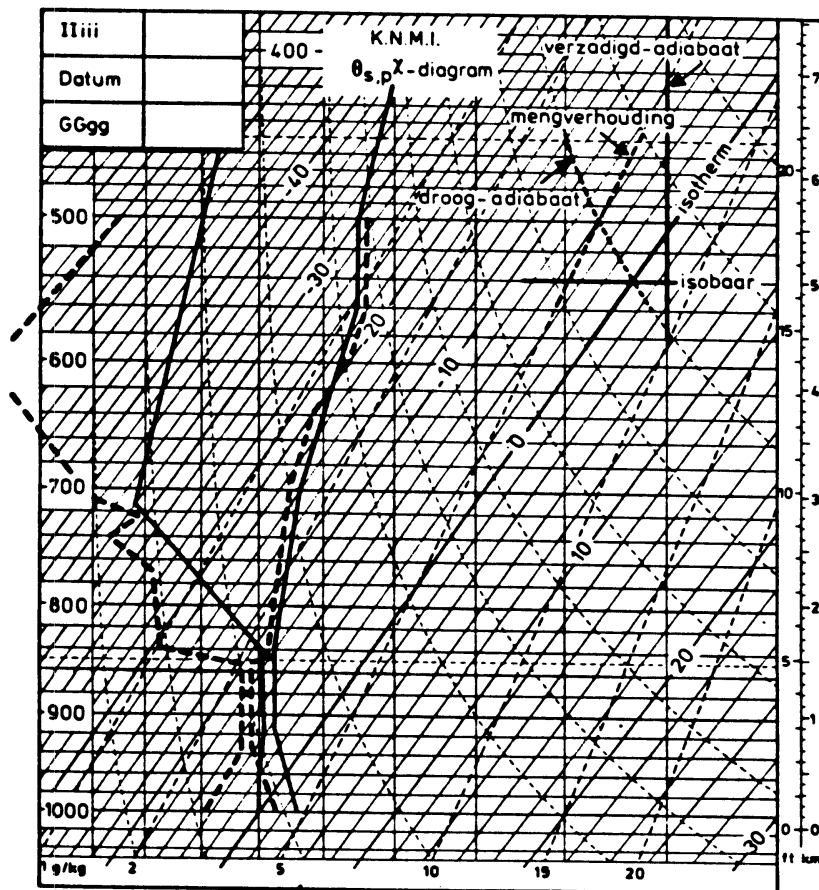


Figuur 14. Satellietopname (NOAA-6 VIS 8/4/80 0800 GMT) van het brongebied.

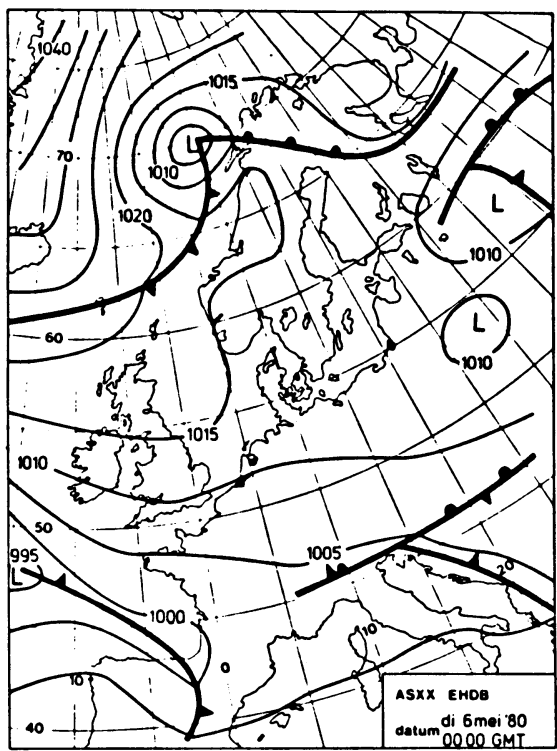
▣ positie schip M



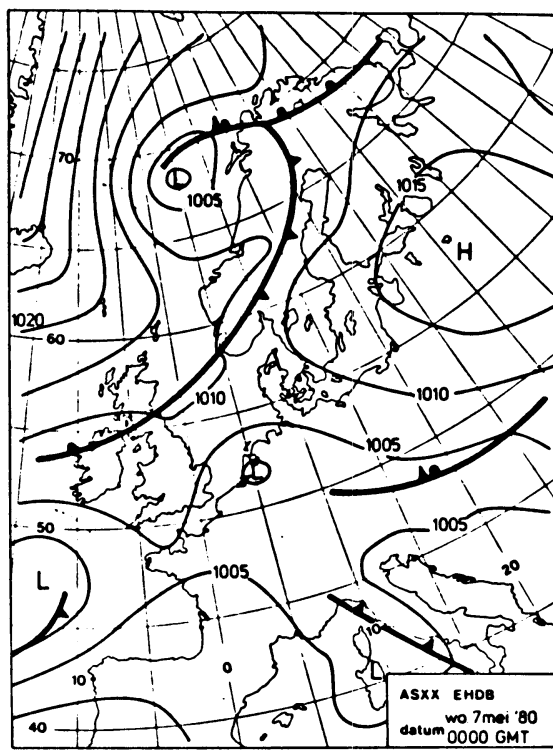
Figuur 15. Getrokken lijn: Temperatuur- en vochtigheidsprofiel van schip M op 8 april 1980, 0000 GMT.  
 Dikke gestreepte lijn: Verwacht profiel voor De Bilt op 8 april 1980, 0000 GMT.



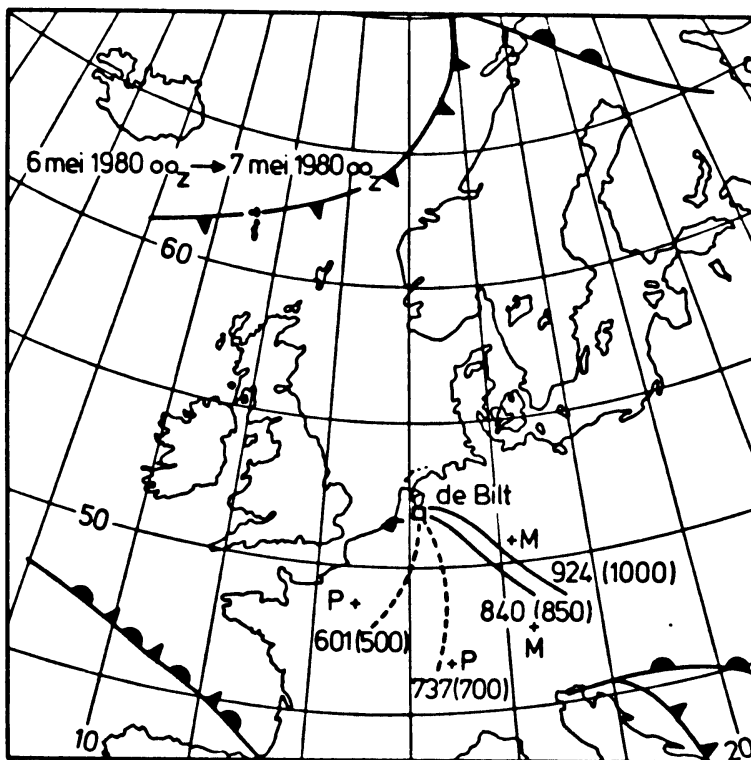
Figuur 16. Getrokken lijn: Waargenomen profiel van De Bilt op 9 april 1980, 0000 GMT.  
 Gestreepte lijn: Verwacht profiel voor dezelfde tijd.



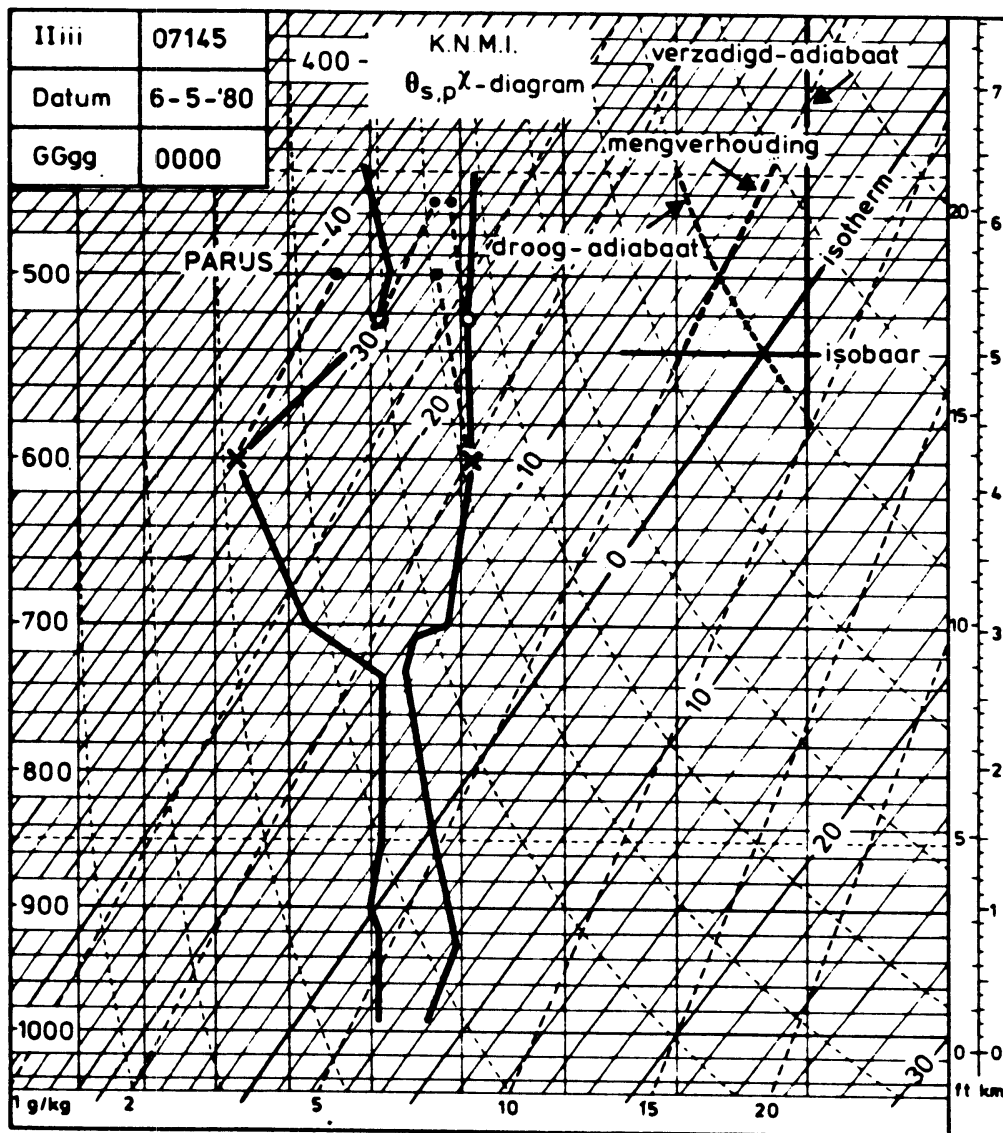
Figuur 17a. Synoptische situatie op 6 mei 1980, 0000 GMT.



Figuur 17b. Synoptische situatie op 7 mei 1980, 0000 GMT.

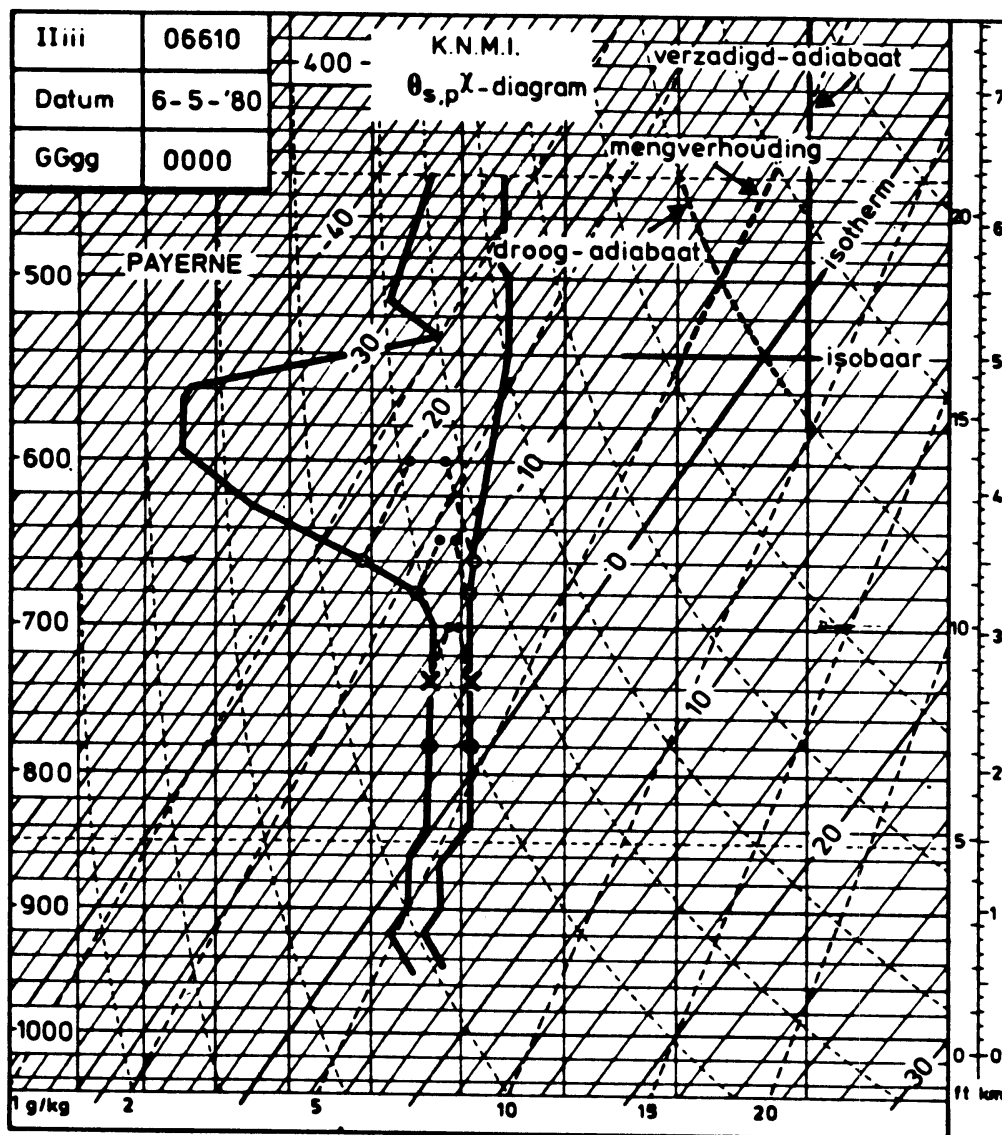


Figuur 18. 24 uurs trajectoriën die in De Bilt eindigen op 500-, 700-, 850- en 1000 mbar. radiosonde stations gebruikt bij de konstruktie. - - - - stijgende beweging, ————— dalende beweging.



Figuur 19. Radiosondeprofiel van Parijs, gebruikt voor de konstruktie.

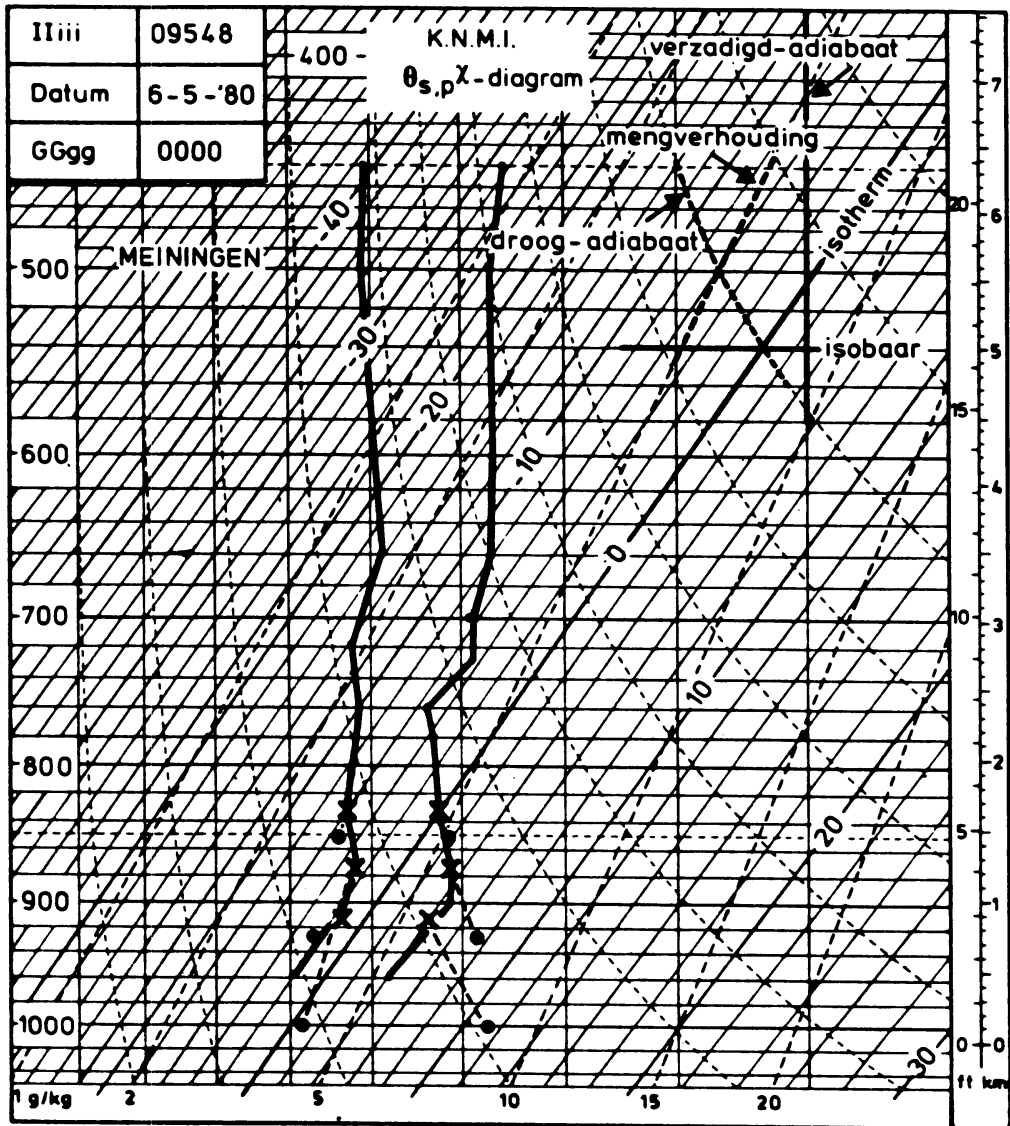
- × nivo van vertrek voor 500 mbar.
- karakteristiek punt.
- nivo van aankomst te De Bilt.



Figuur 20. Radiosondeprofiel van Payerne (Zwitserland), gebruikt voor de constructie.

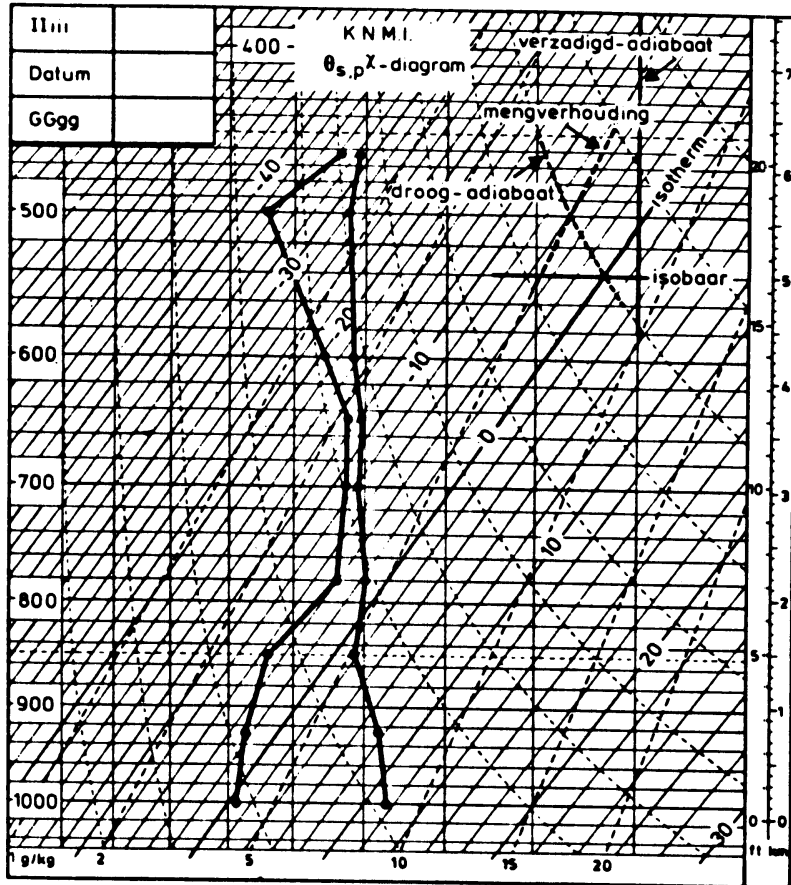
- X nivo van vertrek voor 700 mbar.
- karakteristiek punt.
- nivo van aankomst te De Bilt.



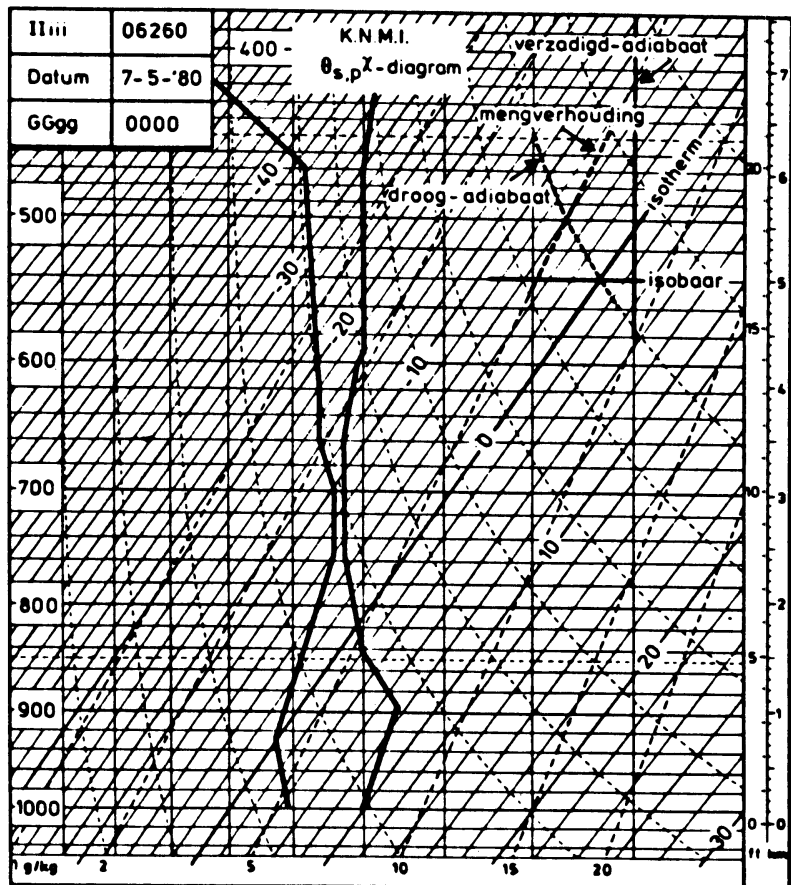


Figuur 21. Radiosondeprofiel van Meiningen (DDR), gebruikt voor de konstruktie.

- x nivo van vertrek voor 850-, 925- en 1000 mbar.
- o nivo van aankomst te De Bilt.



Figuur 22. Verwacht profiel uit de konstrukties van de sondeoplatingen van Parijs, Payerne en Meiningen voor De Bilt, 7 mei 1980, 0000 GMT.



Figuur 23. Gemeten profiel van De Bilt op 7 mei 1980, 0000 GMT.

bewolking op 500 m en Parijs meldde bewolking op 1800 m. De 24-uurs trajectoriën, starttijd 0000 GMT op 6 mei 1980, met hun brongebieden voor de niveaus 500-, 700-, 850- en 1000 mbar zijn in figuur 18 aangegeven. De gestreepte lijnen stellen een opwaartse beweging voor langs de trajectorie, de getrokken lijnen een neerwaartse beweging.

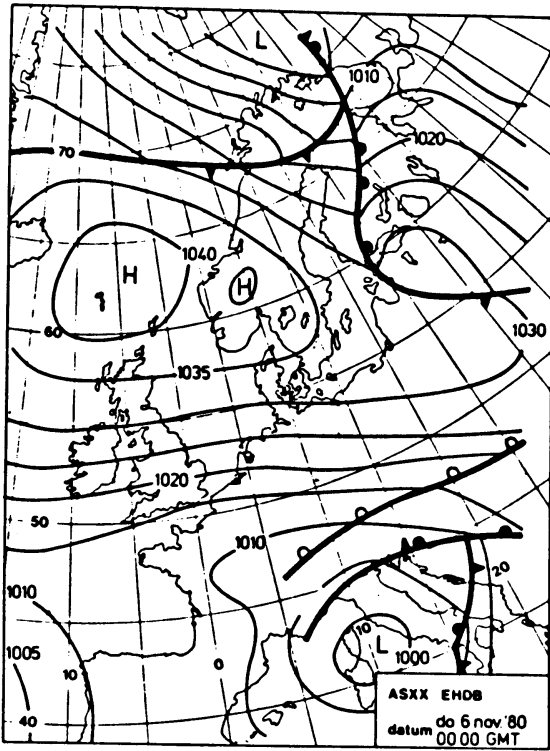
aankomst niveau mbar	positie vertrek	niveau vertrek mbar	gebruikte sondestations	bewolking brongebied
500	47.5 NB 1.4 OL	601	Parijs (07145)	2/8Sc op 1800 m
700	47.6 NB 8.0 OL	737	Payerne (06610)	7/8Sc op 50 m
850	49.4 NB 12.1 OL	839	Meiningen (09548)	onbewolkt
925	49.3 NB 12.7 OL	878	Meiningen (09548)	onbewolkt
1000	49.2 NB 13.3 OL	924	Meiningen (09548)	onbewolkt

Tabel 5. Vertrekposities trajectoriën op 6 mei 1980, 0000 GMT welke 24 uur later te De Bilt aankomen.

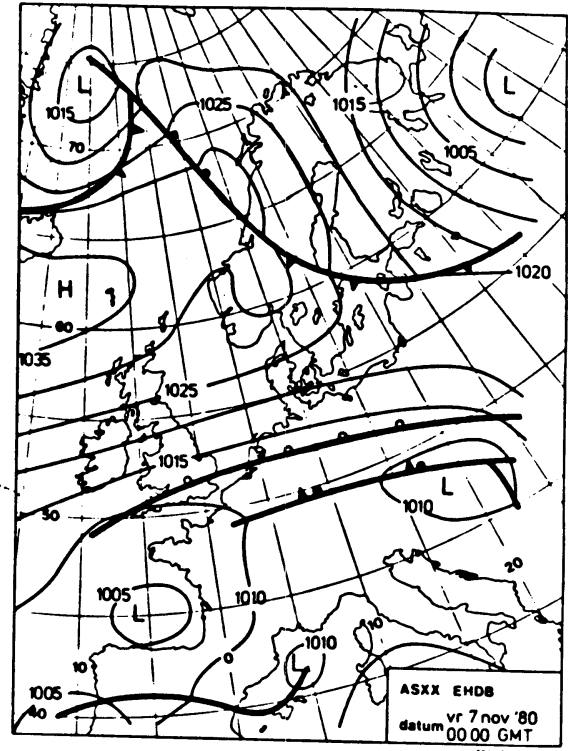
Uit de gegevens van de trajectoriën en de radiosonde-oplatingen in de brongebieden werd een +24 uur T- en T<sub>d</sub>-profiel gekonstrueerd, geldig voor De Bilt op 7 mei 1980, 0000 GMT, waarin ook de karakteristieke punten van de oplatingen van Parijs en Payerne zijn verwerkt; zie figuur 19, 20 en 21 voor de konstruktie. Het gekonstrueerde profiel, overgenomen op figuur 22, laat zien dat tussen 750- en 650 mbar de vochtigheid hoog genoeg zou worden voor het ontstaan van bewolking. Er werd daarom voor 7 mei 1980 0000 GMT 7/8 Ac verwacht met als wolkenbasis circa 2500 meter. Op die tijd meldde de waarnemer te De Bilt 7/8 Sc en lichte regen. Het werkelijk gemeten profiel is in figuur 23 weergegeven.

### Geval 3. Regen overgaand in sneeuw.

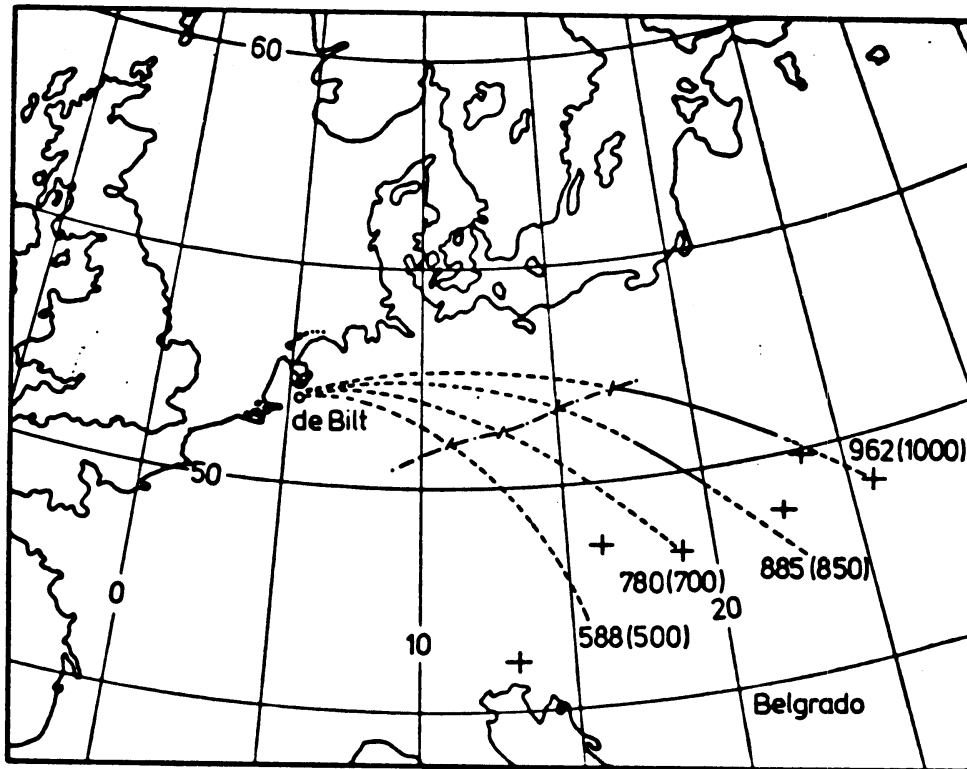
Om een lagedrukgebied boven Italië werd met zuidoostelijke winden relatief warme en vochtige lucht via De Balkanlanden naar onze omgeving gevoerd (zie figuur 24 a en b voor de synoptische situatie, 6 november 1980, 0000 GMT en 7 november 1980, 0000 GMT). De trajectoriën, om 8.30 uur beschikbaar, gaven aan dat het brongebied van de lucht, die 24 uur later verwacht werd in De Bilt aan te komen, boven het noordelijke deel van de Balkan lag, zie figuur 25. Het sneeuwde in het Alpengebied, maar boven Zuid-Duitsland ging de neerslag over in regen of motregen. Aangezien de temperatuur bij het aardoppervlak nog onder nul was, werd aldaar door verscheidene stations onderkoelde neerslag gemeld. Uit de gekonstrueerde Prog-Temp, waarbij in dit geval geen karakteristieke punten nodig waren, en de kennis over het neerslagtype in de brongebieden, werd in eerste instantie verwacht dat de sneeuw, die viel door de laag met een temperatuur boven nul graden, zou smelten. Onder het 900 mbar niveau, in de grenslaag, zou de regen bevriezen of onderkoeld geraken. Dit bleek ook het geval. In Limburg werd 's middags onderkoelde motregen gemeld. Subjektief werd er nog het volgende toegevoegd (zie ook paragraaf 3.1., opmerking c):  
De laag, met de luchttemperatuur boven het vriespunt, zal door de doorvallende neerslag op den duur afkoelen tot onder nul graden, waardoor de onderkoelde regen in sneeuw moet overgaan. Dit gebeurde inderdaad.



Figuur 24a. Synoptische situatie op 6 november 1980, 0000 GMT.



Figuur 24b. Synoptische situatie op 7 november 1980, 0000 GMT.

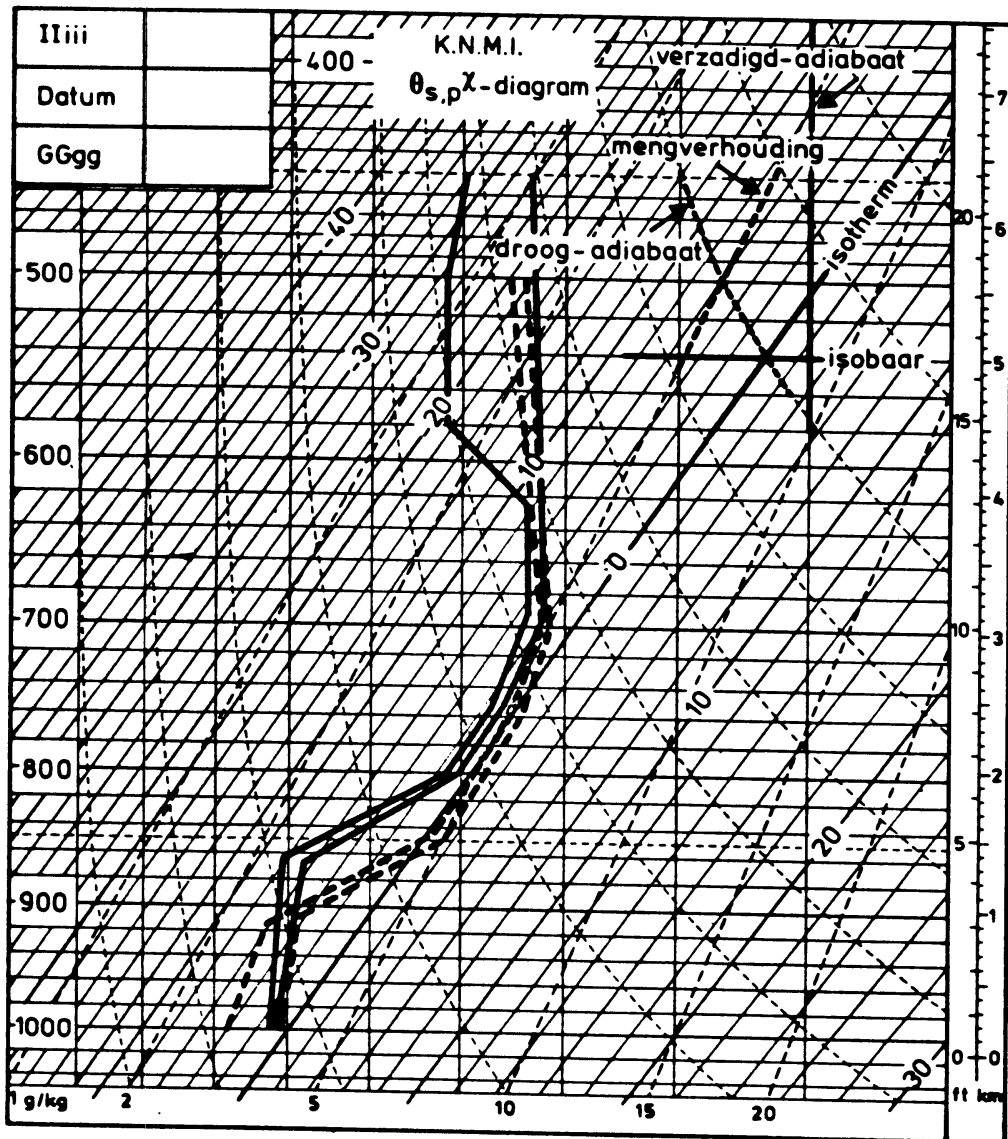


Figuur 25. 24 uurs trajectoriën die in De Bilt eindigen op 500-, 700-, 850- en 1000 mbar.

gebruikte radiosonde stations.

----- stijgende beweging

———— dalende beweging



Figuur 26. Verwacht T- en Td- profiel ( - - - - ) voor De Bilt op 7 november 1980, 0000 GMT.

( ————— ) werkelijk T- en Td- profiel van De Bilt.

Uit de geschatte hoeveelheid regen [5] kon worden berekend hoe lang het duurt, voordat de "Prog-Temp" in de laag rond 850 mbar zover is afgekoeld, dat de onderkoelde regen bij de grond overgaat in sneeuw. Met de methode van Ivens [7] werd berekend, dat dit om 20.00 uur zou gebeuren. In werkelijkheid werd de eerste sneeuw, na onderkoelde regen, om 16.00 uur in Zuid-Limburg gemeld. Een verklaring voor dit verschil bleek een grotere neerslagintensiteit dan die ingevoerd in de methode. Zie voor verwacht en werkelijk opgetreden profiel figuur 26.

### 3.3. De betrouwbaarheid van de gekonstrueerde profielen

Het gebruik van de gekonstrueerde  $T - T_d$ -profielen in de weerdienst over de periode 1979-1981 leert, dat de interpretatie van de "Prog-Temp" in 20 tot 30% van de gevallen bruikbare informatie aan de weersverwachting toevoegt. Naast dit subjektieve getal hebben we objektieve cijfers over de fout in de "Prog-Temp" verzameld. De in de vorige paragraaf geschetste methode gaat er in eerste instantie van uit dat de verticale bewegingen adiabatisch verlopen. Op subjektieve wijze worden de effecten toegevoegd van eventueel doorvallende neerslag en verandering van massakenmerken in de loop van een etmaal door straling.

Bij de verifikatie van de "Prog-Temp" is alleen gekeken naar de betrouwbaarheid van de "Prog-Temp", gekonstrueerd met adiabatische veronderstelling. Hiertoe zijn de resultaten van de op 850 mbar en 700 mbar verwachte dauwpuntsdepressie,  $T - T_d$ , die bepalend zijn voor het al of niet vormen van bewolking, vergeleken met de opgetreden waarden boven De Bilt. In de tabellen 6 en 7 staan de resultaten van 156 konstrukties in de periode oktober 1980 tot oktober 1981. De "subjektieve aanpassingen" zijn niet in de verifikatie verwerkt. Als we de voorspelde en opgetreden dauwpuntsdepressies in twee klassen indelen:

$T - T_d \leq 2$  (= bewolking\*) en  $T - T_d > 2$  (= geen bewolking) dan kunnen we een contingentietabel opmaken, zie tabel 6 voor 850 mbar en tabel 7 voor 700 mbar.

\*)  $T - T_d \leq 2$  is in de meeste aerologische diagrammen het gebied met een relatieve vochtigheid van 100%.

#### 4. Konklusie en diskussie

Het voorafgaande leidt tot de volgende konklusies:

- a. De fout in het brongebied van met behulp van BK-4-windvelden berekende +24 uurs trajektoriën, die in De Bilt op 850 mbar aankomen, is 's zomers ongeveer 197 km en 22 mbar fout. 's Winters is deze fout 375 km en 49 mbar. Voor trajektoriën aankomend op 500 mbar zijn deze waarden 's zomers 349 km en 47 mbar, in de winter bijna het dubbele.
- b. Fouten in het brongebied van trajektoriën hangen, gemiddeld genomen, af van de afgelegde afstand. Bij de met behulp van BK-4 voorspeld +24 uurs trajektoriën is dit getal omstreeks 30% van de afgelegde weg. Voor individuele trajektoriën vertoont deze waarde echter grote verschillen.
- c. Met behulp van trajektoriën en gedetailleerde informatie uit het brongebied worden +24 uurs temperatuur- en vochtigheidsprofielen voor De Bilt gekonstrueerd. De gekonstrueerde "Prog-Temps" vertonen bij volledig goede voorspelling een oplossend vermogen van circa 20 mbar en zijn daarom in principe geschikt om de veel voorkomende wolkenlaagjes van minder dan 80 mbar te voorspellen. De huidige en volgende generatie roosterpuntsmodellen (ECMWF, LAM) hebben tussen 900 en 300 mbar een oplossend vermogen van 80 mbar of meer en zijn daarom principieel niet in staat deze wolkenlaagjes (anders dan op statistische wijze) te voorspellen. De enkele voorbeelden laten zien dat de +24 uur "Prog-Temp" de potentie heeft om het oplossen en vormen van wolkenlaagjes van ongeveer 50 mbar te voorspellen.
- d. Over 156 gevallen is de score van de "Prog-Temp", waarbij de verwachte waarde van  $T-T_d$  is opgesplitst in een groep met waarde  $\leq 2$  °C ("bewolkt") en  $> 2$  °C ("onbewolkt"), beter dan een persistentieverwachting, waarbij de gemeten radiosondegegevens van De Bilt als +24 uurs "Prog-Temps" dienden, zie tabel 6 en 7.

tabel 6

verwacht

		850 mbar	
		$T-T_d \leq 2$ "onbewolkt"	$T-T_d > 2$ "bewolkt"
opgetreden	$T-T_d \leq 2$ "onbewolkt"	28 [20]	24 [32]
	$T-T_d > 2$ "bewolkt"	27 [30]	77 [74]

\*) PI (persistentie) = .096  
PI (methode) = .279

[ ] is persistentie

Tabel 7

verwacht

		700 mbar	
		T-T <sub>d</sub> 2 "onbewolkt"	T-T <sub>d</sub> 2 "bewolkt"
opgetreden	T-T <sub>d</sub> 2 "onbewolkt"	15 [4]	9 [20]
	T-T <sub>d</sub> 2 "bewolkt"	25 [19]	107 [113]

\*) PI (persistentie) = .023  
 PI (methode) = .436

[ ] is persistentie

Overgaan van BK-4 naar ECMWF-windvelden zal, naar verwacht, aan de ene kant "de verwachte trajectoriën" verbeteren, aan de andere kant de behoefte aan "een verwachte temp" verminderen omdat (in principe) iedere 80 mbar de temperatuur en vochtigheid wordt voorspeld. De verwachte temperatuur en relatieve vochtigheid op de niveaus 850, 700 en 500 mbar van het ECMWF zijn nu al beschikbaar. De kracht van bovenstaande aanpak blijft echter liggen in:

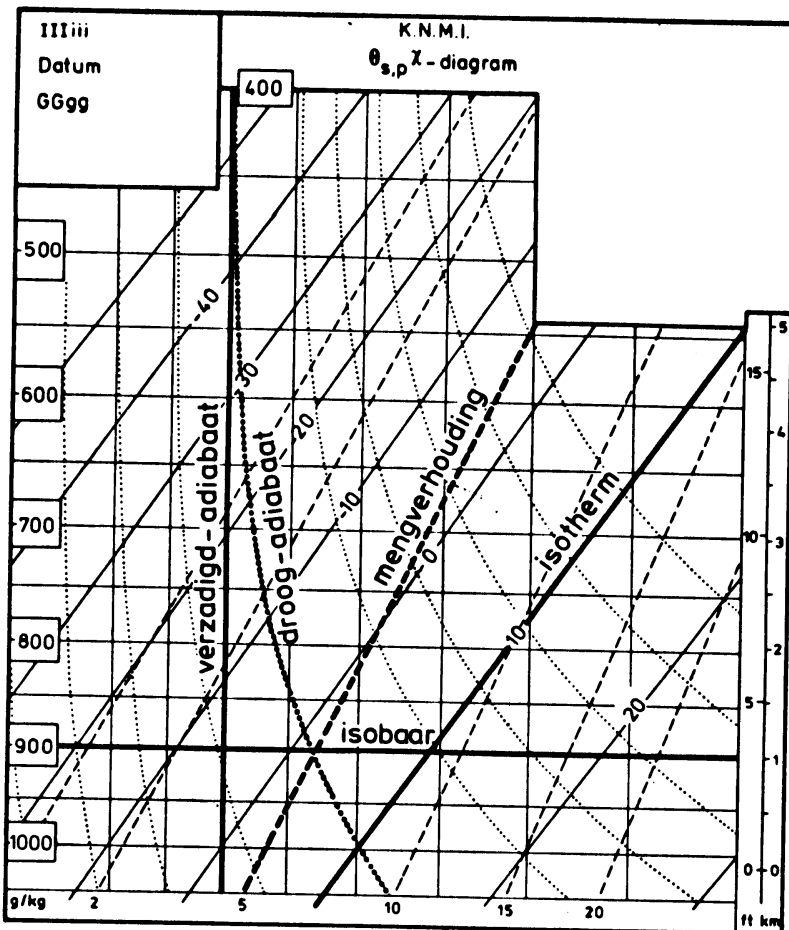
- a. de snelheid: Informatie van de 0000 GMT radiosonde kan tezamen met trajectoriën, gebaseerd op de "oude" 12 GMT serie van het ECMWF, gebruikt worden reeds vroeg in de ochtend een verwachte temp beschikbaar te hebben.
- b. De verticale resolutie: Hoewel er niet veel dunne lagen bewolking boven de grenslaag voorkomen kan in voorkomende gevallen met de beschreven methode waarschijnlijk een betere verwachting geleverd worden dan met ECMWF-Temps alleen. In de toekomst zijn ook door het LAM berekende Temps leverbaar. Een, bijvoorbeeld door het ECMWF of het LAM, berekende Temp kan dan door deze methode aangevuld of verbeterd worden.

\*) Volgens de KNMI-verifikatiemethode [6] is de PI (Prestatie Index) van de methode beter dan persistentie. Verder is de methode voor 850 mbar net niet significant, voor 700 mbar wel.

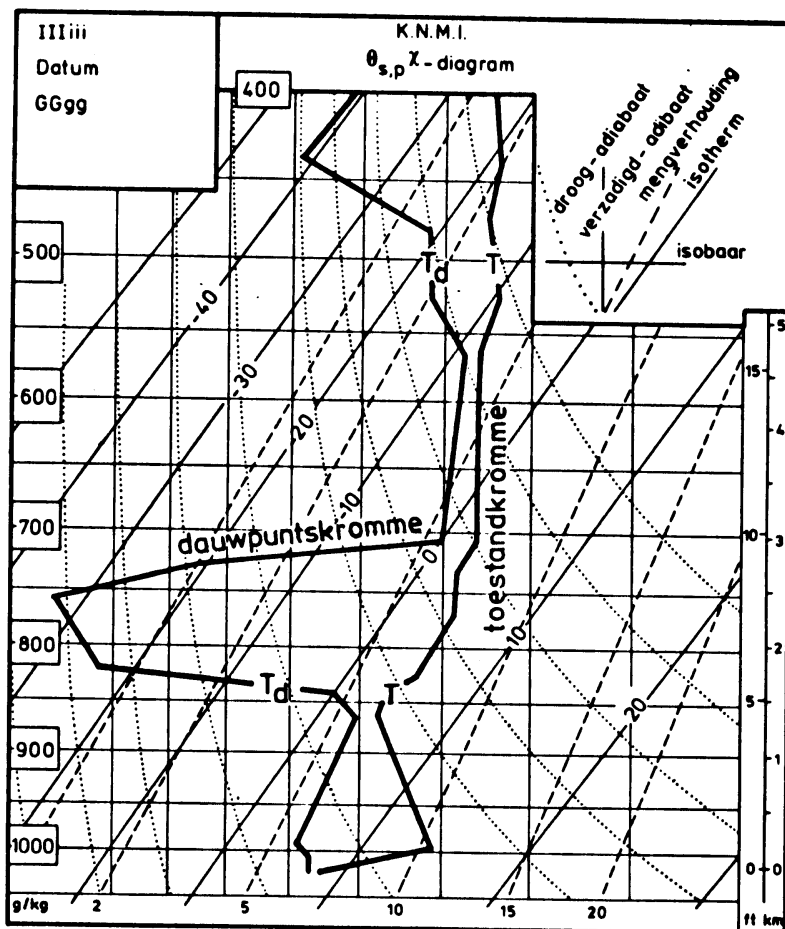


5. LITERATUUR

1. Bakan S, 1982 : Radiative Influence on small scale convection within stratus cloudlayers. Cloud Dynamics, AEPS, pp 43-56.
2. Daan H, 1974 : Temperatuurinversies, WR 74-6, KNMI, De Bilt.
3. Dutton J.H., 1976 : The Caeseless Wind, McGraw-Hill, New York.
4. Exter Blokland, A.W., 1979 : Een baroklien vier lagen model met gefilterde vergelijkingen, WR 79-12, KNMI, De Bilt.
5. Goot C. van der, 1980 : Enige operationele ervaringen met trajektoriën, V-359, KNMI, De Bilt.
6. Hanssen en Kuipers, 1965 : On the relationship between the frequency of rain and various meteorological parameters, Med. en Verh. nr. 81, KNMI.
7. Ivens R.A.A.M., 1982 : Berekening van neerslagsoorten bij temperaturen rond 0 °C, TR-20, KNMI, De Bilt.
8. Reiff J., Blaauboer D.: 1982 : On the forecasting of thin layer clouds, Preprint Volume of External Abstracts; Conference on Cloud Physics, 15-18 november.
9. Reiff J., Velds C.A., 1979 : The use of a trajectory model for studying interregional transport of air pollution, Scientific Report 79-6, KNMI, De Bilt.
10. Reiff J., Ulden A.P. van, Cats G, Blaauboer D, Bruin H.A.R., 1982 : An air-mass Transformation Model for short Range Weather Forecasting. Part I: The model. Part II: Modelperformance, the influence of advection and of the detailed analysis. Submitted to M.W.R., nov. 1982.



Figuur 27.



Figuur 28.

## 6. BIJLAGEN

### A. Het gebruik van het $\theta_s, p$ -diagram (KNMI).

Om het verloop van de toestand van de atmosfeer met de hoogte te illustreren is gebruik gemaakt van een  $\theta_s, p^x$ -diagram dat in de weerdienst van het KNMI wordt toegepast. Op deze diagrammen kan het verloop van de temperatuur (toestandskromme) en de vochtigheid (dauwpuntskromme) van de atmosfeer worden weergegeven, zie figuur 28.

In dit  $\theta_s, p^x$ -diagram, figuur 27, zijn weergegeven:

- isobaren: dit zijn de horizontale lijnen met de drukwaarden aan de linkerzijde. In de figuren 27 en 28 zijn de isobaren om de 50 mbar getrokken.
- verzadigd- of nat-adiabaten: dit zijn de verticale rechte lijnen. Ze worden ook wel  $\theta_s$ -lijnen genoemd of pseudo-adiabaten. Hierbij is aangenomen dat de condensatieprodukten uit vloeibaar water bestaan en onmiddellijk uitregenen. De verzadigd potentiële temperatuur ( $\theta_w$ ) is af te lezen op het snijpunt van deze adiabaten met de 1000 mbar-isobaar, aan de hand van de isothermen.
- isothermen: dit zijn de van linksonder naar rechtsboven lopend; getrokken, lijnen (Hier om de 10 °C getekend). droogadiabaten:
- dit zijn de gekromde stippellijnen welke van rechts gekromd omhoog lopen en vervolgens ergens boven in het diagram samenvallen met de verzadigd adiabaten.
- mengverhouding: de streeplijnen, welke iets steiler verlopen dan de isothermen, zijn de lijnen van gelijke mengverhouding. Onderaan (langs de 1050 mbar) is bij elke mengverhoudingslijn de waarde in g/kg aangegeven.
- hoogteschaal: aan de rechterzijde van het diagram is het verband aangegeven tussen de druk en de hoogte volgens de ICAO-standaardatmosfeer. De hoogten zijn vermeld in 1000-tallen geopotentiële meters (km) en in dito voeten (ft).

## B. Enkele gebruikte meteorologische grootheden

Het waterdampgehalte van de atmosfeer kan op verschillende wijze worden uitgedrukt en wel als:

- a. De dampdruk (dampspanning):  $e$ .  
 Hieronder wordt verstaan de kracht, die door de waterdampmolekulen wordt uitgeoefend loodrecht op een vlakje van  $1 \text{ cm}^2$ .  
 Voor iedere temperatuur  $T$  bestaat een verzadigingsdampspanning, de maximale dampdruk  $E$ .
  
- b. De relatieve vochtigheid:  $f$   
 Dit is de verhouding tussen de heersende dampdruk  $e$  en de bij dezelfde temperatuur maximaal mogelijke dampdruk  $E$ , uitgedrukt in procenten.
  
- c. De dauwpuntstemperatuur:  $T_d$   
 Dit is de temperatuur waarbij de waarden van de heersende dampdruk tevens de waarde is van de maximale dampdruk.
  
- d. De natteboltemperatuur:  $T_w$   
 Dit is de temperatuur, welke een hoeveelheid lucht verkrijgt door er, zonder warmteuitwisseling met de omgeving, zoveel water of ijs in te laten verdampen, dat de lucht verzadigd raakt.
  
- e. De potentiële natteboltemperatuur:  $\theta_w$   
 Dit is de temperatuur welke een luchtdeeltje verkrijgt door het eerst adiabatisch omhoog te brengen tot zijn condensatieniveau en het deeltje vervolgens -onder toevoeging van zoveel waterdamp, dat het verzadigd blijft- verzadigd adiabatisch omlaag te brengen tot een druk van 1000 mbar (figuur 10). De temperatuur welke het deeltje dan heeft noemt men  $\theta_w$ .