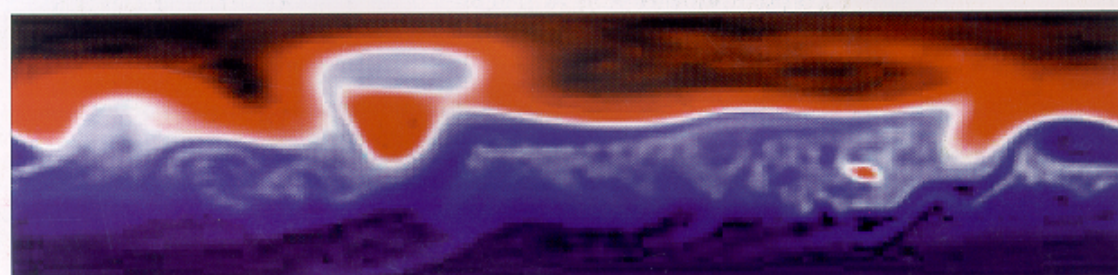
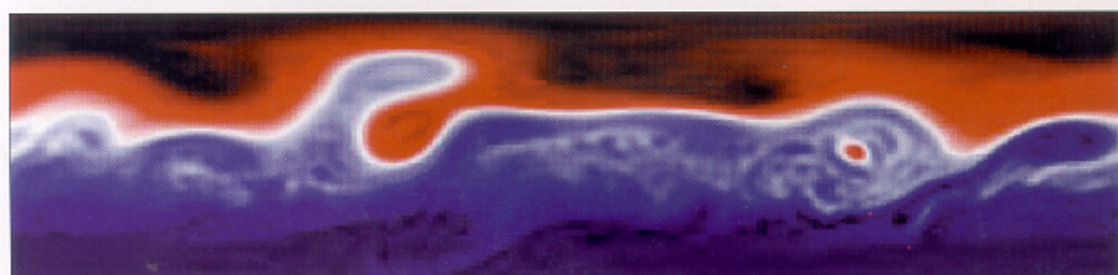


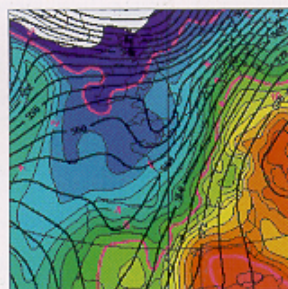
METEOROLOGICA



DE TROPOPAUZE: EEN MUUR VAN POTENTIËLE VORTICITEIT



DE HEER BIJVOET
ERELID NVBM



ANALYSE VAN
14 MEI 06 UTC



VIJF JAAR
METEOROLOGICA

OVER DAKEN EN MUREN IN DE ATMOSFEER

De Tropopauze

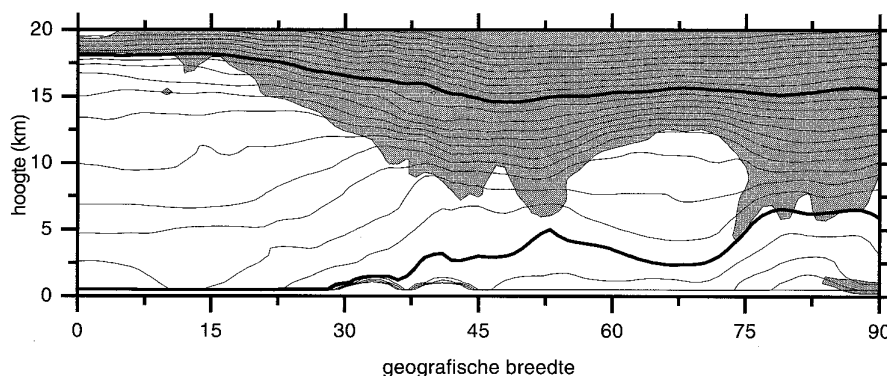
MAARTEN AMBAUM (KNMI)

De tropopauze is de grens tussen de troposfeer en de stratosfeer. In de troposfeer neemt de temperatuur af met de hoogte, in de stratosfeer blijft zij constant of neemt weer toe met de hoogte. De chemische samenstellingen van troposfeer en stratosfeer zijn echter ook verschillend; de tropopauze markeert dus ook een chemische overgang. Het lijkt onwaarschijnlijk dat de thermodynamische en chemische eigenschappen van de tropopauze onafhankelijk van elkaar zijn. In dit artikel zal ik aantonen dat deze eigenschappen inderdaad niet onafhankelijk zijn, maar kunnen worden verbonden door middel van de begrippen potentiële temperatuur en potentiële vorticeit.

DRIE WERELDEN

Hoewel de grootschalige circulatie van de atmosfeer bijzonder complex is, weten we dat deze volstrekt niet willekeurig is: zij moet voldoen aan de natuurkundige bewegingswetten. Deze zijn gebaseerd op de behoudswetten voor energie, massa en impuls, en leggen grote restricties op aan de mogelijke bewegingen van lucht-massa's. Zo leidt de wet van behoud van energie tot de regel dat de potentiële temperatuur (zie kader op bladzijde 9) van een luchtmassa alleen maar kan veranderen door toe- of afvoer van warmte. Als deze toe- of afvoer afwezig is, blijft de potentiële temperatuur van een luchtmassa constant.

Dit heeft belangrijke gevolgen voor de bewegingen in de atmosfeer. Als er geen warmtebronnen of -putten zijn, dan moeten luchtmassa's dus bewegen over isovlakken van potentiële temperatuur, zogenaamde isentrope vlakken of isentropen. Luchtmassa's kunnen alleen door deze vlakken heen bewegen als ze worden opgewarmd (bijvoorbeeld door condensatie van vocht) of afgekoeld (bijvoorbeeld door uitstraling). Zo kan men de atmosfeer opgedeeld denken in oppervlakken van constante potentiële temperatuur, die als een stapel pannenkoeken op elkaar liggen. De hogere van die oppervlakken omspannen de gehele aarde, terwijl de lagere het aardoppervlak snijden. Dit is te zien in figuur 1, waarin een doorsnede van de atmosfeer in de noord-zuid richting is afgebeeld. De isolijnen lopen min of meer horizontaal. De lucht blijft, als stroop op de pannenkoeken, netjes op zijn eigen isentroop. Al in 1930 benadrukte Shaw het belang van de opdeling van de atmosfeer in isentropen. Zo voerde hij de begrippen



Figuur 1. Potentiële temperatuur uitgezet tegen de hoogte langs de Greenwich meridiaan (tijdstip: 00 UTC 15 februari 1994). De isolijnen van potentiële temperatuur zijn iedere 10 K getekend. De stratosfeer is herkenbaar als het gebied waar de isolijnen dicht bij elkaar liggen. De vetgedrukte isolijnen zijn de grenzen tussen onder-, midden- en overwereld, zoals gedefinieerd door Hoskins. Het gearceerde gebied stelt het gebied voor waarin de potentiële vorticeit groter is dan 2 PVU. (Zie kader op bladzijde 9)

onderwereld en overwereld in. De onderwereld correspondeert met isentropen die het aardoppervlak snijden, de overwereld met isentropen die de aarde omspannen. Hij schrijft (Shaw 1930, p. 316): "..., no air can pass the barrier, from the under-world to the overworld, without the passport, label or ticket of a supply of heat, and the ticket has to be given up by the air at the barrier in order to secure return to the underworld." Dat "kaartje" is natuurlijk ook nodig voor bewegingen in de onderwereld en overwereld zelf van de ene naar de andere isentroop. De enige bewegingen waar luchtmassa's geen "kaartje" voor nodig hebben zijn bewegingen op de isentroop zelf. De potentiële temperatuur neemt vrijwel altijd toe met de hoogte (mogelijke uitzonderingen hierop zijn de planetaire grenslaag en convectieve gebieden). Boven een zekere hoogte is deze toename echter veel groter dan daaronder. Deze hoogte

markeert de tropopauze, de grens tussen de troposfeer, de luchtlag waarin wij leven, en de stratosfeer. Dit is goed te zien in figuur 1: boven de tropopauze liggen de isentropen dicht op elkaar dan daaronder. De tropopauze is zo'n opvallend kenmerk van de potentiële temperatuursopbouw van de atmosfeer, dat deze door Hoskins (1991) een speciale rol kreeg toebedeeld in een nieuwe opdeling van de atmosfeer.

Deze nieuwe opdeling voerde Hoskins in 1991 in en werd geïnspireerd op die van Shaw. Hij definieert een middenwereld die bestaat uit isentropen die de tropopauze doorsnijden. De overwereld en de onderwereld noemt hij de isentropen die daarboven, respectievelijk daaronder liggen. In figuur 1 staan de grenzen tussen onder-, midden- en overwereld ingetekend. Hoewel Shaw en Hoskins de onderwereld anders definiëren, blijkt er in de praktijk vaak weinig verschil te zijn. Maar

waarom legde Hoskins zo'n nadruk op de tropopauze bij de opdeling van de atmosfeer?

DE DRIE GEZICHTEN VAN DE TROPOPAUZE

Naar boven gaand door de atmosfeer, neemt de temperatuur af met ongeveer zes graden Celsius per kilometer. Boven een zekere hoogte blijft de temperatuur echter constant, of neemt zelfs weer iets toe (zie figuur 2). Deze overgang definieert traditioneel de positie van de tropopauze. De overgang in temperatuursverloop valt samen met de overgang in de potentiële temperatuur, zoals we die al in de vorige paragraaf hadden gezien. Het (potentiële) temperatuursverloop met de hoogte is echter niet het enige waarin troposfeer en stratosfeer verschillen. Het vochtgehalte neemt boven de tropopauze enorm af, en het ozon-gehalte neemt sterk toe (zie figuur 2). Daarnaast is een relatief lage of hoge tropopauze een kenmerk van een lage-, respectievelijk hogedrukgebied. Zo blijkt de tropopauze niet alleen een thermodynamisch, maar ook een chemisch en een dynamisch gezicht te hebben.

Aanvankelijk lijken deze drie gezichten van de tropopauze weinig met elkaar te maken te hebben. Waarom zou een overgang in verticale temperatuursopbouw samenvallen met een overgang in

chemische compositie? Toch kunnen we deze verschillende aspecten onder één noemer brengen en inzien dat de genoemde eigenschappen van de tropopauze hun oorsprong vinden in een gemeenschappelijk mechanisme.

Dit mechanisme kunnen we het beste begrijpen door het begrip potentiële vorticeit (zie kader) in te voeren in onze beschouwing van de tropopauze.

Aangezien de potentiële vorticeit evenredig is met de toename van potentiële temperatuur met de hoogte, zal zij in de stratosfeer hoger zijn dan in de troposfeer. Hierdoor kunnen we de traditionele definitie van de tropopauze in termen van een overgang in verticaal temperatuursverloop vervangen door een alternatieve definitie waarin de tropopauze samenvalt met een isovlak van potentiële vorticeit.

Dat de twee definities praktisch overeenstemmen is goed te zien in figuur 1. De stratosfeer is hier herkenbaar als het gebied waarin de isolijnen van potentiële temperatuur dichter bij elkaar liggen. Het grijs gekleurde gebied is het gebied waarin de potentiële vorticeit een waarde hoger dan 2 PVU heeft (voor PVU eenheden, zie kader). Het is duidelijk te zien dat dit gebied samenvalt met de stratosfeer. De tropopauze kan nu worden gedefinieerd als het vlak waar de potentiële vorticeit de waarde van 2 PVU heeft.

Het wordt nu duidelijk waarom Hoskins

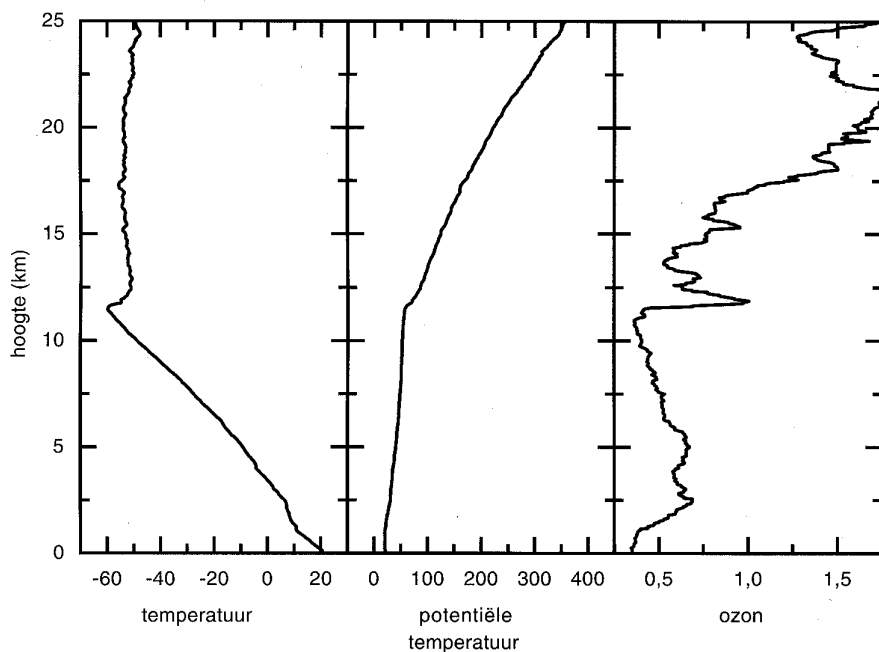
in zijn opdeling van de atmosfeer zo'n nadruk legt op de tropopauze. De potentiële vorticeit van een luchtmassa kan alleen maar veranderen door diabatische effecten en wrijving. Om van het ene iso-vlak van potentiële vorticeit naar het andere iso-vlak te gaan heeft een luchtmassa dus ook een "kaartje" nodig. De tropopauze is zo'n iso-vlak van potentiële vorticeit: een luchtmassa zonder "kaartje" kan nooit de tropopauze oversteken.

Vanuit dit standpunt bezien worden de bewegingen van luchtmassa's nogal beperkt: de lucht moet met behoud van potentiële vorticeit bewegen over de bijna-horizontale isentropen. Dit levert het meest interessante plaatje op in de middenwereld. In de onderwereld is de potentiële vorticeit namelijk constant laag. Bewegingen van luchtmassa's zullen dus nauwelijks veranderingen in de potentiële-vorticeitsstructuur teweegbrengen. Het is alsof je witte verf mengt met witte verf. In de overwereld geldt iets dergelijks. De potentiële vorticeit is hier altijd hoog, zodat ook hier bewegingen van luchtmassa's weinig teweegbrengen in de potentiële-vorticeitsstructuur; alsof je rode verf met rode verf mengt. In de middenwereld wordt het pas echt leuk: de rode verf van de stratosfeer ontmoet hier de witte verf van de troposfeer. Het grensvlak is de tropopauze.

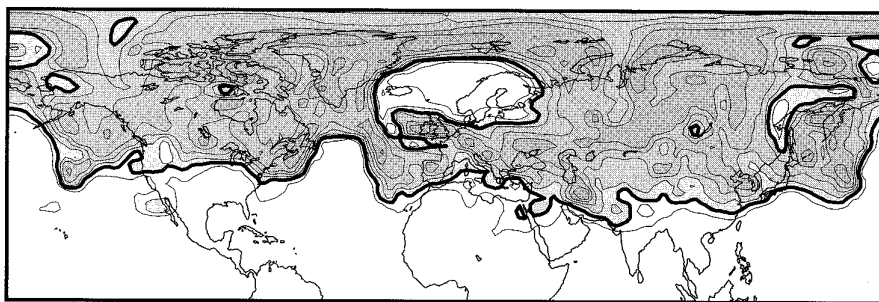
In figuur 3 is de potentiële vorticeit op een isentroop uit de middenwereld afgebeeld. De potentiële vorticeit op deze isentroop wordt gekenmerkt door een scherpe overgang van lage troposferische waarden naar hoge stratosferische waarden. De rode verf uit de vorige alinea is in dit plaatje grijze verf geworden, maar dat is natuurlijk geen principieel verschil ... Vanuit het standpunt van de middenwereld gezien moet men de tropopauze niet zozeer beschouwen als het dak van de tropopauze, maar als een potentiële-vorticeitsmuur op een isentroop vlak (McIntyre en Palmer, 1984.)

TROPOPAUZE DYNAMICA

Op het eerste gezicht lijkt de potentiële-vorticeitsdefinitie van de tropopauze lood om oud ijzer. Dat dit zeker niet het geval is volgt uit het zogenaamde inverteerbaarheidsprincipe (Hoskins et al. 1985, Verkleij 1995). Dit principe zegt dat alle meteorologische velden volgen uit de verdeling van potentiële vorticeit. Dit is een enorm krachtig principe, dat tot gevolg heeft dat we ons in de beschouwing van de atmosfeer kunnen beperken tot het beschrijven van één enkele



Figuur 2. Temperatuur, potentiële temperatuur (beiden in graden Celsius), en ozongehalte (in willekeurige eenheden) uitgezet tegen de hoogte. De meetgegevens komen van een radiosonde opslating op het KNMI, de Bilt, op 22 augustus 1996. De tropopauze is herkenbaar aan de scherpe overgang in verticaal (potentiële-) temperatuursverloop en in ozongehalte. (Gegevens beschikbaar gesteld door Richard Rothe, KNMI.)



Figuur 3. Potentiële vorticeit voor het noordelijk halfrond op de 320 K middenwereld isentroop (tijdstip: 00 UTC 15 februari 1994). De isolijnen van potentiële vorticeit zijn iedere 1 PVU getekend. De gebieden waar de isentroop in de stratosfeer ligt, zijn herkenbaar aan de hoge waarden van potentiële vorticeit. De tropopauze is herkenbaar als de scherpe overgang in potentiële vorticeit. De 2 PVU isolijn is vetgedrukt. (Gegevens samengesteld uit analyse data van het Europees Centrum voor Weersvoorspellingen op de Middellange Termijn (ECMWF), door Peter van Velthoven, KNMI.)

grootheid, namelijk de potentiële vorticeit.¹ Aangezien de alternatief gedefinieerde tropopauze voor een groot deel de verdeling van de potentiële vorticeit in de atmosfeer bepaalt, bepaalt zij voor een belangrijk deel alle andere meteorologische velden.

Zo verandert, bijvoorbeeld, een deuk in de tropopauze de verdeling van potentiële vorticeit zodanig dat er een cyclonaal snelheidsveld om deze deuk ontstaat. In een dergelijke deuk bevindt zich namelijk stratosferische lucht met hoge potentiële vorticeit. Voor een meer uitgebreide behandeling van dit voorbeeld wordt verwezen naar het artikel van Verkleij.

Kleinschmidt (1950) noemde dergelijke luchtmassa's met hoge potentiële vorticeit "cyclonale lichamen." Een cyclonaal lichaam, samenhangend met een deuk in de tropopauze, is een kenmerk van ieder lagedrukgebied. Dit voorbeeld maakt duidelijk waarom de tropopauze, gedefinieerd in termen van potentiële vorticeit, ook wel de "dynamische tropopauze" wordt genoemd.

In de vorige paragraaf bleek dat de tropopauze niet zozeer als het dak van de troposfeer dient te worden beschouwd, maar meer als een muur op een isentroop vlak. Dit inspireert ons om de dynamica van de tropopauze als volgt te beschrijven: de variaties in de hoogte van de tropopauze worden beschreven als horizontale bewegingen van de potentiële vorticeitsmuur over een middenwereld isentroop. Als we aan de stratosferische kant van de muur zitten, dan ligt de tropopauze laag, als we aan de troposferische kant zitten, dan ligt de tropopauze hoog.

De bewegingen van de tropopauze worden nu beschreven door horizontaal transport van potentiële vorticeit. Om dit transport uit te kunnen voeren hebben we het horizontale windveld nodig. Maar uit het inverteerbaarheidsprincipe volgt dat dit windveld bekend is als het potentiële vorticeitsveld bekend is. Zo verkrijgen we een gesloten systeem voor de beschrijving van variaties in tropopauzehoogte. Een goed voorbeeld van het op een dergelijke wijze kijken naar variaties in de tropopauze-hoogte is te zien in figuur 3. Ten noordwesten van Scandinavië bevindt deze middenwereld isentroop zich in de troposfeer; de potentiële vorticeit heeft hier namelijk troposferische waarden. Nu is figuur 1 een doorsnede langs de Greenwich meridiaan op hetzelfde tijdstip. Men kan in figuur 1 inderdaad goed zien dat rond de breedtegraden van Noord-Scandinavië de tropopauze hoog ligt. De terminologie van Kleinschmidt indachtig, zouden we dit een negatief cyclonaal lichaam kunnen noemen. Geheel volgens verwachting draait de lucht rond een dergelijk negatief cyclonaal lichaam anti-cyclonaal; we hebben te maken met een hogedrukgebied. Dit hogedrukgebied vormde een blokkade die in februari 1994 voor koud en bestendig weer zorgde tijdens de Olympische Spelen in Lillehammer.

Een belangrijke stap die we nu hebben genomen in de beschrijving van de tropopauze is dat we de dynamica van de middenwereld beschouwen als een horizontaal systeem. De computermodellen die we gebruiken om zo het gedrag van de tropopauze te simuleren zijn in feite dezelfde als de eerste weersvoorspelmodellen, die gebaseerd waren op de (equivalent) barotrope vorticeitsvergelijking (Wiin-Nielsen 1991). De straalstroom zoals die in deze weers-

voorspelmodellen voorkwam hangt in onze interpretatie samen met de tropopauze in de middenwereld. Deze samenhang is ook aanwezig in de echte atmosfeer: de straalstroom bevindt zich op die plek waar de hoogte van de tropopauze sterk afneemt, dus waar in de middenwereld de muur van potentiële vorticeit te vinden is.

DE TROPOPAUIZE VERKLAARD?

We hebben duidelijk gemaakt dat de bewegingen van de tropopauze in de middenwereld kunnen worden beschouwd als horizontaal transport van potentiële vorticeit over isentropen. Levert dit nieuwe beeld nu ook nieuwe inzichten op? We zullen deze vraag behandelen aan de hand van de drie gezichten van de tropopauze.

Als eerste werd het thermodynamische gezicht genoemd. Dit gezicht ligt besloten in de klassieke definitie van de tropopauze in termen van een overgang in verticaal temperatuursverloop. De meest gangbare verklaring voor deze overgang wijst naar de opwarming van de atmosfeer door de zon. De troposfeer wordt van beneden af opgewarmd door een flux van latente en sensibele warmte vanaf de aardbodem. De troposfeer zelf wordt nauwelijks direct opgewarmd door de zon, hetgeen verklaart waarom in de troposfeer de temperatuur afneemt met de hoogte. In de stratosfeer, echter, bevindt zich rond de dertig kilometer hoogte een tweede warmtebron, namelijk de ozonlaag (zie figuur 2). Deze laag wordt opgewarmd (en in feite ook in stand gehouden) door het absorberen van UV-straling. Hiermee kunnen we begrijpen waarom op grotere hoogte de temperatuur niet meer afneemt met de hoogte en zelfs weer iets gaat toenemen.

Dit temperatuursverloop is te herkennen in figuur 2. Wat we echter volledig missen in deze verklaring is waarom de overgang in temperatuursverloop zo scherp is; uit stralings-convectief evenwicht alleen zou een glad verloop van de temperatuur volgen. Een veelgehoorde verklaring hiervoor is dat deze scherpe overgang de grens zou markeren van het convectief actieve gebied. Dit kan natuurlijk nooit geldig zijn voor de gematigde breedten, waar de convectieve activiteit zich voornamelijk beperkt tot de planetaire grenslaag (in de tropen zou dit overigens wel geldig kunnen zijn; de tropopauze heeft hier echter een geheel ander karakter). We hebben blijkbaar meer nodig dan straling en convectie alleen om de

¹ Aan dit principe zijn wel enige voorwaarden verbonden, waardoor het met name geldig is voor grootschalige systemen op gematigde en hogere breedten.

structuur van de tropopauze te begrijpen. Het tweede gezicht van de tropopauze was het chemische gezicht. We kunnen hier een redenering houden analoog aan die voor het thermodynamische gezicht: We kunnen redelijk begrijpen waarom bepaalde chemicaliën andere concentraties zullen hebben in de stratosfeer dan in de troposfeer. Denk aan ozon, dat voorname wordt geproduceerd door fotodissociatie hoog boven de tropen. Wat we zo echter niet kunnen begrijpen is waarom het contrast in de concentraties van deze componenten zo scherp is over de tropopauze. Ook hier hebben we blijkbaar meer nodig om de structuur van de tropopauze te begrijpen.

Het derde gezicht van de tropopauze is het dynamische gezicht. Dit wordt bepaald door de definitie van de tropopauze in termen van potentiële vorticeit. Het inverteerbaarheidsprincipe speelt hier de centrale rol. Maar ook hier kunnen we de vraag stellen waarom de overgang van potentiële vorticeit zo scherp is als blijkt uit figuur 3. Gelukkig kunnen we dit wel begrijpen!

De scherpe overgang vindt zijn oorsprong in het proces van "vortex erosie." Hierbij is essentieel dat potentiële vorticeit van luchtmassa's vrijwel niet verandert en dat het windveld langs middenwereld isentropen vrijwel niet-divergent is. Dit heeft tot gevolg dat de oppervlakte binnen isolijnen van potentiële vorticeit behouden is. Op de rand van de polaire wervel, rond de tropopauze, ontwikkelen zich horizontaal bewegende golven, die in een later stadium meestal zullen breken. Een dergelijke brekende golf stelt een depressie voor of een grootschaliger systeem, zoals een afgesnoerd laag of een blokkerend hoog. Brekende golven op de rand van de polaire wervel zullen nu oppervlakte wegsnoepen van deze rand. Dit proces is geïllustreerd in figuur 4. Met dit afsnoepen van oppervlak van de rand van de wervel moeten de isolijnen van potentiële vorticeit aan deze rand dichter bij elkaar komen. En zie daar: de overgang tussen lage en hoge potentiële vorticeit is scherper geworden. Een voorbeeld van een computersimulatie van dit proces is te zien in figuur 5. De tropopauze in de middenwereld wordt opgescherpt door de eroderende werking van storingen op de rand van de polaire wervel (Ambaum 1997).

Nu kunnen we ook begrijpen waarom het contrast in concentraties van chemische componenten zo groot kan zijn over de tropopauze. De chemische samenstelling van een luchtmassa verandert namelijk

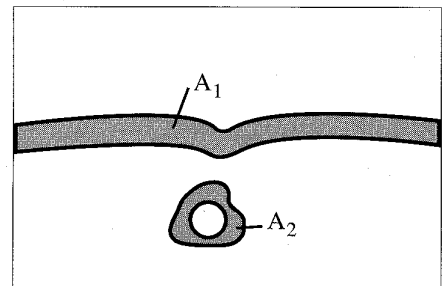
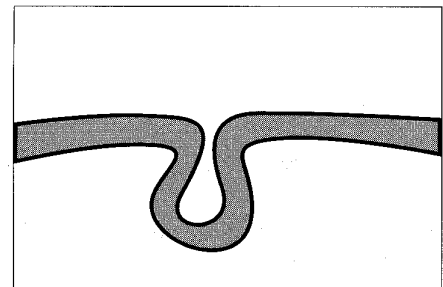
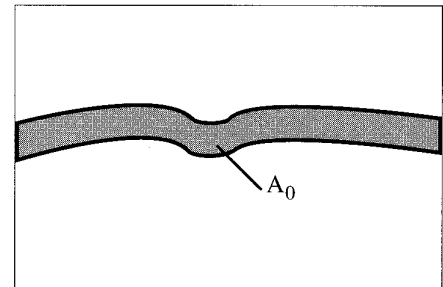
meestal niet zo snel. Dezelfde redenering die geldt voor isolijnen van potentiële vorticeit op een middenwereld isentroop, geldt ook voor isolijnen van chemische concentraties (zogenaamde isoplethen). Ook hier zorgt de eroderende werking van storingen op de rand van de polaire wervel voor een verscherping van het chemische contrast over de tropopauze. Tevens kunnen we begrijpen waarom het verticale temperatuursverloop zo scherp verandert over de tropopauze. De potentiële vorticeit is namelijk evenredig met het verticale verloop van de potentiële temperatuur. Als de potentiële vorticeit scherp verandert over de tropopauze, zal ook het verticale temperatuursverloop over de tropopauze scherp moeten veranderen.²

TENSLOTTE: DE ONDERWERELDEN

Tot besluit zullen we de onderwereld beschouwen. Shaw definieerde deze als de verzameling isentropen die het aardoppervlak snijden. Hoskins, echter, definieerde deze als de verzameling isentropen die onder de tropopauze liggen. In de praktijk blijkt dat deze twee onderwerelden vrijwel samen vallen. Figuur 1 is een voorbeeld waar deze twee overigens iets minder goed samenvallen: er zijn hier een aantal isentropen die volgens Shaw bij de onderwereld horen, maar die volgens Hoskins bij de middenwereld horen. Afgezien daarvan, is het verschil tussen de twee onderwerelden niet erg groot. Kunnen we dit begrijpen? We hadden inmiddels gezien dat de variaties in de tropopauze-hoogte kunnen worden begrepen door horizontaal transport van potentiële vorticeit over isentropen te beschouwen. Voor de onderwereld van Shaw moeten we dan wel isentropen beschouwen met laterale grenzen: langs een zekere lijn duikt de isentroop namelijk de aarde in. Dit beeld moeten we echter iets nuanceren: in feite duikt een dergelijke isentroop niet zozeer in de aarde maar in de planetaire grenslaag. Dit heeft belangrijke consequenties voor de potentiële vorticeit op een dergelijke isentroop.

De potentiële temperatuur van de planetaire grenslaag is vrijwel constant met de

hoogte. Dit is het gevolg van het feit dat de grenslaag marginaal stabiel is. Aangezien de potentiële vorticeit evenredig is met het verticale verloop van de potentiële temperatuur, zal de potentiële vorticeit in de planetaire grenslaag erg laag zijn. Een isentroop die in contact staat met de grenslaag zal dus, door turbulente uitwisseling met de grenslaag, lucht met zeer lage potentiële vorticeit oppikken. Dergelijke turbulente uit-



$$A_0 = A_1 + A_2 \Rightarrow A_1 < A_0$$

Figuur 4. Schets van het proces van "vortex erosie." Afgebeeld is het noordelijk halfrond van een middenwereld isentroop. Er zijn twee isolijnen van potentiële vorticeit getekend die aan de rand van de polaire wervel, rond de tropopauze, liggen. De oppervlakte tussen deze isolijnen is behouden. Door een brekende golf op de rand wordt oppervlakte weggetransporteerd. De overgebleven oppervlakte tussen de isolijnen op de rand neemt hierdoor af, waardoor deze isolijnen dichter bij elkaar komen te liggen. Voor de duidelijkheid is de verstoring op de polaire wervel veel groter getekend dan het werkelijke formaat.

² Strikt genomen kan een verandering van de potentiële vorticeit ook worden bewerkstelligd door een verandering in vorticeit. Het blijkt echter dat veranderingen in potentiële vorticeit zich normaliter in vrijwel gelijke delen verdelen over veranderingen in de vorticeit en veranderingen in de verticale gradiënt van potentiële temperatuur.

wisselingsprocessen worden bijvoorbeeld gedreven door het dag-nacht ritme van de planetaire grenslaag, waarbij deze sterk in dikte varieert. Doordat een isentroop, die in contact staat met de planetaire grenslaag, voortdurend lucht van lage potentiële vorticeit krijgt toegevoerd, is het goed voor te stellen dat de potentiële vorticeit op een dergelijke isentroop nooit erg hoog kan worden. Maar dit betekent weer dat op een dergelijke isentroop nooit stratosferische waarden van de potentiële vorticeit kunnen worden bereikt. Met andere woorden: een isentroop die ergens de planetaire grenslaag raakt zal vrijwel nooit ergens de stratos-

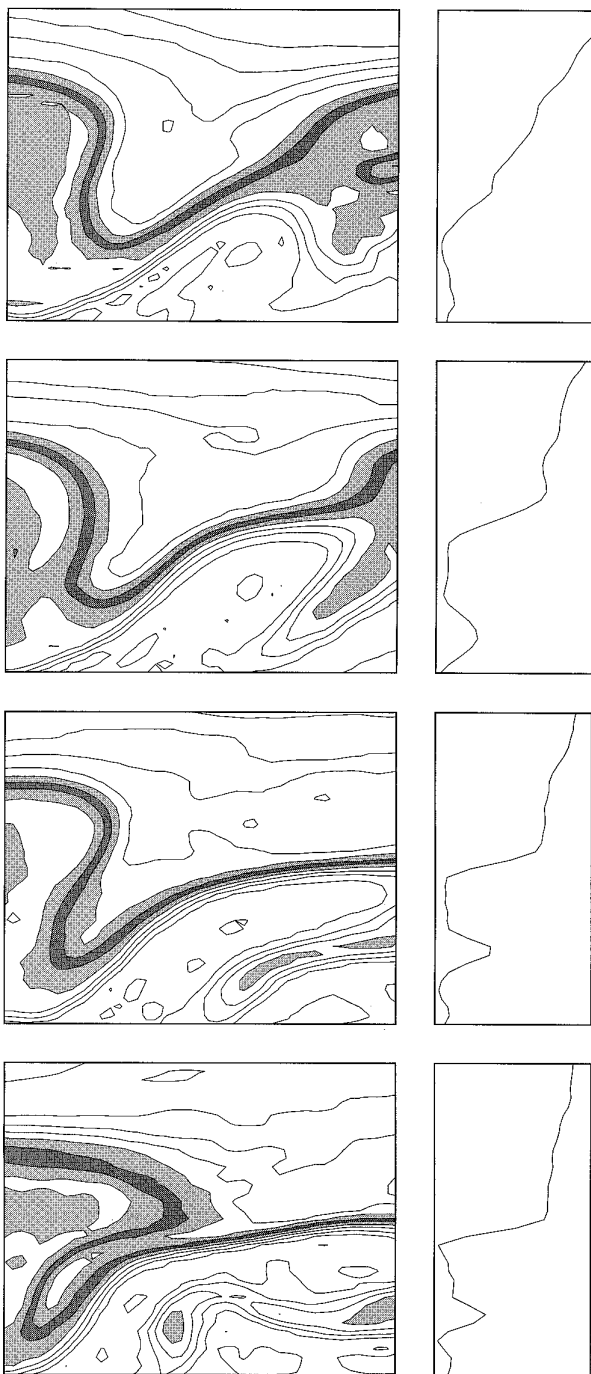
feer kunnen raken.

Op deze plek komen de onderwerelden van Shaw en Hoskins bij elkaar: een isentroop die volgens Shaw in de onderwereld ligt, die dus het aardoppervlak snijdt, zal niet snel ook de stratosfeer raken. Maar dit betekent dat een dergelijke isentroop meestal onder de tropopauze moet liggen. Hiermee behoort een dergelijke isentroop dus ook tot de onderwereld van Hoskins.

Literatuur

1. Ambaum, M. H. P., 1997: Isentropic formation of the tropopause. *J. Atmos. Sci.*, 54, 555-568.
2. Ertel, H., 1942: Ein neuer hydrodynamischer Wirbelsatz. *Meteor. Zeitschrift*, 59, 277-281.

3. Hoskins, B. J., M. E. McIntyre, and A. W. Robertson, 1985: On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 111, 877-946.
4. Hoskins, B. J., 1991: Towards a PV-(View of the general circulation. *Tellus*, 43AB, 27-35.
5. Kleinschmidt, E., 1950: Über Aufbau und Entstehung von Zyklonen. I. Teil. *Meteor. Rundschau*, 3, 1-7.
6. McIntyre, M. E., and T. N. Palmer, 1984: The 'surf zone' in the stratosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 46, 825-849.
7. Shaw, Sir Napier, 1930: *Manual of meteorology*. Vol. III: The physical processes of weather. Cambridge University Press.
8. Verkley, W. T. M., 1995: Potentiële vorticeit. Een scherpere kijk op de atmosfeer. *Meteorologica*, 3, 4-11.
9. Wiin-Nielsen, A., 1991: The birth of numerical weather prediction. *Tellus*, 43AB, 36-52.



POTENTIELE TEMPERATUUR EN POTENTIELE VORTICEIT

De potentiële temperatuur is de temperatuur die een luchtmassa zou hebben als die zonder warmte toe- of afvoer (stop de lucht maar in een thermosfles) wordt gebracht tot een zekere standaarddruk (meestal wordt hiervoor 1000 hPa gekozen). Dus vlakbij het aardoppervlak is de potentiële temperatuur vrijwel gelijk aan de gewone temperatuur. De potentiële temperatuur van een luchtmassa kan alleen maar veranderen als er warmte wordt toe- of afgevoerd (zogenaamde diabatische effecten), verder zal ze constant blijven. De logarithme van de potentiële temperatuur is evenredig met de specifieke entropie. Daarom worden vlakken van constante potentiële temperatuur isentrope vlakken of isentropen genoemd.

De potentiële vorticeit is de vorticeit (informeel: hoeveelheid draaiing) die een luchtmassa zou hebben als deze tot een standaard verticaal profiel van temperatuur wordt gebracht. Het blijkt dat potentiële vorticeit evenredig is met de toename van potentiële temperatuur met de hoogte. De potentiële vorticeit van een luchtmassa kan alleen maar veranderen door diabatische effecten en door effecten van wrijving. De potentiële vorticeit werd in zijn algemene vorm voor het eerst beschreven door Ertel (1942). Vlakken van constante potentiële vorticeit worden daarom ook wel isertellen genoemd, maar deze terminologie is niet erg gangbaar. Potentiële vorticeit wordt uitgedrukt in PV-units (PVU, 1PVU is gelijk aan $10^{-6} \text{ Km}^2 \text{ s}^{-1} \text{ kg}^{-1}$).

Meer formele definities en een overzicht van de rol van deze grootheden in de atmosfeer zijn te vinden in het artikel van Verkley in het herfstnummer 1995 van dit blad.

Figuur 5. Voorbeeld van een erosie gebeurtenis tijdens een computersimulatie van de middenwereld. Het computermodel beschrijft de equivalent barotrope vorticeitsvergelijking in één laag. De isolijnen van potentiële vorticeit zijn iedere 0.25 PVU getekend. Het gearceerde gebied kan worden geassocieerd met de tropopauze. Tijdens het golfbrekingsverschijnsel wordt de gradiënt van potentiële vorticeit steeds groter, zoals zichtbaar in de grafieken aan de rechterzijde, waar meridionale doorsneden van de potentiële vorticeit staan afgebeeld