

De globetrot van Buys en Ballot

2005 was het Internationale Jaar van de Natuurkunde, waarin werd herdacht dat Albert Einstein honderd jaar geleden maar liefst vijf baanbrekende artikelen publiceerde. Wereldwijd zijn er vele activiteiten georganiseerd op Einstein's vakgebied: de natuurkunde. Ook het KNMI deed hieraan mee met het op reis sturen van twee virtuele luchtdeeltjes: Buys en Ballot.

Peter Siegmund en Rinus Scheele, KNMI

De twee luchtdeeltjes zijn vernoemd naar Buys Ballot (1817- 1890), die in 1854 het KNMI oprichtte. In het radioprogramma VARA's Vroege Vogels werd op zondag 2 januari 2005 het startsein gegeven voor de één jaar durende reis van de virtuele deeltjes Buys en Ballot. Als symbool hiervoor werden 2 luchtballonnen losgelaten door Monique Somers.

Buys werd op 2 kilometer hoogte losgelaten en Ballot op 5 kilometer. De luchtdeeltjes Buys en Ballot bestaan niet echt, ze bestaan alleen in het zogeheten trajectoriemodel – en zijn dus virtueel. De banen van Buys en Ballot door de wereldwijde atmosfeer werden door het KNMI aan de hand van dit model berekend. Het resultaat van deze berekeningen geeft aan waar de lucht in de echte atmosfeer naar toe gaat.

Het trajectoriemodel berekent de banen van luchtdeeltjes, ook wel trajectoriën genoemd, gebruik makend van wereldwijde gegevens van de windsnelheid. De berekening is in principe eenvoudig. Een deeltje wordt losgelaten op een willekeurig te kiezen plaats en tijd in de atmosfeer. Noem dit punt A. Daarna beweegt het deeltje een korte tijd, in dit geval een uur, met een snelheid gelijk aan de windsnelheid in punt A. Zowel de horizontale als de verticale windsnelheid zijn hier van belang. Na een uur is het deeltje aangekomen in punt B. Vervolgens beweegt het deeltje een uur met een snelheid gelijk aan de windsnelheid in punt B, enzovoorts. Zo kan het luchtdeeltje worden gevolgd zolang men wil, mits men de windsnelheid kent op de plaatsen en tijden waar het deeltje langskomt.

Het model kan niet alleen berekenen waar de lucht naar toe gaat, maar ook waar deze vandaan komt. Dit is handig als het gaat om de interpretatie van metingen van de atmosfeersamenstelling: het vertelt je de bron van de - soms vervuilde - lucht die is gemeten. Berekeningen van waar de lucht naar toe gaat, worden gemaakt om luchtverontreiniging te volgen. Of waar Saharazand heen gaat dat door de wind soms in de atmosfeer wordt geblazen. Of de as van vulkaanuitbarstingen, een zwerm sprinkhanen, etc. Of Buys en Ballot dus.

De banen van Buys en Ballot

Hoe is het Buys en Ballot vergaan? Hun banen door de atmosfeer zijn te zien in de figuur. De kleur van de lijnen geeft de hoogte aan waarop de deeltjes zich bevonden. Zoals gezegd beginnen de banen op hetzelfde moment en dezelfde locatie, maar op verschillende hoogtes. Zowel Buys als Ballot vertrekken in oostelijke richting, maar al na twee dagen is er een groot verschil in hun positie: Buys is dan boven Rusland en Ballot boven Noord-Afrika. De banen eindigen een jaar later op zondag 1 januari 2006. Buys heeft dan 363.677 kilometer afgelegd en Ballot 378.784 kilometer. Deze

en andere gegevens zijn vermeld in de tabel. De afgelegde afstanden komen neer op ongeveer acht rondjes om de aarde, gesteld dat de deeltjes voortdurend rechtdoor waren gegaan. Dat hebben ze uiteraard niet gedaan. In werkelijkheid zijn ze, via allerlei omwegen, maar vijf keer echt de aarde omgegaan.

Van het ene naar het andere halfrond

Uit de figuur blijkt dat Buys naar het Zuidelijk halfrond is overgestoken. Dat minstens een van de twee deeltjes zou oversteken viel te verwachten, op basis van wat bekend is over de uitwisseling van lucht tussen de twee halfronden. De hoeveelheid lucht die jaarlijks wordt uitgewisseld hangt onder meer af van het verschil in de concentratie van kooldioxide tussen de twee halfronden. Op beide halfronden stijgt de concentratie. Echter, op het Noordelijk halfrond, waar de meeste fossiele brandstoffen worden verbruikt en dus de meeste kooldioxide wordt uitgestoten, is de concentratie hoger dan op het zuidelijk halfrond. De concentratie op het zuidelijk halfrond is gelijk aan die op het noordelijk halfrond ongeveer anderhalf jaar terug. Hieruit volgt dat jaarlijks ongeveer $2/3$ (één gedeeld door anderhalf) deel van de lucht van het ene naar het andere halfrond stroomt.

In de onderste laag van de atmosfeer, de troposfeer, neemt de temperatuur af met de hoogte. Direct boven de troposfeer ligt de stratosfeer, waarin de temperatuur met de hoogte toeneemt. De grens tussen de troposfeer en de stratosfeer, ook wel de tropopauze genoemd, ligt in de tropen op ongeveer 16 km en buiten de tropen op ongeveer 10 km hoogte. Het transport van lucht van de troposfeer naar de stratosfeer gebeurt alleen in de tropen. In de stratosfeer stroomt de lucht in de richting van de polen, om vervolgens op hogere geografische breedtes weer naar de troposfeer te gaan. Buys en Ballot zijn echter niet naar de stratosfeer gegaan. Zoals blijkt uit de tabel waren hun maximale hoogtes respectievelijk 14,9 en 13,0 km en deze traden beide op toen ze in de tropen waren. In de tropen zijn deze hoogten beneden het niveau van de tropopauze, zodat de luchtdeeltjes de stratosfeer niet hebben bereikt. Dat viel ook te verwachten, want jaarlijks gaat maar ongeveer tien procent van de lucht van de troposfeer naar de stratosfeer.

Het feit dat jaarlijks maar een klein deel van de lucht van de troposfeer naar de stratosfeer gaat, is de reden dat het nog zo lang duurt voordat de ozonlaag in de stratosfeer zal zijn hersteld. Een deel van de ozonlaag is afgebroken door CFK's afkomstig uit spuitbussen en koelkasten. In de stratosfeer worden de CFK's door de intense ultraviolette straling ontleed en het chloor dat hierbij vrijkomt breekt de ozon af. CFK's werden vooral toegepast in de jaren zeventig en tachtig van de vorige eeuw. Daarna zijn ze vervangen door minder schadelijke alternatieven. Echter, omdat jaarlijks maar zo weinig lucht, en dus ook CFK's, naar de stratosfeer stroomt, duurt het nog enkele tientallen jaren voordat de CFK's uit de atmosfeer zijn verdwenen en de ozonlaag zal zijn hersteld.

De hoogste snelheid, 249 km/uur, werd gehaald door Buys op ruim 12 km hoogte boven Shanghai op 12 april. Buys bevond zich toen in de subtropische straalstroom, een gordel van sterke westenwinden op grote hoogte op de grens van de tropen en de subtropen. Om brandstof en tijd te besparen, proberen vliegtuigen die naar het oosten gaan met de straalstroom mee te vliegen, terwijl vliegtuigen die naar het westen gaan de straalstroom juist proberen te vermijden. Gemiddeld over het jaar hadden de deeltjes een snelheid van ongeveer 42 km/uur. Hieruit kan worden berekend dat de

bewegingsenergie van de gehele atmosfeer van de orde is van 10^{20} Joule. Dit is, toevallig, van de zelfde orde van grootte als het jaarlijkse wereldwijde energieverbruik, dat neerkomt op zo'n 60 kWh per persoon per dag.

Verrassingen

Deels ging de reis van Buys en Ballot volgens verwachting, maar er waren ook verrassingen. Dat een van de twee deeltjes naar het Zuidelijk halfrond overstak was te verwachten. Dit geldt ook voor het feit dat de deeltjes niet in de stratosfeer terecht kwamen. Verrassend was dat de lucht die van Azië oostwaarts richting Amerika gaat, dat vaak doet rondom 45 Noorderbreedte. Alsof de atmosfeer een transportbuis heeft op die breedtegraad. Dit gold vooral bij Ballot, voor Buys niet. Een jaar lang twee deeltjes volgen is echter niet genoeg voor een significant antwoord hierop.

Met zoveel gebieden met westen- en met oostenwinden had men gedacht dat de lucht meer een soort 'dronkemanswandeling' zou maken. Dus het was echt verrassend dat de luchtdeeltjes zo vaak werkelijk een rondje om de aarde maken: zo'n vijf rondjes in 365 dagen, ofwel 73 dagen per rondje. Als Phileas Fogg in Jules Verne's *Reis om de wereld in tachtig dagen* zich dus per ballon of zeppelin had verplaatst, dan hij zijn doel waarschijnlijk ook bereikt.

Buys en Ballot zetten hun virtuele reis voort in 2006, maar hun baan zal niet meer worden berekend.

Zelf trajectoriën berekenen

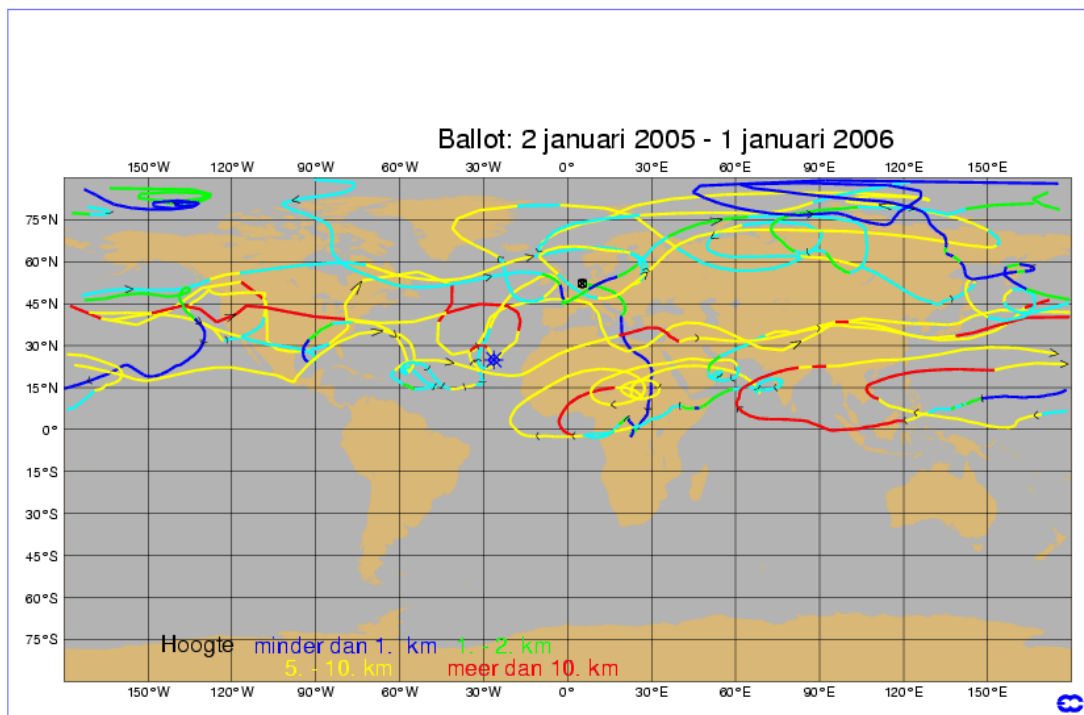
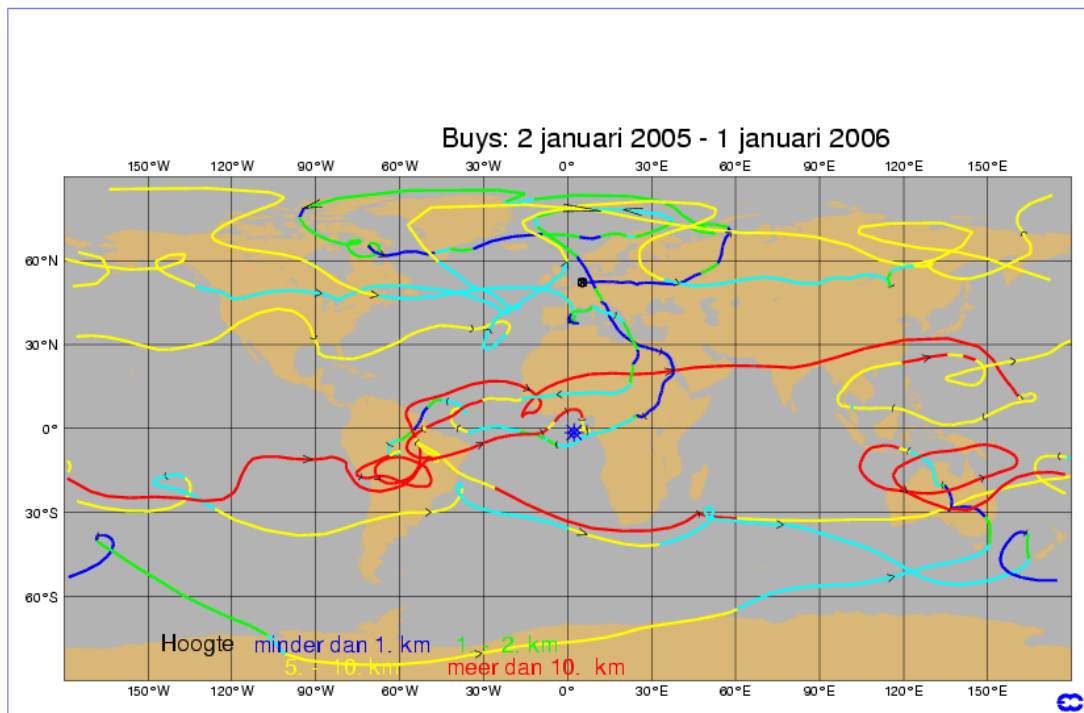
Wie de banen van luchtdeeltjes wil berekenen, kan terecht op <http://trajks.knmi.nl/trajks.html>. Deze site geeft toegang tot hetzelfde trajectoriemodel als werd toegepast voor *De globetrot van Buys en Ballot*.

De gegevens van de wind

De windgegevens waaruit de trajectoriën worden berekend zijn afkomstig van het European Centre for Medium-range Weather Forecasts - ECMWF - het Europese instituut waar de weersverwachting voor de komende tien dagen wordt gemaakt. De weersverwachting wordt berekend op een wereldwijd rooster van punten met een onderlinge afstand van ongeveer 40 km, op een groot aantal verticale niveau's lopend van het aardoppervlak tot zo'n 80 km hoogte. De windgegevens zijn beschikbaar op vier momenten per dag: 00.00 uur, 06.00 uur, 12.00 uur en 18.00 uur GMT. De windsnelheid op tijden tussen deze momenten, en tussen de roosterpunten, wordt in het trajectoriemodel berekend door interpolatie (= uit bekende waarden op bepaalde plaatsen en tijden een ongekende waarde op een plaats en tijd ertussen berekenen).

Tabel: Enkele gegevens over de luchtdeeltjes Buys en Ballot gedurende het jaar 2005.

	Buys	Ballot
Starthoogte	2 kilometer	5 kilometer
Afgelegde afstand	363.677 km	378.784 km
Snelheid, gemiddeld	41,5 km/uur	43,2 km/uur
Snelheid, maximaal	249 km/uur, boven Shanghai op 12,4 km hoogte, op 12 april	236 km/uur, boven de Grote Oceaan (179°O, 40°N) op 9,9 km hoogte, op 25 mei
Temperatuur, gemiddeld	-13,6 °C	-9,4 °C
Temperatuur, maximaal	35 °C, boven Midden Afrika op 518 m hoogte, op 11 februari	28 °C, boven Midden Afrika op 813 m hoogte, op 9 januari
Temperatuur, minimaal	-74 °C, boven de Amazone op 14,9 km, op 29 maart	-59 °C, boven de Grote Oceaan (172°E, 46° N) op 10,5 km, op 3 maart
Hoogte, gemiddeld	5,51 km	4,79 km
Hoogte, maximaal	14,9 km, boven de Amazone, op 29 maart	11,5 km, boven de Zuid Atlantische Oceaan (2°E, 2°S), op 23 januari



Figuur: De banen door de atmosfeer van de luchtdeeltjes Buys en Ballot gedurende het jaar 2005. De beweging is in de richting van de pijlen. De kleur van de lijnen geeft de hoogte van de deeltjes aan.