

De aardse atmosfeer

Robert Parson
Associate Professor
Department of Chemistry and Biochemistry
University of Colorado

Vertaling en tekstbewerking:
Gjalt T.Prins
CdB, Universiteit Utrecht

Inleiding

De ozonlaag is het gedeelte van de atmosfeer waarin zich een constante hoeveelheid ozon bevindt. De ozonlaag beschermt de aarde tegen de ultraviolette straling van de zon. De constante hoeveelheid ozon is het gevolg van een aantal reacties in de ozonlaag die gezamenlijk ervoor zorgen dat de vorming en afbraak van ozon even snel verlopen. In dit inleidende artikel staat informatie over de atmosfeer in het algemeen en de ozonlaag in het bijzonder. Na het lezen van dit artikel kun je globaal aangeven hoe de atmosfeer is opgebouwd en op welke wijze ozon wordt gevormd en afgebroken.

De opbouw van de atmosfeer

De atmosfeer is meer dan 400 km dik en is onderverdeeld in een aantal lagen, met ieder een andere functie, samenstelling en temperatuursopbouw.

Troposfeer

De troposfeer begint bij het aardoppervlak en loopt door tot ca. 15 km hoogte. Het voorvoegsel *tropo* betekent verandering: ons dagelijkse, veranderlijke weer wordt ‘gemaakt’ in de troposfeer. De troposfeer wordt van onderaf verwarmd: de temperatuur neemt dus af met toenemende hoogte. De gemiddelde temperatuur op het aardoppervlak is 288 K, op ca. 10 km hoogte is de temperatuur gemiddeld 223 K.

De samenstelling van de troposfeer is op iedere hoogte gelijk (zie ook Tabel 1: *Samenstelling van de atmosfeer*). Door convectie en turbulentie, twee zgn. ‘verticale transport mechanismen’, worden de gassen in de troposfeer constant gemengd. Convectie houdt in dat warme lucht, dicht bij het aardoppervlak, stijgt en koudere lucht, hoog in de troposfeer, daalt. Turbulentie wordt veroorzaakt door hoge- en lagedrukgebieden. Deze drukgebieden zorgen voor constante roolatie en menging van luchtlagen.

Stratosfeer

Na de troposfeer komt de stratosfeer. Stratosfeer is afgeleid van het engelse woord *stratification* (gelaagdheid). De stratosfeer begint op ca. 15 km hoogte en loopt door tot ca. 50 km boven het aardoppervlak. De stratosfeer bevat ozon. Anders dan in de troposfeer, stijgt de temperatuur in de stratosfeer met toenemende hoogte. De temperatuur loopt op van 210 K op ca. 15 km hoogte tot 280 K op ca. 50 km hoogte. Dit komt door absorptie van zonne-energie (UV licht) door zuurstof en ozon. Door deze temperatuuropbouw is er geen convectie en/of turbulentie mogelijk. Toch is de samenstelling van de stratosfeer onafhankelijk van de hoogte

(zie ook Tabel 1: *Samenstelling van de atmosfeer*). In de stratosfeer vindt menging van gassen plaats door diffusie. Deze diffusieprocessen verlopen spontaan. Door de temperatuuropbouw van de stratosfeer is er geen uitwisseling van stoffen mogelijk met de troposfeer. De gassen in de stratosfeer zitten ‘gevangen’ in de stratosfeer en kunnen niet ‘ontsnappen’.

Mesosfeer, thermosfeer en exosfeer

Boven de stratosfeer ligt de mesosfeer, vanaf ca. 50 km tot ca. 100 km. In de mesosfeer daalt de temperatuur weer met toenemende hoogte van 280 K tot 190 K op ca. 100 km hoogte. In de thermosfeer, van ca. 100 tot ca. 400 km, stijgt de temperatuur weer met toenemende hoogte tot max. 2500 K. De exosfeer, de toplaag vanaf ca. 400 km, gaat geleidelijk over in het luchtledige helaal.

Stof	Troposfeer	Stratosfeer	Mesosfeer/thermosfeer/Exosfeer
N ₂	78,09	75	49
O ₂	20,95	18	7
Ar	0,93	1	
CO ₂	0,03	2	
Ne	$18 \cdot 10^{-4}$		
He	$5,2 \cdot 10^{-4}$		18
CH ₄	$2,2 \cdot 10^{-4}$		
Kr	$1 \cdot 10^{-4}$		
NO	$1 \cdot 10^{-4}$		2
H ₂	$0,5 \cdot 10^{-4}$		
Xe	$0,8 \cdot 10^{-4}$		
H ₂ O		2	
O ₃		2	
O			8
N			9
H			7

Tabel 1: *Samenstelling van de atmosfeer (volume-%)*

De ozonlaag

Zoals weergegeven in tabel 1 zit ozon alleen in de stratosfeer. Daarom wordt de stratosfeer ook wel ‘ozonlaag’ genoemd. De ozonlaag heeft een belangrijke functie: ze beschermt de aarde tegen de ultraviolette straling van de zon.

De hoeveelheid ozon op aarde

Gemiddeld is de concentratie ozon ongeveer $7 \cdot 10^{12}$ molecuul/cm³. Dit lijkt heel veel, maar het gehalte ozon is slechts 2 volume-% (zie ook tabel 1). Dus zelfs in de stratosfeer, de enige laag die ozon bevat, is ozon slechts in lage concentratie aanwezig!

Om de hoeveelheid ozon op een gemakkelijke manier uit te drukken wordt gebruik gemaakt van een speciale eenheid: de Dobson Unit (DU). Wetenschappers drukken de hoeveelheid ozon uit in het aantal DU's. Als de ozonlaag in het nieuws is, heeft men het vaak over de ‘dikte’ van de ozonlaag. Boven Noord-Amerika b.v. is de ozonlaag

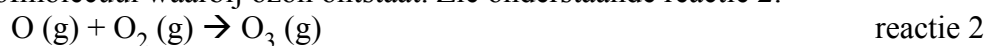
gemiddeld 300 DU dik. De dikte van de ozonlaag in DU is dus een maat voor de hoeveelheid ozon in de stratosfeer.

De vorming van ozon

De vorming van ozon vindt plaats onder invloed van ultraviolette straling van de zon. Ultraviolette straling met een golflengte (λ) van minder dan ~ 240 nm (10^{-9} m) wordt geabsorbeerd door zuurstofmoleculen (O_2). De zuurstofmoleculen vallen hierdoor uiteen in twee atomaire zuurstofatomen (O), ook wel zuurstofradicalen genoemd. Zie onderstaande reactie 1:



Zuurstofradicalen zijn zeer ‘agressieve’ deeltjes die meteen reageren met een zuurstofmolecuul waarbij ozon ontstaat. Zie onderstaande reactie 2:



De werking van de ozonlaag

Ultraviolette straling (UV-licht) uit zonlicht met een golflengte (λ) tussen ~ 240 en ~ 320 nm wordt geabsorbeerd door ozon, dat daarbij uiteenvalt in een zuurstofradicaal (O) en een zuurstofmolecuul (O_2). Zie ook onderstaande reactie 3:



Het zuurstofradicaal reageert nu met een ander zuurstofmolecuul hetgeen wederom ozon als reactieproduct tot gevolg heeft (zie ook reactie 2). Ozon absorbeert dus UV-licht zonder daarbij zelf te worden gebruikt. Het netto-resultaat van reacties 2 en 3 is dat UV-licht wordt omgezet in warmte. Dit verklaart de stijging van de temperatuur met de hoogte: het zonlicht bereikt de top van de stratosfeer op ca. 50 km hoogte eerst en dringt vervolgens door tot in diepere lagen. Het gehalte ultraviolette straling in zonlicht neemt hierbij steeds verder af.

De afbraak van ozon

Als een zuurstofradicaal, reactieproduct van reacties 1 en 3, bij toeval tegen een ozonmolecuul botst, dan valt ozon uiteen in twee zuurstofmoleculen:

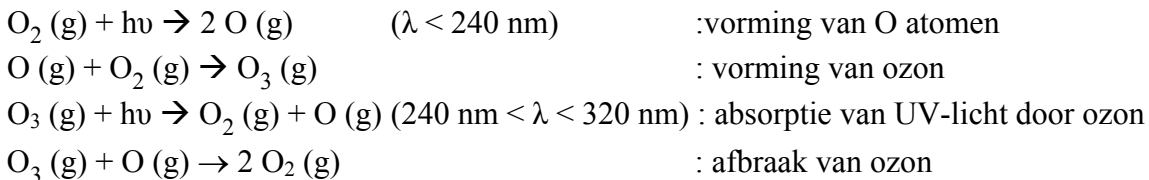


De concentratie O_3 is echter zeer laag. De kans dat een zuurstofradicaal tegen een ozonmolecuul botst, is veel kleiner dan de kans om een zuurstofmolecuul te treffen. Reactie 4 komt dus minder vaak voor dan reactie 2. Daarnaast verloopt reactie 4 ook veel langzamer dan reactie 2. Als ozon alleen via deze reactie zou worden afgebroken, dan zou de ozonlaag veel ‘dikker’ zijn. Toch houden vorming en afbraak van ozon gelijke tred. Reactie 4 wordt versneld door andere deeltjes die optreden als katalysator.

De Chapman-cyclus

Reacties 1 t/m 4 vormen samen een cyclus die de hoeveelheid ozon constant houden. Deze cyclus is vernoemd naar de wetenschapper Sidney Chapman. Chapman verrichtte in de eerste helft van de vorige eeuw baanbrekend werk op het gebied van de ozonchemie in

de stratosfeer en ontrafelde reacties 1 t/m 4. Hieronder is de Chapman-cyclus nog eens in het kort weergegeven:



Variaties in de ozonlaag

Over langere perioden is de hoeveelheid ozon constant, maar er zijn wel lokale en/of kortdurende variaties mogelijk. De dikte van de ozonlaag is afhankelijk van de plaats op aarde en het seizoen. Een aantal variaties wordt hieronder besproken.

Variaties gedurende een dag

Aangezien zuurstofradicalen alleen worden gevormd uit O_2 door UV-licht uit zonlicht, zou je kunnen verwachten dat de hoeveelheid zuurstofradicalen, en daarmee uiteindelijk ook de hoeveelheid ozon, de gedurende dag hoger is dan gedurende de nacht. Volgens sommige wetenschappers is het gat in de ozonlaag boven de noord- en zuidpool het resultaat van de lange, donkere poolwinters. Voor de afbraak van ozon zijn echter ook zuurstofradicalen nodig. Als de productie van zuurstofradicalen stopt, stopt zowel de productie als afbraak van ozon. 's Nachts stopt de vorming en afbraak van ozon, terwijl overdag de vorming en afbraak even snel verlopen. De hoeveelheid ozon varieert dus nauwelijks gedurende dag en nacht.

Variaties gedurende een jaar

De hoeveelheid zonlicht is afhankelijk van de locatie (breedtegraad) op aarde en het seizoen. Het is dus te verwachten dat dit consequenties heeft voor de dikte van de ozonlaag. Boven de tropen is de ozonlaag het dunst, ca. 270 DU, en bijna onafhankelijk van het seizoen. De meeste ozon wordt echter in de tropen gevormd en vervolgens getransporteerd naar hogere breedtegraden. Verder van de tropen hebben de verschillende seizoenen een duidelijk (meetbare) invloed. Zie ook Tabel 2: *Variaties in de dikte van de ozonlaag afhankelijk van het seizoen en locatie op aarde*. Over het algemeen is de ozonlaag in de lente het dikst en in de herfst het dunst. Dit is wellicht niet in overeenstemming met je verwachtingen. In de zomer is er het meeste zonlicht, dus zou het logisch zijn dat de ozonlaag in dit seizoen het dikst zou zijn. In de winter geldt het omgekeerde argument.

Locatie	Dikte van de ozonlaag (DU)			
	<i>januari</i>	<i>april</i>	<i>juli</i>	<i>oktober</i>
Huancayo, Peru (12 graden zuiderbreedte)	255	255	260	260
Aspendale, Australië (38 graden zuiderbreedte)	300	280	335	360
Arosa, Zwitserland (47 graden noorderbreedte)	335	375	320	280
St. Petersburg, Rusland (60 graden noorderbreedte)	360	425	345	300

Tabel 2: *Variaties in de dikte van de ozonlaag afhankelijk van het seizoen en locatie op aarde.*

Variaties gedurende meerdere jaren

De hoeveelheid licht van de zon is ook niet altijd gelijk. Een bekend voorbeeld is de 11 jaar durende zonnevlekkencyclus. Een hogere zonnevlekactiviteit duidt op een verhoogde activiteit van de zon, hetgeen meer UV-licht tot gevolg heeft en dus ook een verhoogde productie van ozon. Alhoewel er inderdaad een correlatie bestaat tussen de zonnevlekkencyclus en de dikte van de ozonlaag, is het effect klein: gemiddeld ~2% maximaal. Naast de zonnevlekkencyclus zijn er andere, incidentele perioden met een verhoogde zonne-activiteit. De effecten hiervan zijn op lange termijn eveneens nihil.

Variaties in de dikte van de ozonlaag onderzoeken

Er zijn veel meetgegevens over de dikte van de ozonlaag beschikbaar. Het is een goed idee om zelf eens de fluctuaties in de ozonhoeveelheid te bekijken. Op een website van NASA (URL: <http://earthobservatory.nasa.gov/Observatory/Datasets/ozone.toms.html>) kun je de variatie zelf onderzoeken.