

Les 3

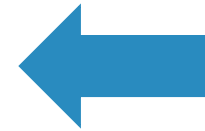
Atmosfeerfysica en -chemie

Inleiding tot de wetenschappen van de atmosfeer

Auteur: Erik de Schrijver

Inhoud

- Geschiedenis van het onderzoek
- Lagen van de atmosfeer
- Druk-, temperatuur- en dichtheidsgradiënten
- Chemische samenstelling
- Stralingseffecten
- Meteorieten en terugkerende ruimteschepen
- Electromagnetisme
- Planetaire atmosferen



Les 3: Druk-, temperatuur-, en dichtheidsgradiënten

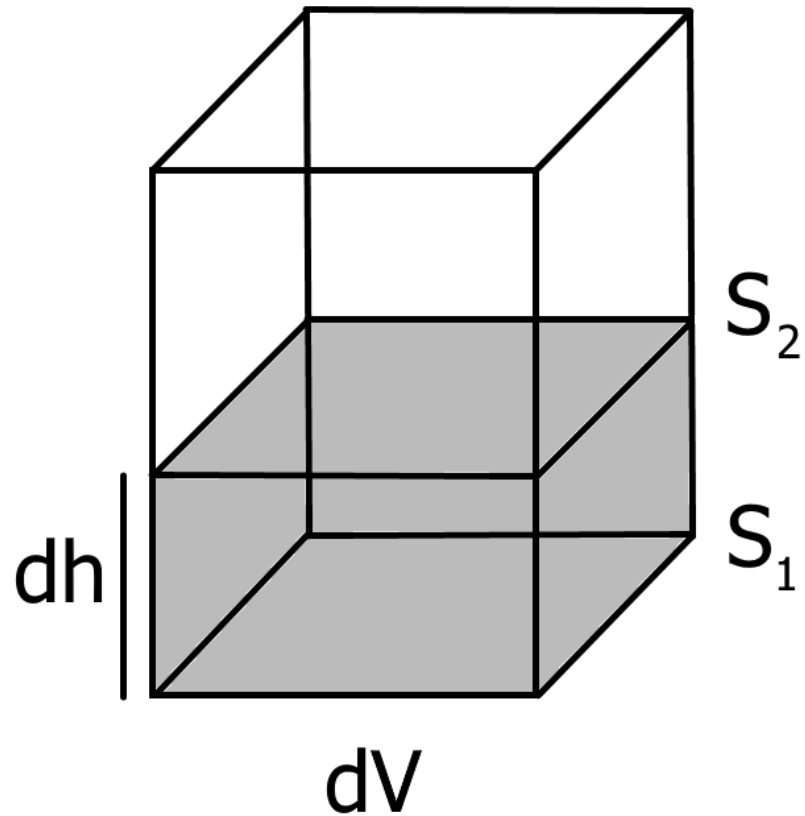
De temperatuur, druk en dichtheid variëren met de hoogte, maar ook in de tijd. Deze laatste variabiliteit is vooral het gevolg van luchtstromen die worden aangedreven door invallend zonlicht. Maar ook de onregelmatige vorm van de continenten, het reliëf, de bodembegroeiing, en inherent chaotisch gedrag maken lange termijn weersvoorspelling (en bij uitbreiding alle atmosfeermodellen) onmogelijk.

Met een aantal beperkende voorwaarden is modellering wel mogelijk, maar, zoals te verwachten: de eenvoudige modellen zijn het minst nauwkeurig.

1. De isotherme atmosfeer

Een eenvoudig atmosfeermodel gaat uit van een constante temperatuur. Dat is een aanvaardbare benadering voor wie bvb. de vlucht van zangvogels wil bestuderen, omdat deze zo goed als nooit hoger vliegen dan een paar tientallen meter. Op een schaal van een paar honderd meter is deze benadering echter al minder goed, op een paar duizend meter is ze compleet onhoudbaar.

In dit model zal de druk dalen met de hoogte, omdat elk volumedeel lucht wordt samengeperst o.i.v. het gewicht van de lucht erboven.



Beschouw een verticale kolom lucht met een basisoppervlak $S = 1\text{m}^2$. Op een bepaalde hoogte hebben we dan een oppervlak S_1 waar zich een klein volume dV boven bevindt.

Bijgevolg is $dV = S \cdot dh$

Het onderste oppervlak S_1 ondervindt het gewicht van alle lucht die zich boven dV bevindt PLUS het gewicht van de lucht IN dV .

De massa van de lucht IN dV : $dm = \rho \cdot dV = \rho \cdot S \cdot dh$

Omdat gewicht = $F = m \cdot g$ volgt dat $dF = \rho \cdot S \cdot dh \cdot g$

En omdat druk = $P = F/S$ (*kracht/opp.*) volgt dat $dP = -\rho \cdot g \cdot dh$
($\rightarrow$ 'min' want $dP < 0$ als $dh > 0$ en omgekeerd)

Uit de universele Gaswet volgt dat: $P = \frac{n \cdot R \cdot T}{V}$

Rechts vermenigvuldigen en delen
door de gemiddelde molaire massa (M) geeft:

$$P = \frac{n \cdot M \cdot R \cdot T}{V \cdot M}$$

Nu is $n \cdot M = m$ = massa van het gas in volume V
Waaruit volgt dat

$$P = \frac{m \cdot R \cdot T}{M \cdot V}$$

En omdat $\rho = m/V$

$$P = \frac{\rho \cdot R \cdot T}{M}$$

$$\text{Uit } P = \frac{\rho \cdot R \cdot T}{M} \text{ volgt } \rho = \frac{P \cdot M}{R \cdot T}$$

$$\text{Ook volgt uit } dP = -\rho \cdot g \cdot dh \text{ dat } dP = -\left[\frac{P \cdot M}{R \cdot T}\right] \cdot g \cdot dh$$

$$\text{En dus } \frac{dP}{P} = -\left[\frac{M \cdot g}{R \cdot T}\right] \cdot dh$$

Nu is de samenstelling van de atmosfeer in zeer goede benadering constant tot rond de 80km (enkel 'minority constituents' veranderen van concentratie, N₂ blijft 78%, O₂ 21% naar volume), waardoor $M \approx \text{constant}$ is.

De valversnelling kan berekend worden met: $g = G \cdot M_a / r^2$

Waarin $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$, $M_a = 5,96 \cdot 10^{24} \text{ kg}$, $r = 6370 \text{ km}$

($\rightarrow$ Voor hoogtes onder 80km is $g \approx \text{constant} = 9,81 \text{ m/s}^2$)

Aangezien in ons model de

atmosfeer isotherm is volgt daaruit dat:

$$\frac{M \cdot g}{R \cdot T} = \text{Constant}$$

De integratie van $dP = - \left[\frac{P \cdot M}{R \cdot T} \right] \cdot g \cdot dh$ van zeeniveau ($h_0 = 0 \text{ m}$)

tot hoogte h geeft dan: $\ln(P) - \ln(P_0) = - \frac{M \cdot g}{R \cdot T} (h - h_0)$

waaruit volgt dat:

$$P = P_0 \cdot e^{-(M \cdot g / R \cdot T) \cdot h}$$

Men noemt dit de 'barometrische hoogteformule':

$$P = P_0 \cdot e^{-(M \cdot g / R \cdot T) \cdot h}$$

Hierin is:

P = druk op hoogte h (Pa),

P_0 = druk op hoogte 0 of zeeniveau (Pa),

M = gemiddelde molaire massa = $0,78 N_2 + 0,21 O_2 = 28,56 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}$,

R = $8,314 \text{ J/K} \cdot \text{mol}$,

T = temperatuur (K).

Oefening 1:

Bereken de druk op 6000m hoogte als $P_0 = 1013 \text{ hPa}$ en $T = 273 \text{ K}$.

Oefening 2:

Bereken bij welke temperatuur de druk op 1000m hoogte gelijk is aan 900hPa.

Gegeven: $P_0 = 1013 \text{ hPa}$

Oefening 1:

Oplossing: $4,83 \cdot 10^4 \text{ Pa}$

Bereken de druk op 6000m hoogte als $P_0 = 1013 \text{ hPa}$ en $T = 273 \text{ K}$.

Oefening 2:

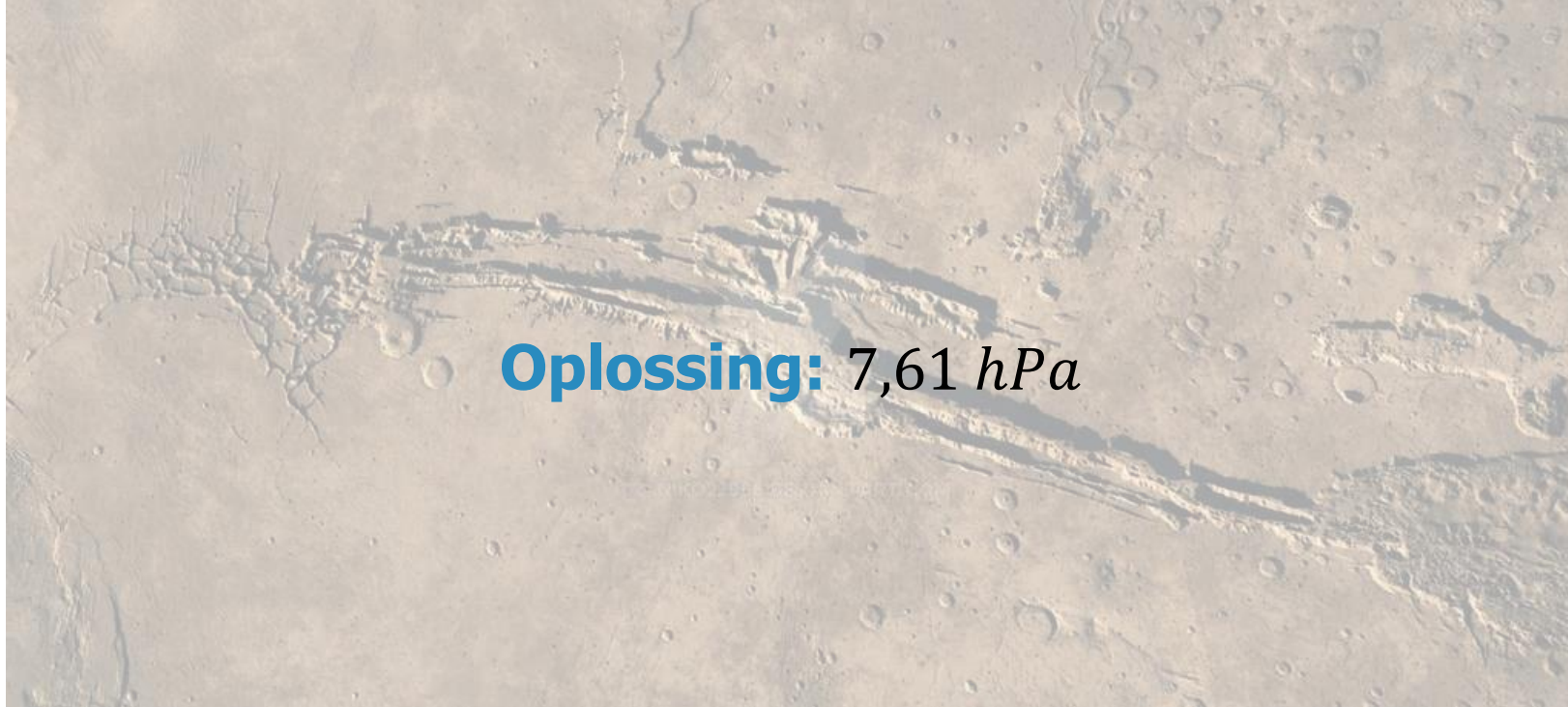
Oplossing: 285 K

Bereken bij welke temperatuur de druk op 1000m hoogte gelijk is aan 900hPa.

Gegeven: $P_0 = 1013 \text{ hPa}$

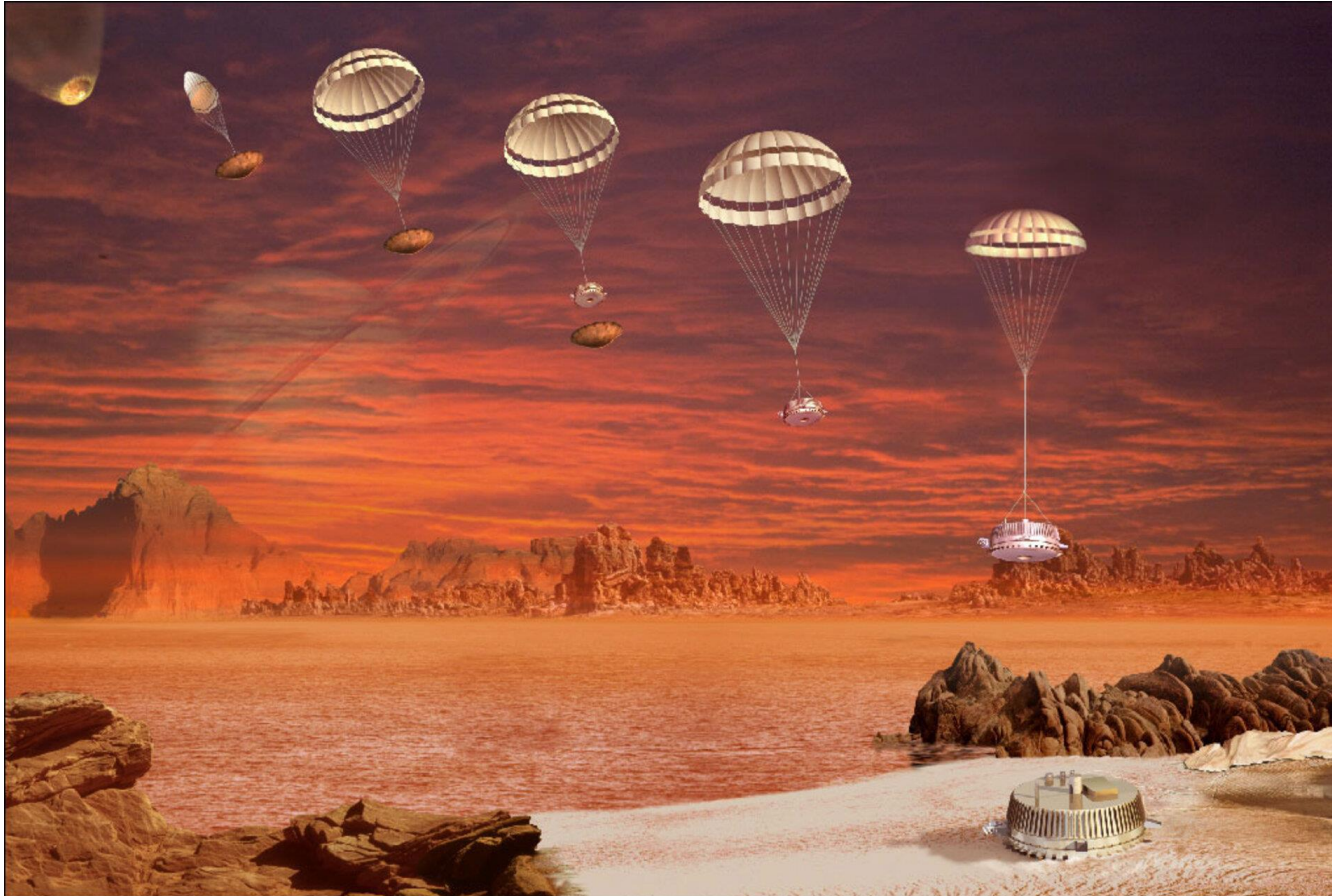


Oefening 3: Bereken de luchtdruk op Mars op de bodem van Vallis Marineris (hoogte: $-3000m$ t.o.v. het referentieniveau) als je weet dat de druk op het referentieniveau $6,00hPa$ bedraagt, $g = 3,74m/s^2$ en de atmosfeer uit nagenoeg zuivere CO_2 bestaat met $T = 250K$.



Oplossing: $7,61 \text{ hPa}$

Oefening 3: Bereken de luchtdruk op Mars op de bodem van Vallis Marineris (hoogte: -3000m t.o.v. het referentieniveau) als je weet dat de druk op het referentieniveau $6,00\text{hPa}$ bedraagt, $g = 3,74\text{m/s}^2$ en de atmosfeer uit nagenoeg zuivere CO_2 bestaat met $T = 250\text{K}$.



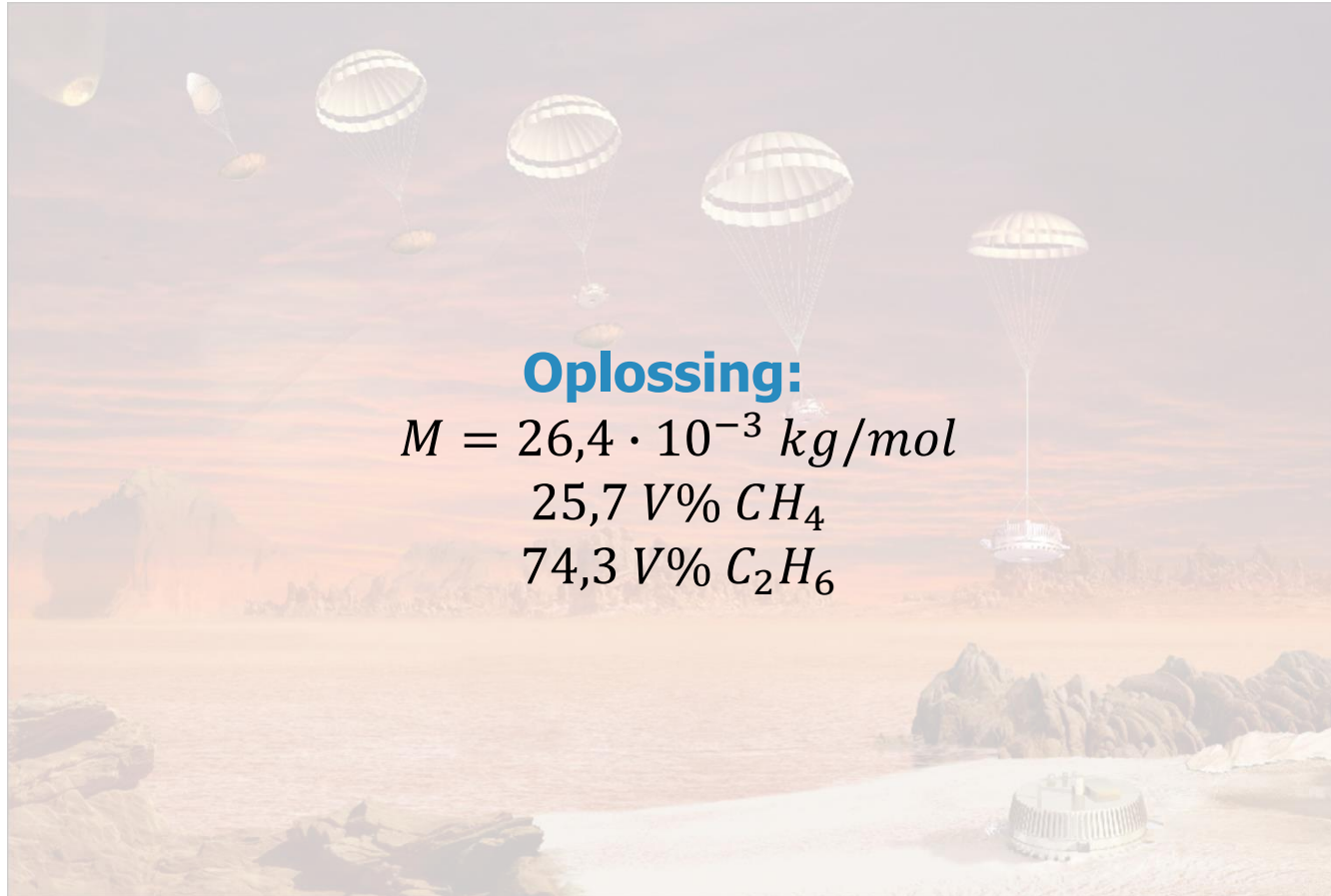
Oefening 4:

Uit metingen van ESA's Huygens-lander blijkt dat de druk aan het oppervlak van Titan gelijk is aan 146kPa . Tijdens de afdaling, op 20km hoogte, was dat nog 50kPa .

Op Titan bedraagt de temperatuur $\approx 80\text{K}$, g is er $1,35\text{m/s}^2$.

Bereken de gemiddelde molaire massa.

Bereken ook V% methaan (CH_4) en ethaan (C_2H_6) als je weet dat de atmosfeer quasi uitsluitend uit deze twee gasen bestaat.

**Oplossing:**

$$M = 26,4 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}$$

$$25,7 \text{ V\% } CH_4$$

$$74,3 \text{ V\% } C_2H_6$$

Oefening 4:

Uit metingen van ESA's Huygens-lander blijkt dat de druk aan het oppervlak van Titan gelijk is aan 146 kPa . Tijdens de afdaling, op 20 km hoogte, was dat nog 50 kPa .

Op Titan bedraagt de temperatuur $\approx 80 \text{ K}$, g is er $1,35 \text{ m/s}^2$.

Bereken de gemiddelde molaire massa.

Bereken ook V% methaan (CH_4) en ethaan (C_2H_6) als je weet dat de atmosfeer quasi uitsluitend uit deze twee gasen bestaat.

Dingen om over na te denken

- Als je voor de temperatuur van de troposfeer de luchttemperatuur aan de grond zou nemen, zou het model van een isotherme atmosfeer dan de reële luchtdruk over- of onderschatten? Waarom?
- Als je voor de temperatuur van de stratosfeer de luchttemperatuur in de tropopause zou nemen, zou het model van een isotherme atmosfeer dan de reële luchtdruk over- of onderschatten? Waarom?

Dingen om over na te denken

- Als je voor de temperatuur van de troposfeer de luchttemperatuur aan de grond zou nemen, zou het model van een isotherme atmosfeer dan de reële luchtdruk over- of onderschatten? Waarom?
 - In de troposfeer daalt de temperatuur met de hoogte. De troposfeer is dus overal kouder dan aan de grond. De reële druk zal dus lager zijn. Het model overschat de druk.
- Als je voor de temperatuur van de stratosfeer de luchttemperatuur in de tropopause zou nemen, zou het model van een isotherme atmosfeer dan de reële luchtdruk over- of onderschatten? Waarom?
 - In de stratosfeer stijgt de temperatuur met de hoogte. Het is dus overal warmer dan in de tropopause. Het model onderschat de druk.

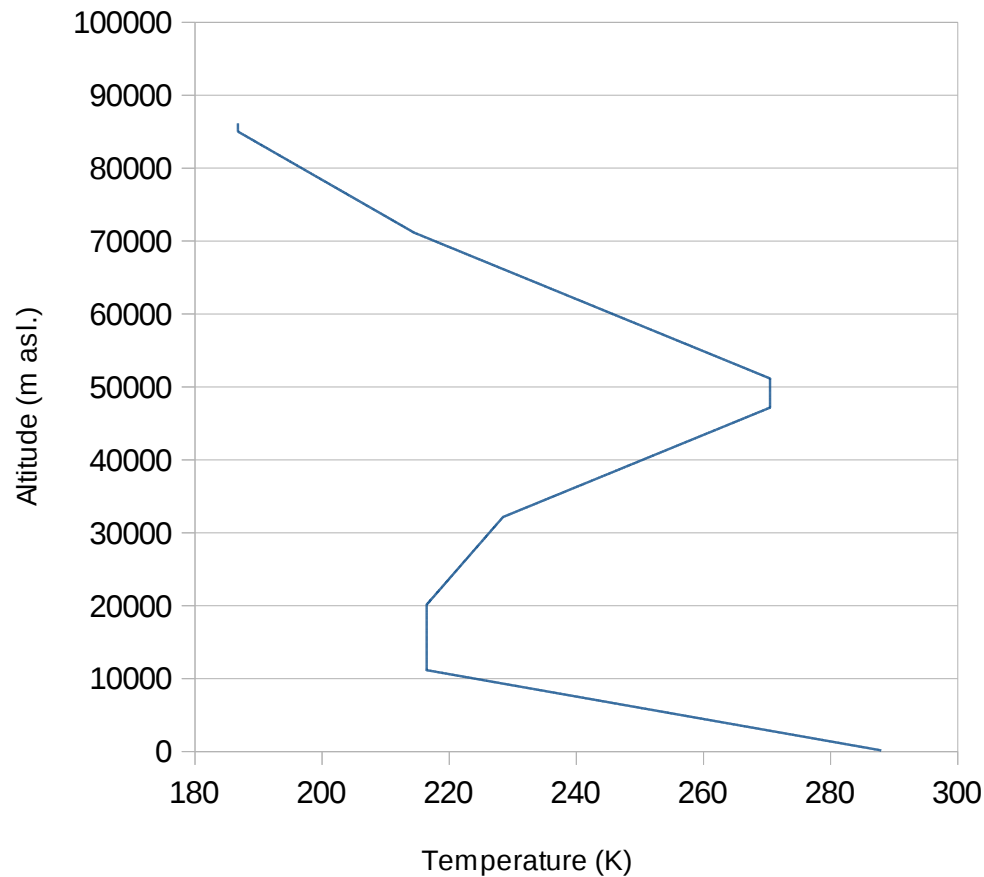
2. De standaard atmosfeer - 1976

De echte atmosfeer is turbulent en constant onderhevig aan verandering. Er is geen wiskundige beschrijving mogelijk die rekening houdt met alle variabelen, en het systeem is ook inherent chaotisch.

Wat wél mogelijk is, is een empirisch gemiddelde maken, zodat reële situaties kunnen beschreven worden als 'afwijkingen van het gemiddelde'. De meteorologie doet net hetzelfde wanneer zij het onderscheid maakt tussen het weer en het klimaat.

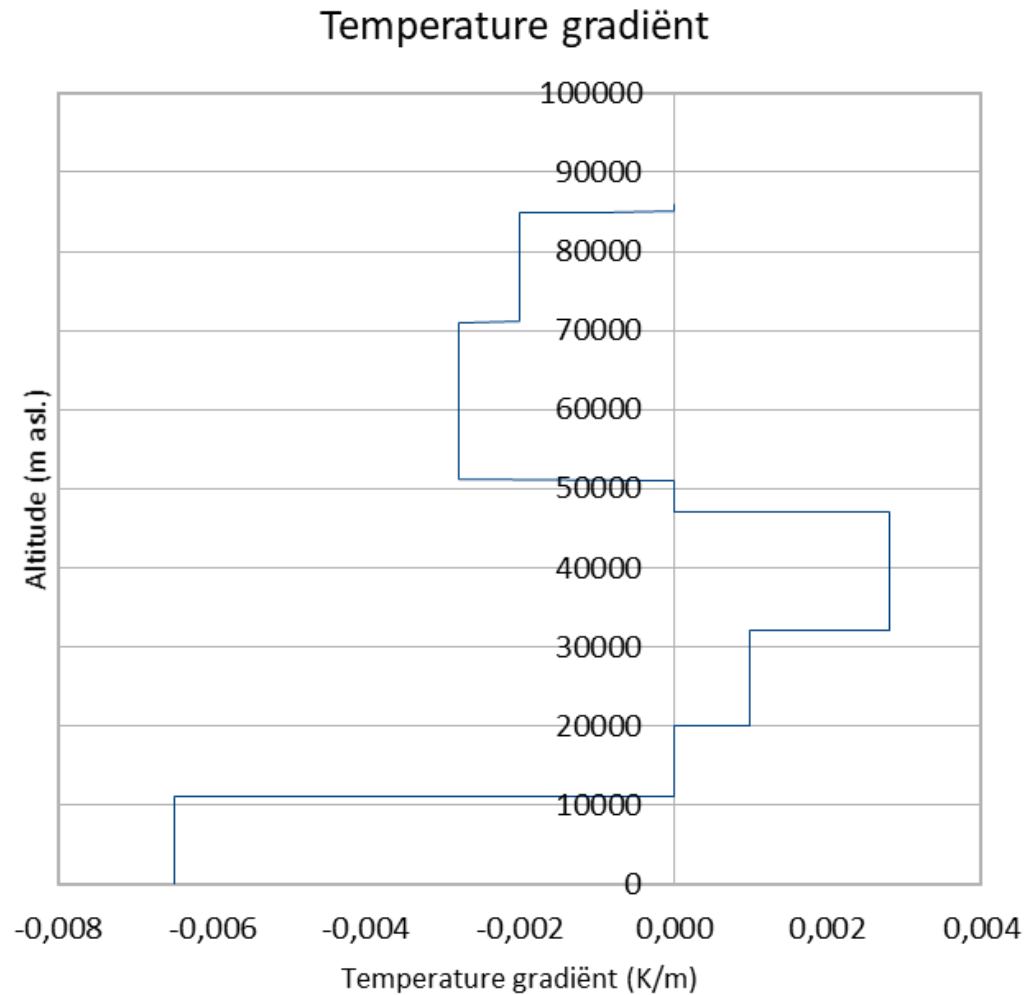
Temperature profile

(Standard Atmosphere 1976)



De standaard atmosfeer - 1976

Dit is niet zomaar een gemiddelde van metingen. Het is een model dat gebaseerd is op metingen, maar waarin de atmosfeer is opgedeeld in een aantal lagen waarin de temperatuurgradiënt constant is. Dwz. dat binnen zo'n laag de temperatuur lineair varieert met de hoogte.



De keuze van die lagen is gemaakt op basis van een afweging: met meer lagen kan de realiteit dichter benaderd worden, maar verliest men aan eenvoud. Minder lagen betekent minder complexiteit, maar het model sluit dan minder goed aan bij de werkelijkheid.

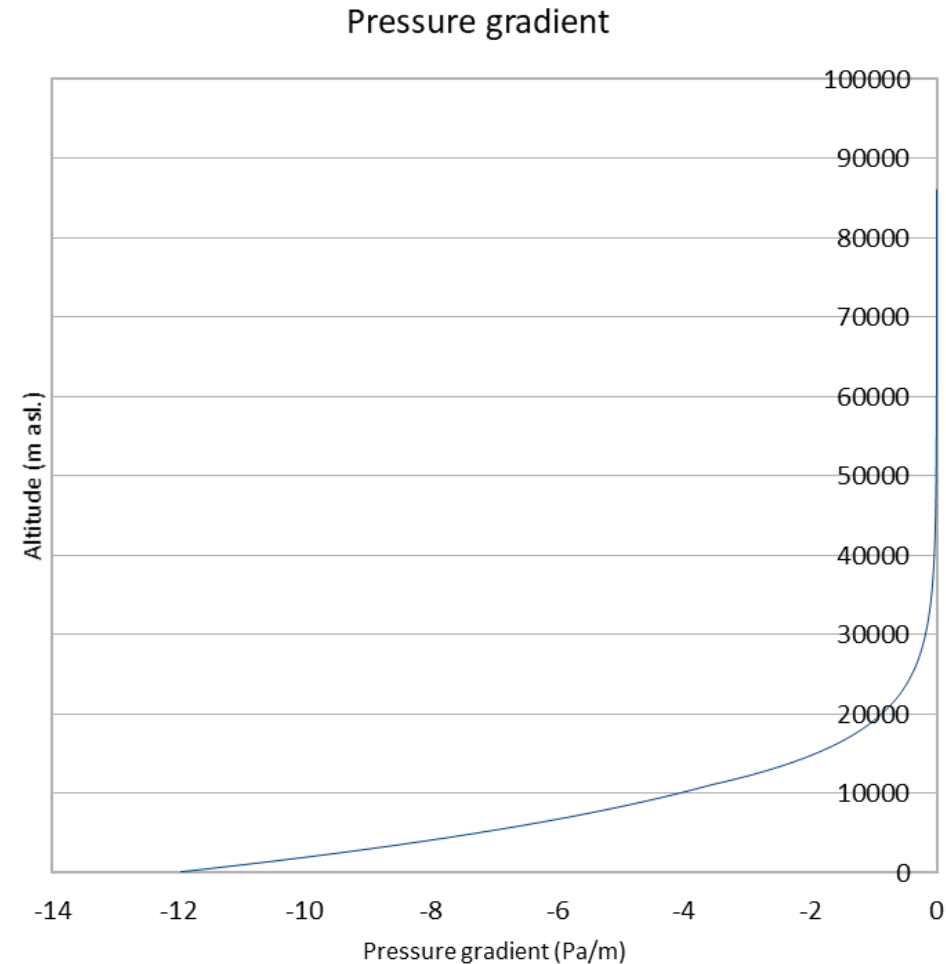
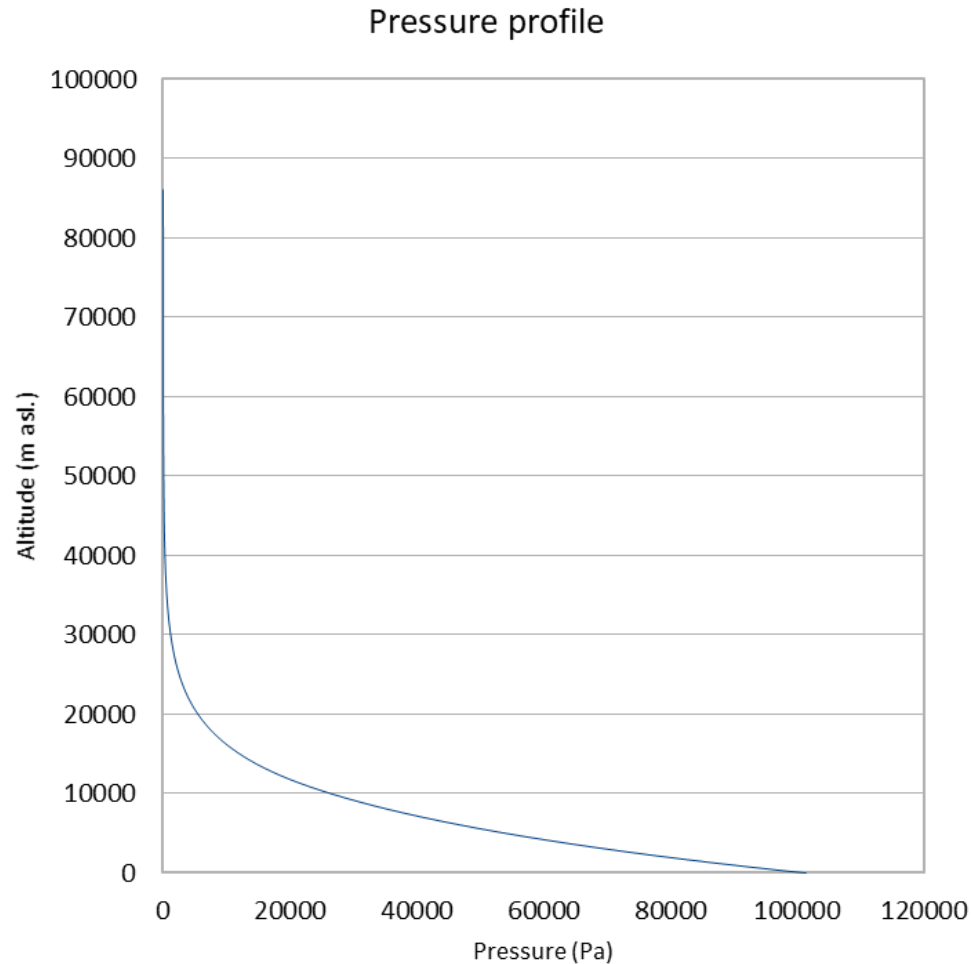
Dingen om over na te denken

- De barometrische hoogteformule en de Standaard Atmosfeer 1976 zijn in complete overeenstemming binnen de tropopause. Waarom?

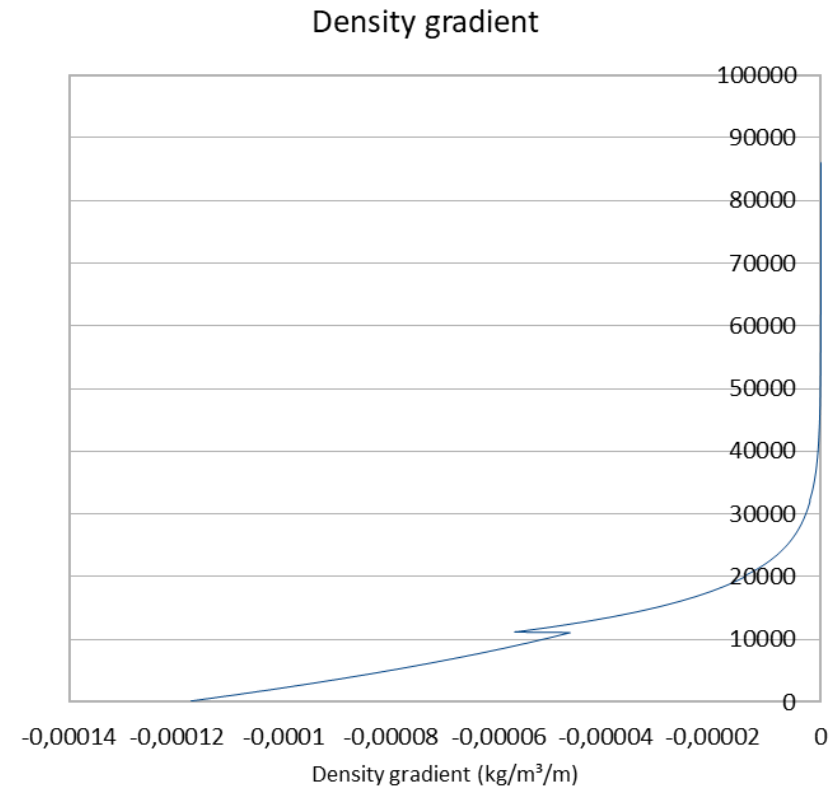
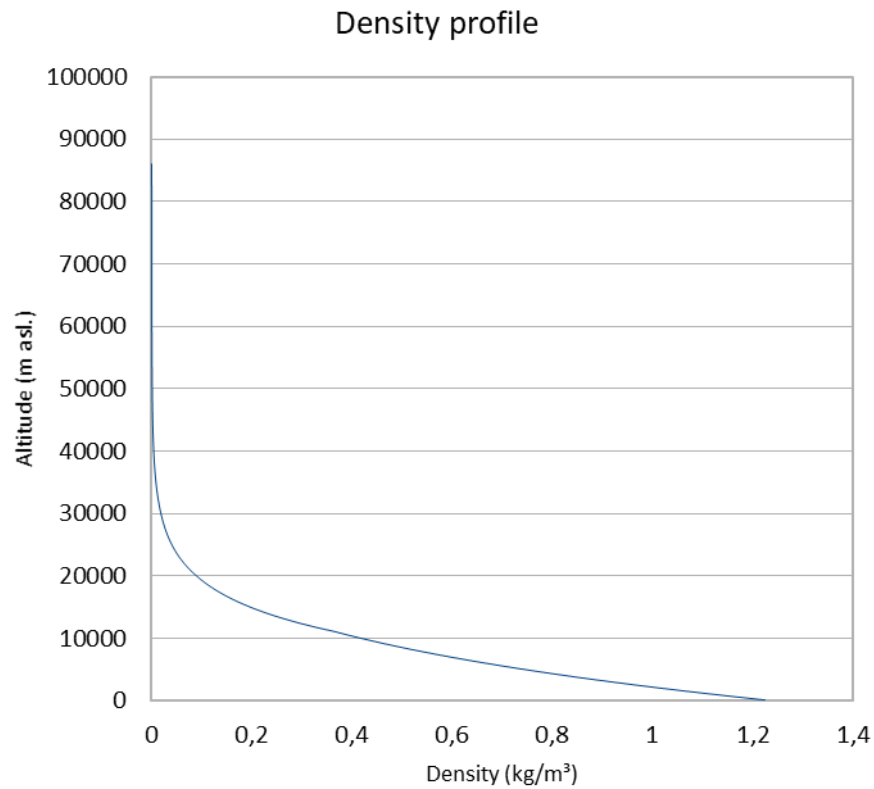
Dingen om over na te denken

- De barometrische hoogteformule en de Standaard Atmosfeer 1976 zijn in complete overeenstemming binnen de tropopause. Waarom?
 - Alleen in de tropopause zijn de hypothesen van beide modellen dezelfde: de temperatuurgradiënt is er gelijk aan nul (Standaard Atmosfeer 1976), dwz. de temperatuur is er constant (Isotherme atmosfeer).

Het drukprofiel en de drukgradiënt kunnen dan relatief gemakkelijk berekend worden.



De dichtheid en de dichtheidsgradiënt vergen meer rekenwerk, en er ontstaat een discontinuïteit in de dichtheidsgradiënt t.g.v. de discontinuïteit in het temperatuurprofiel.

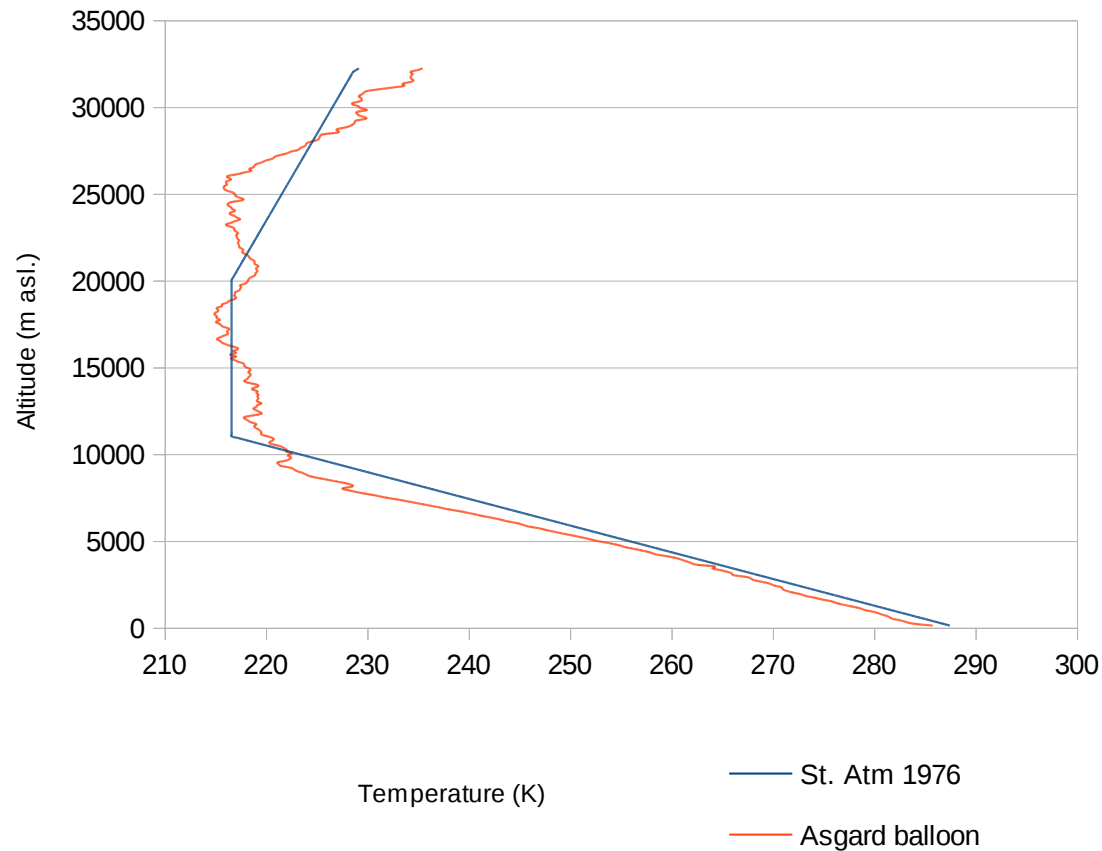


Merk op dat de dichtheid en de druk niet dezelfde wiskundige kromme volgen, ook al lijken beide grafieken erg op mekaar.

Inderdaad volgt uit: $\rho = P \cdot M / R \cdot T$ dat dichtheid en druk enkel dan recht evenredig zijn als $T = \text{constant}$. In het model van de isotherme atmosfeer klopt dat, maar niet in het model Standaard Atmosfeer 1976.

Temperature Profile

Standard Atmosphere 1976 vs Asgard balloon



Een vergelijking tussen het model van de Standaard Atmosfeer 1976 en een eenmalige peiling (Asgard-1 ballon) boven Ukkel, April 2011.

Problemen bij het meten van T op grote hoogte

- De meeste sensoren registreren hun eigen temperatuur, niet die van de omgeving. Als beide in thermisch evenwicht zijn is er natuurlijk geen verschil. Maar het bereiken van dat evenwicht is afhankelijk van geleiding, stroming of straling. De eerste twee processen zijn het efficiëntst, maar komen op grote hoogte nauwelijks voor door de lage dichtheid (partieel vacuüm). Een thermosensor zal dus alleen radiatief afkoelen/opwarmen tot de omgevingstemperatuur, wat een veel langzamer proces is. Er ontstaat dus enige vertraging op de meting, die **thermische inertie** genoemd wordt. Deze kan beperkt worden door de massa klein te houden en de blootstelling aan omgevingsmoleculen te vergroten.
- Vanzelfsprekend werken radiatieve processen in twee richtingen: de sensor moet afgeschermd worden van invallend zonlicht.

Aanbevolen lectuur

- *The Edge of Space, exploring the upper atmosphere. Richard A. Craig. 1968. Anchor Books Doubleday & Company, Inc. Garden City New York.*
- *Discovering the Earth: Atmosphere. A Scientific History of Air, Weather, and Climate. Michael Allaby. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data. ISBN-13: 978-0-8160-6098-6, ISBN-10: 0-8160-6098-3.*
- *Cassini at Saturn, Huygens results. David M. Harland. Springer-Praxis books in Space Exploration. ISBN-10: 0-387-26129-X Springer Berlin Heidelberg New York, ISBN-13: 978-0-387-26129-4 Springer Berlin Heidelberg New York,*