

## Lyfttryck, temperatur och ideala gaslagen

Ann-Marie Pendrill, Lunds universitet

Ideala gaslagen  $pV = nRT$  ger ett samband mellan tryck, temperatur och densitet. (Densiteten kan uttryckas som  $\rho = m_{mol} n/V = m_{mol} RT/p$ , där  $m_{mol} \approx 29 \text{ g/mol}$  är den genomsnittliga molmassan.)

Ibland används "STP- Standard-temperatur och tryck":  $T=0^\circ\text{C}$  och  $p=1013\text{hPa}$ . En mol ideal gas har då volymen 22.4 liter och luftens densitet är  $1.29 \text{ kg/m}^3$ .

### Luftrycksförändring, låga höjder

1. Luftrycket ändras med höjden - ju högre upp vi kommer, desto mindre väger luftpelaren över oss. Vilken relation ger detta mellan höjd och ändring i luftryck? (Använd  $\Delta p = -\rho g \Delta h$ )
2. Undersök hur trycket varierar med höjden med telefonens barometersensor.
3. Klocktornet på Deutsches Museum i München har en barometer på ena sidan. Den anger luftryck i cm kvicksilverpelare (Hg). Använd bilden för att uppskatta hur högt München ligger över havet. (760mm Hg svarar mot 1013hPa)



### Luftrycksförändringar i atmosfären

Efter hand som luftrycket minskar så minskar också luftens densitet. Tänk på att densiteten är proportionell mot  $n/V = RT/p$ , dvs omvänt proportionell mot trycket. Densiteten kan skrivas som  $\rho = m_{mol} n/V = m_{mol} RT/p$  där  $m_{mol}$  är genomsnittlig molmassa ( $m_{mol} \approx 29 \text{ g/mol}$  för luft).

Man kan göra ett enkelt kalkylblad där man steg för steg går uppåt i atmosfären, tar hänsyn luftrycket och gör en ny beräkning av densiteten för varje steg. Resultaten ger en graf för hur luftrycket varierar med höjden.

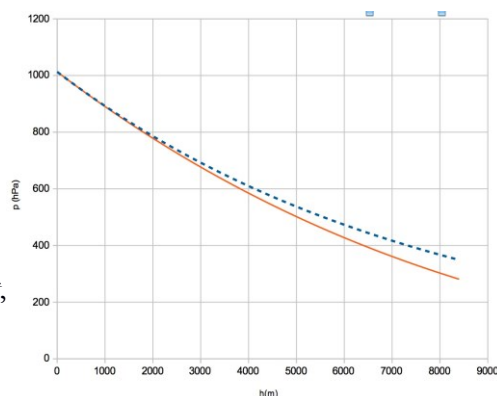
Övningen kan också användas för att diskutera numerisk osäkerhet. - Mindre steg ger förstås större noggrannhet. (Till hjälp finns ett *kalkylark* att ladda ner)

Samarbeta gärna med matematikläraren som kan ta upp luftryck som ett exempel på exponentialfunktion.

I denna övning har vi antagit konstant temperatur. För att veta mer om hur temperaturen varierar med höjden behöver vi, förutom allmänna gaslagen, också använda resultat från termodynamik och kinetisk gasteori, som tas upp i exemplen nedan. (*Kalkylarket* innehåller också en flik för adiabatisk temperaturändring och en flik för hur temperaturen varierar med höjden.)

## Adiabatisk temperaturändring

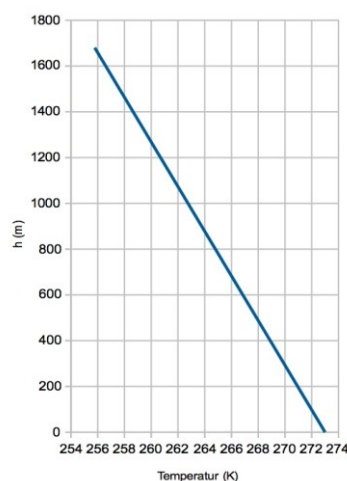
I den enklaste approximationen för att uppskatta hur lufttrycket varierar med höjden försummas att temperaturen också ändras när man kommer högre upp. En mer realistisk modell är att anta en "adiabatisk temperaturändring", som svarar mot att ett "luftpaket" ändrar volym utan att någon energi försvinner eller tillförs. Då gäller  $pV^\gamma = \text{konstant}$ , där  $\gamma = 1.4$  för en gas av tvåatomiga molekyler (som kväve och syre).



- Kommer densiteten att minska snabbare eller långsammare när man går uppåt om trycket minskar enligt  $pV^\gamma = \text{konstant}$  i stället för  $pV = \text{konstant}$
- Förväntar du att lufttrycket ska avta snabbare eller långsammare med höjden för en adiabatisk temperaturändring? Vilken av graferna till höger visar den adiabatiska temperaturändringen.

## Temperaturförändring som funktion av höjden

- I kalkylarket finns en flik för hur trycket varierar med höjden för adiabatisk temperaturändring. Prova att ändra steglängden för den numeriska beräkningen.
- Från kalkylarkets värden på tryck och densitet kan man beräkna hur temperaturen varierar med höjden. Gör en graf som illustrerar detta (se tredje fliken i kalkylarket).



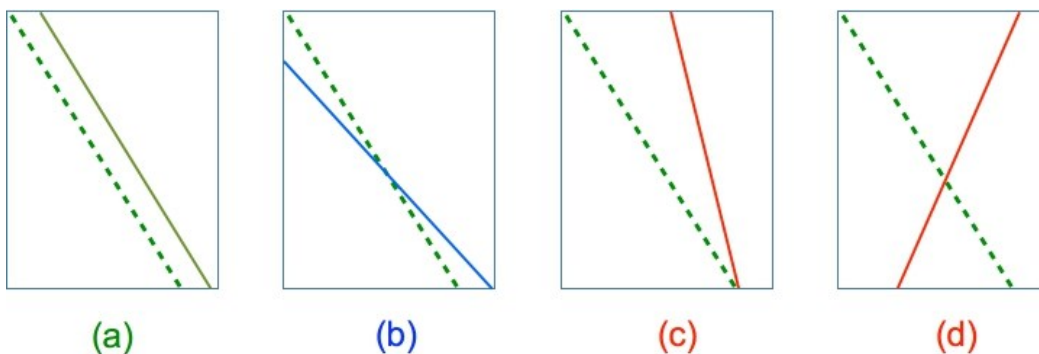
I vädersammanhang ritas man ofta höjden på den vertikala axeln. I kalkylarket finns beräkningar av temperaturen och en graf med temperaturen på den horisontella axeln. För torr luft blir temperaturavtagandet

$$\Gamma_d \approx -10^\circ\text{C} / \text{km}.$$

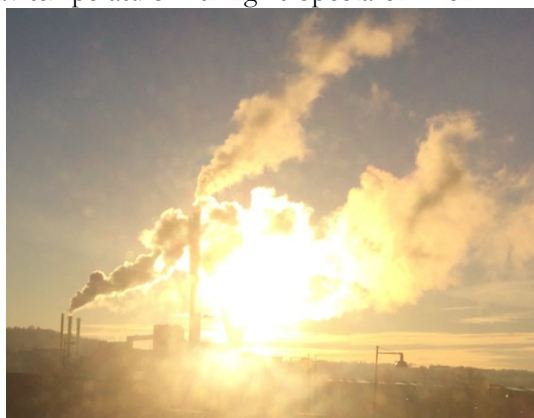
Detta är den s.k. "torradiabaten" som inte tar hänsyn till hur luftfuktighet, kondensation och avdunstning kan påverka temperaturen.

För fuktig luft får man i stället ett värde  $dT/dz \approx -6.5^\circ\text{C}/\text{km}$ .

## Temperaturskiktningar



Bilderna ovan visar exempel på olika typer av temperaturskiktning i troposfären. Den streckade linjen svarar mot en adiabatisk temperaturförändring med höjden. Ett luftpaket påverkas dels av en nedåtriktad kraft från gravitationen, dels av en uppåtriktad kraft, som beror på minskningen i lufttryck med ökande höjd. Rökplymer från skorstenar kan avslöja hur temperaturskiktningen ser ut. Hur temperaturen varierar påverkar vad som händer med ett luftpaket som förflyttas uppåt eller nedåt.



I en neutral skiktning (a) sammanfaller lutningen på temperaturändringen med en adiabatisk expansion och den uppåtriktade kraften från omgivande luft kommer då att balansera gravitationen även om luftpaketet sjunker eller stiger ("hävs"). En rökplym sprids sakta uppåt och nedåt.

Om temperaturen i den omgivande luften faller snabbare än adiabatiskt (b) kommer lyftkraften från den omgivande luften att öka när ett varmt luftpaket stiger (och minska när ett kallt luftpaket sjunker). Det blir alltså en *instabil skiktning* som bidrar till omblandning.

Vid en stabil temperaturskiktning (c) faller temperaturen långsammare med höjd än vid adiabatisk "hävning". Ett luftpaket som hävs får större densitet än den omgivande luften, och strävar tillbaka till ursprungshöjden. Detta motverkar alltså omblandning - en *stabil skiktning*. Detta förekommer ofta vid klara sommarnätter. När solen värmer marken på morgonen kan uppvärmda "luftpaket" nära marken stiga uppåt (och expandera adiabatiskt) tills de har samma temperatur som omgivningen. Oftast löses skiktningen upp under dagen.



Kalla vinternätter kan marken kylas av så att luften blir kallast närmast marken, och temperaturen ökar med höjden (d). Vi får en *inversion*, som kan ibland ligga kvar flera dygn, vilket innebär att föroreningar kan stanna kvar under lång tid. I städer som t.ex. Göteborg kan man se ett mörkt lager som ett lock över staden. (Se också SMHI:s sida om Inversion <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/inversion-1.28269>)

## Temperaturvariationer på högre höjd

På SMHI:s sida <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/atmosfarens-olika-lager-1.5838> finns en bild med hur temperaturen varierar i atmosfärens olika lager och hur temperaturen varierar. I det lägsta skiktet, "troposfären" avtar temperaturen vanligen med ökande höjd, och det linjära adiabatiska sambandet stämmer ofta väl. Högre upp, i övre delen av stratosfären, stiger i stället temperaturen med ökande höjd. Detta hänger samman med absorption av den långvågiga värmestrålningen från jorden - växthuseffekten.

## Extra-uppgift: Enhetsanalys och beteckningar

I vissa böcker och www-sidor skrivs allmänna gaslagen som  $p = \rho RT$ , (och alltså inte som det vanliga uttrycket  $pV/nRT$ ). Använd enhetsanalys för att visa att formeln  $p = \rho RT$  inte kan stämma om  $R$  avser allmänna gaskonstanten som har värdet  $8.314 \cdot 10^3 \text{ J kmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . (Tryck har enheten  $\text{N/m}^2$  och densitet  $\text{kg/m}^3$  och energienheten  $\text{J}$  är densamma som en  $\text{Nm}$ .)

## Reflektera:

- Hur kan beräkningar baserade på denna ekvation bli korrekta även om ekvationen saknar en faktor?
- Kan man definiera olika gaskonstanter  $R$  för t.ex. luft och vattenånga?