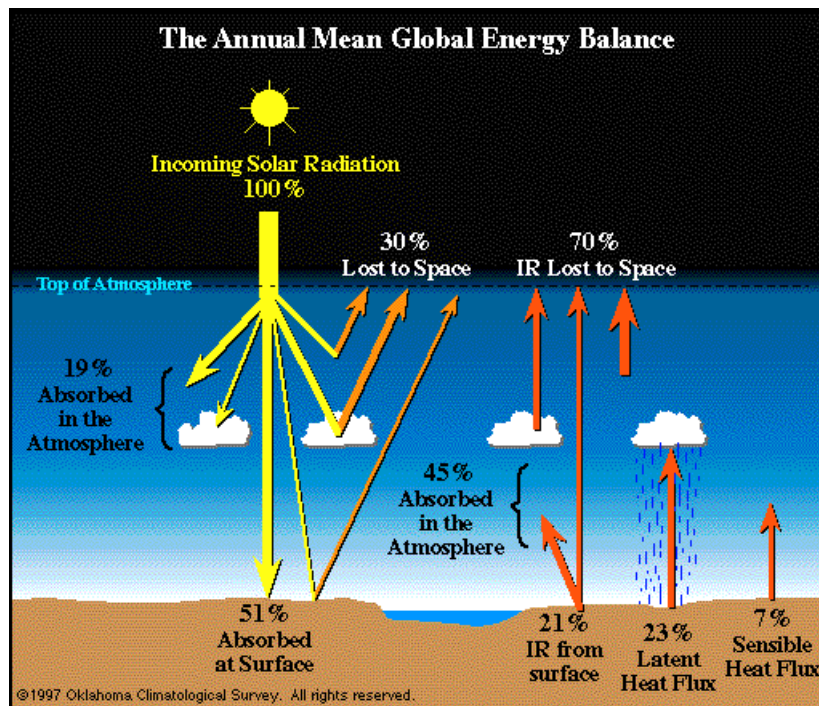


## MITEN HIILIDIOKSIDI LÄMMITTÄÄ ILMAKEHÄÄ?

Alunperin lähdin etsimään yksinkertaista mallia tai laskelmaa, josta selviäisi, miten hiilidioksidin lisääntyminen lämmittää maapalloa. Edellä olen selvittänyt hiilidioksidin käyttäytymistä kaasuna, spektriviivojen leveneminen ym. Pelkistä ominaisuuksista on kuitenkin vaikea päätellä, miten hiilidioksidi vaikuttaa ilmakehässä. Koska sitä yksinkertaista mallia ei löytänyt, niin lopulta päätin tehdä sellaisen itse. Ideana oli tehdä malli, joka vastaa mahdollisimman hyvin nykyistä tilannetta ja sitten kokeilla pienen hiilidioksidilisan vaikutusta. Mallista ei tullut ihan niin yksinkertaista kuin olin ajatellut. Tämä on kuitenkin yksinkertaisin laskelma, joka mielestäni sisältää oleelliset asiat kuten kaasujen ominaisuudet aallonpituuden, lämpötilan ja paineen funktiona.

### Energiatasapaino

Nykyinen käsitys auringosta tulevan energian kulkeutumisesta maapallolla ilmenee kuvasta 1.



Kuva 1. Maapallon energiatasapaino  
(<http://okfirst.ocs.ou.edu/train/meteorology/EnergyBudget2.html>)

Tarkastellaan ensin maanpintaa. Tässä yhteydessä se tarkoittaa planeetta Maan pintaa, josta 70 % on merta. Auringon säteilystä vain puolet yltää pintaan saakka,  $I_A = 169 \text{ W/m}^2$ . Myös ilmakehä säteilee alaspäin teholla  $I_0$ , joka riippuu ilman lämpötilasta. Maanpinta taas säteilee lämpötilansa perusteella teholla  $I_M$ . Sen lisäksi maanpinnasta siirtyy lämpöä ilmakehään haihtumalla ( $78 \text{ W/m}^2$ ) sekä siirtymällä ja kulkeutumalla ( $24 \text{ W/m}^2$ ), yhteensä  $Q_M = 102 \text{ W/m}^2$  verran. Tasapainoehdoksi saadaan

$$I_A + I_0 = I_M + Q_M \quad (1)$$

Myös ilmakehä imee osan auringon säteilyä,  $Q_A = 67 \text{ W/m}^2$ . Vain pieni osa maanpinnan säteilemästä energiasta  $I_{tr}$  pääsee ilmakehän läpi avaruuteen. Loppu imeytyy ilmakehään ( $I_M - I_{tr}$ ). Määrä riippuu ilmakehän koostumuksesta. Tasapainossa ilmakehä säteilee pois yhtä paljon energiaa kuin saa.

$$Q_A + Q_M + I_M - I_{tr} = I_0 + I_1 \quad (2)$$

Yhdistämällä yhtälöt (1) ja (2) saadaan

$$I_A + Q_A = I_{tr} + I_1 \quad (3)$$

Se on maa-ilmakehä systeemin tasapainoyhtälö, jossa systeemistä poistuu energiaa säteilemällä avaruuteen yhtä paljon kuin se saa auringosta.

### Ilmakehän lämpötila

Maan ilmakehässä lämpötila laskee lineaarisesti korkeuden kasvaessa 11 km korkeuteen asti ja pysyy sitten samana 20 km korkeuteen asti ([http://en.wikipedia.org/wiki/Barometric\\_formula](http://en.wikipedia.org/wiki/Barometric_formula)). Mallin pitää tietenkin käyttäytyä samalla tavalla. Lämpötilan vähenemä riippuu maan vetovoimasta ja kaasujen ominaisuuksista. Pienet hiilidioksidin osuuden muutokset eivät sitä muuta. Ilmakehän lämpötila korkeudella  $h$  on

$$\begin{aligned} T(h) &= T_0 - Lh & h < 11 \text{ km} \\ T(h) &= T_1 & h > 11 \text{ km} \end{aligned} \quad (4)$$

$T_0$  on ilmakehän lämpötila maanpinnan tasolla.  $L=6.5 \text{ K/km}$  ja  $T_1 = 216.65 \text{ K}$ . (Kuva 2)

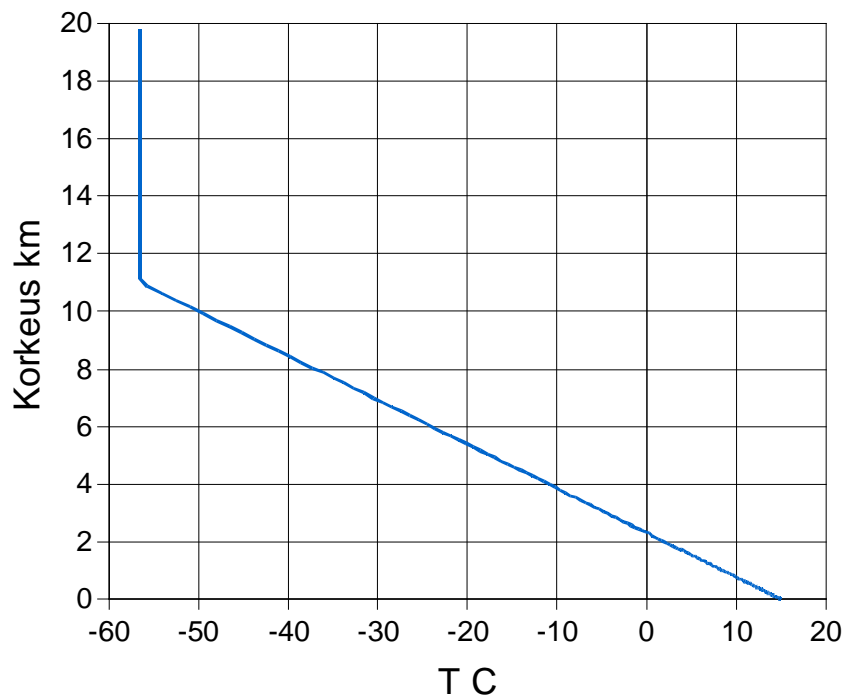
### Ilmakehän paine

Myös ilmakehän paine noudattaa eri kaavoja 11 km korkeuden ala- ja yläpuolella ([http://en.wikipedia.org/wiki/Barometric\\_formula](http://en.wikipedia.org/wiki/Barometric_formula)).

$$\begin{aligned} p(h) &= p_0 \left( \frac{T(h)}{T_0} \right)^{\frac{Mg}{RL}} & h < 11 \text{ km} \\ p(h) &= p_{11000} e^{-\frac{Mg}{RT_1}(h-11000)} & h > 11 \text{ km} \end{aligned} \quad (5)$$

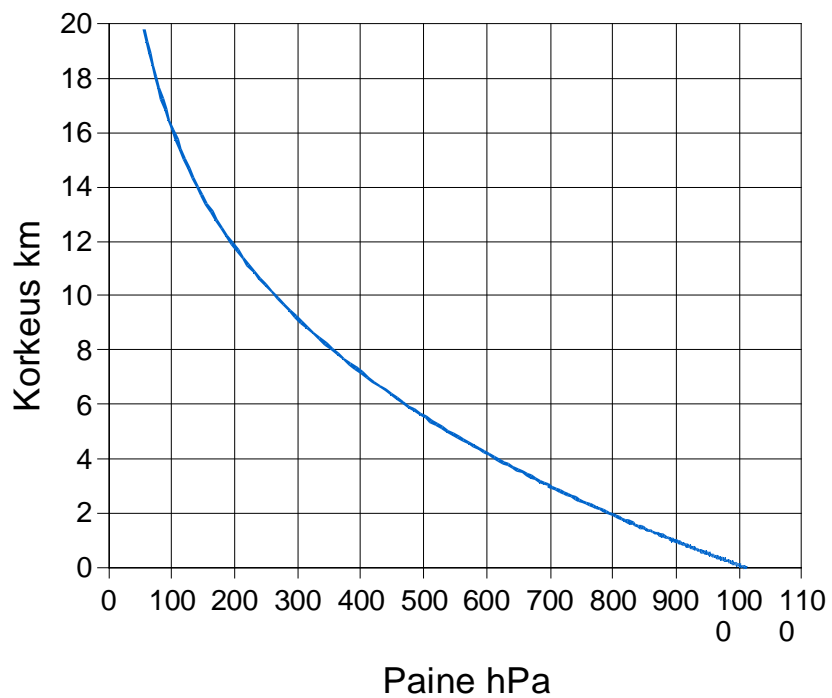
$M$  on ilman moolimassa,  $R$  kaasuvakio ja  $g$  maanvetovoiman kiihtyvyys. (Kuva 3)

## Ilmakehän lämpötila



Kuva 2. Standardi ilmakehän lämpötila eri korkeuksilla

## Ilmakehän painejakautuma



Kuva 3. Standardi ilmakehän painejakautuma eri korkeuksilla

## Maanpinnan lämpösäteily

Maanpinnan säteily  $I_M$  riippuu sen lämpötilasta. Ilmakehän alapinnan ja maanpinnan lämpötilat vaihtelevat paikan ja ajan mukaan ja lienevät harvoin samat. Kuitenkin niiden globaalit keskiarvot lienevät lähellä toisistaan. Tässä laskelmassa keskiarvot oletetaan samoiksi.

Merivesi säteilee lähes mustan kappaleen tavoin ja tässä laskelmassa pinta oletetaan mustaksi.

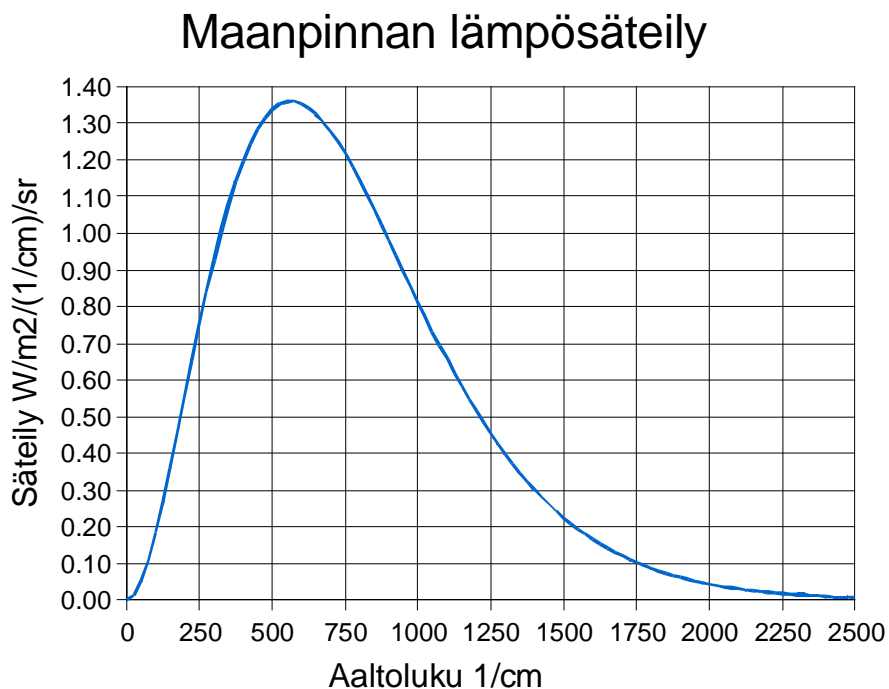
$$I_M = \sigma T_0^4 \quad (6)$$

## Ilmakehän läpäisevä maanpinnan lämpösäteily

Vain osa maanpinnan säteilystä pääsee suoraan ilmakehän läpi avaruuteen. Ilmakehän vaikutus on erilainen säteilyn eri taajuuksilla. Kaavan (6) mukainen mustan pinnan kokonaissäteily on samanlaista eri suuntiin ja se jakautuu eri taajuuksille seuraavasti

$$I_{M,v} = \frac{2h_P}{c^2} \frac{v^3}{e^{kT_0} - 1} \quad (7)$$

$h_P$  on Planckin vakio,  $c$  on valon nopeus ja  $k$  on Boltzmannin vakio.



Kuva 4. Maanpinnan lämpösäteilyn jakautuminen eri aaltoluvuille  $\left( = \frac{v}{c} \right)$ ,  $T_0 = 15 \text{ C}$ .

Maanpinnan säteilystä ilmakehän läpäisee

$$I_{tr} = \int_{v=0}^{\infty} I_{M,v} \left( \int_{2\pi} e^{-\int_0^L k_v x p dL} d\Omega \right) dv \quad (8)$$

L on säteen ilmakehässä kulkema matka.  $k_v$  on hiilidioksidin absorptiovakio taajuudella  $v$ . Se riippuu ilman paineesta ja lämpötilasta.  $x$  on hiilidioksidin mooliosuus kaasussa, joka on käytännössä vakio.  $p$  on paine, joka sekin riippuu korkeudesta ja lämpötilasta (kaava (5)).

Potenssina olevaa integraalia ei voi analyttisesti laskea. Integroidaan se siis numeerisesti eli jaetaan L lyhyisiin pätkiin, joissa integroitavat funktiot korvataan keskikohdan arvolla.

$$I_{tr} = \int_{v=0}^{\infty} I_{M,v} \left( \int_{2\pi} e^{-\sum_{i=1}^N k_{v,i} x_i p_i \Delta L_i} d\Omega \right) dv \quad (9)$$

Suluissa oleva integraali puoliavaruuden yli on myös hankala laskea, koska  $\Delta L_i$  :t ovat eri suunnissa eri pituiset. Mitä enemmän säde poikkeaa pinnan normaalista, sitä pidemmän matkan se joutuu kulkemaan ennen kuin läpäisee kerroksen. Korvataan integraali ekvivalentilla matkalla. Keskimääräinen säde lienee noin  $45^\circ$  kulmassa. Silloin kaava (9) yksinkertaistuu muotoon

$$I_{tr} = \pi \int_{v=0}^{\infty} I_{M,v} e^{-\sum_{i=1}^N k_{v,i} x_i p_i \sqrt{2} \Delta h_i} dv \quad (10)$$

Nyt taajuuden yli voidaan integroida numeerisesti.

Hiilidioksidin absorptiovakion  $k_v$  löytäminen lämpötilan ja paineen funktiona osoittautui vaikeaksi. Syynä lienee se, että kaasujen vaikutus lasketaan nykyään suoraan spektriviivatietojen (yleensä HITRAN) pohjalta. Löysin lopulta netistä Excel tiedoston, jossa absorptiovakiot lasketaan ”Malkmus Statistical Narrow Band Model”-mallin mukaan (<http://carambola.usc.edu/spreadsheets>). Malli perustuu eri lämpötiloissa ja erilaisilla kaasun koostumuksilla mitattuihin läpäisevyyden arvoihin. Mallin parametrien arvot on taulukoitu. Sillä lasketaan suoraan kaasukerroksen läpäisevyys. Mitatut arvot kattavat lämpötilat 300-2900 K 200 K välein.

Malkmusin mallin antamia läpäisevyyden arvoja eri kerroksille voidaan hyödyntää suoraan.

$$\begin{aligned} I_{tr} &= \pi \int_{v=0}^{\infty} I_{M,v} e^{-\sum_{i=1}^N k_{v,i} x_i p_i \sqrt{2} \Delta h_i} dv \\ &= \pi \int_{v=0}^{\infty} I_{M,v} \left( \prod_{i=1}^N e^{-k_{v,i} x_i p_i \sqrt{2} \Delta h_i} \right) dv \\ &= \pi \int_{v=0}^{\infty} I_{M,v} \left( \prod_{i=1}^N \tau_{v,i} \right) dv \end{aligned} \quad (11)$$

## Ilmakehän lämpösäteily avaruuteen

Kaasu säteilee kuin saman lämpöinen musta kappale, mutta säteilyä ”moduloi” taajuuden mukaan kaasun emissiivisyys. Malkmusin malli antaa myös sen. Se lasketaan yksinkertaisesti läpäisevyyden avulla.

$$\varepsilon_{\nu} = 1 - \tau_{\nu} \quad (12)$$

Siten jokainen ohut ilmakerros säteilee ylöspäin teholla

$$I_{1,\nu j} = \varepsilon_{\nu,j} I_{\nu,j} = (1 - \tau_{\nu,j}) I_{\nu,j} \quad (13)$$

Yläpuolinen ilmakehä päästää tietenkin vain osan säteilystä suoraan avaruuteen kuten maanpinnan säteilystä edellä. Kaavaa (11) soveltamalla saadaan

$$I_{1,j} = \pi \int_{\nu=0}^{\infty} I_{\nu,j} (1 - \tau_{\nu,j}) \left( \prod_{i=j+1}^N \tau_{\nu,i} \right) d\nu \quad (14)$$

Laskemalla yhteen kaikkien kerrosten säteilystä läpi päässyt osuus saadaan koko ilmakehän avaruuteen säteilemä lämpöteho.

$$I_1 = \sum_{j=1}^N I_{1,j} \quad (15)$$

## Ilmakehän lämpösäteily maahan

Jokainen ohut ilmakerros säteilee alaspäin samalla teholla kuin ylöspäin. Kerroksen ja maanpinnan välissä oleva ilma päästää suoraan läpi vain osan säteilystä.

$$I_{0,j} = \pi \int_{\nu=0}^{\infty} I_{\nu,j} (1 - \tau_{\nu,j}) \left( \prod_{i=1}^{j-1} \tau_{\nu,i} \right) d\nu \quad (16)$$

Laskemalla jälleen yhteen kaikkien kerrosten säteilystä läpi päässyt osuus saadaan koko ilmakehän maahan säteilemä lämpöteho.

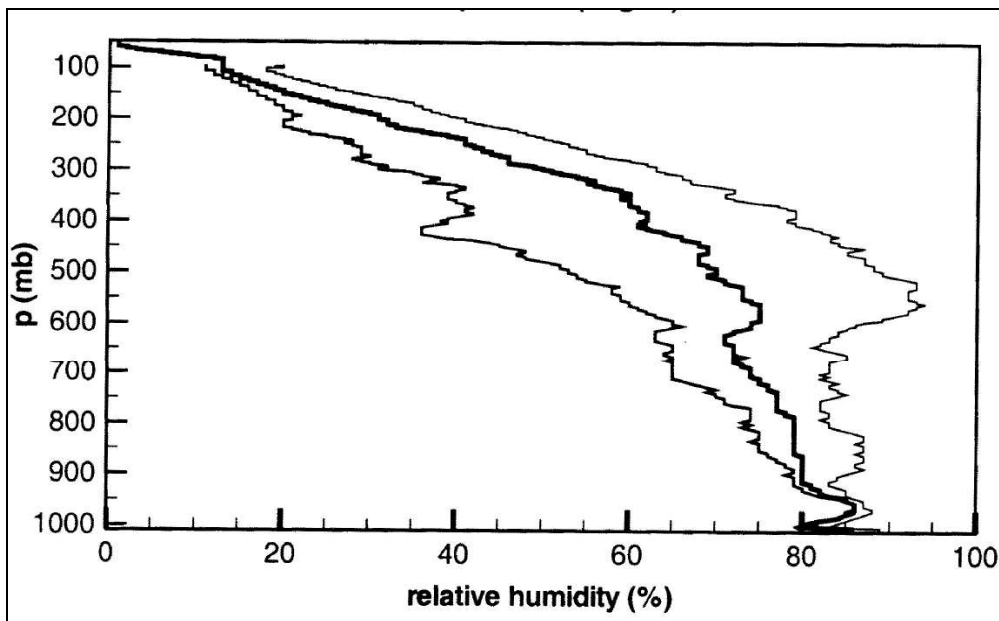
$$I_0 = \sum_{j=1}^N I_{0,j} \quad (17)$$

## Ilmakehän koostumus

Tämän laskelman ilmakehä kirkas. Se ei sisällä mitään hiukkasia tai aerosoleja eikä myöskään pilviä. Hiilidioksidin ja vesihöyryn lisäksi mukana ei ole muita kasvihuonekaasuja kuten metaani, koska tarkoituksena on tutkia pelkästään hiilidioksidin lisääntymisen vaikutusta.

Hiilidioksidi on maanpinnan lähellä olevaa rajakerrosta lukuun ottamatta hyvin sekoittunut troposfääriin. Siksi sen pitoisuus voidaan mallittaa yksinkertaisesti vakiona. Nykyään ilmakehässä on hiilidioksidia 380 ppm. Esiteollisena aikana pitoisuus oli noin 280 ppm.

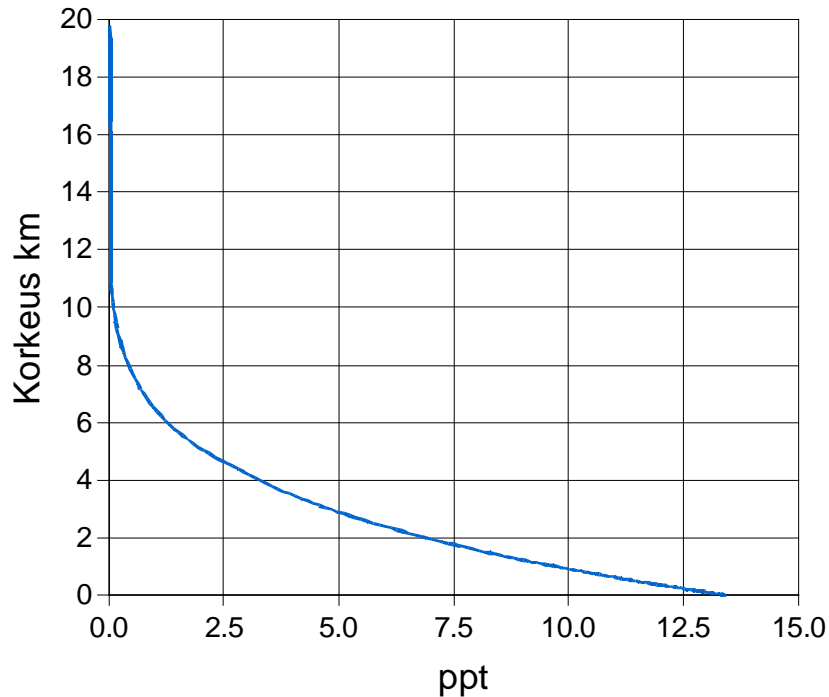
Vesihöyryn jakautuminen on paljon vaikeampi asia. Se vaihtelee maantieteellisesti ja ajallisesti niin paljon, että ilmakehän keskimääräistä kosteusjakautumaa ei edes tiedetä. Suurin osa maapallosta pinnasta on merta ja Aurinko lämmittää eniten päiväntasaajan seutua. Siksi edustava paikka olisi jossain trooppisella merellä. Löysin Bengalin lahden puolen vuoden mittaustulokset. Kuvassa 5 on esitetty keskiarvo ja vaihteluväli. Korkeus on esitetty paineen avulla. Mittasin kuvasta suhteellisen kosteuden keskiarvot (4 pistettä => 3 suoraa) ja muutin ne pitoisuuksiksi (kuva 6). Tarvittavat kaavat löytyvät osoitteesta (<http://hurri.kean.edu/~yoh/calculations/moisture/Equations/>).



Kuva 5. Ilman suhteellinen kosteus, keskiarvo ja vaihteluväli, Bengalin lahdella puolen vuoden mittauksissa.

G. S. Bhat & al., Vertical thermal structure of the atmosphere during active and weak phases of convection over the north Bay of Bengal: Observation and model results, CURRENT SCIENCE, VOL. 83, NO. 3, AUGUST 2002

## Vesihöyrypitoisuus



Kuva 6. Ilmakehän vesihöyrypitoisuus Bengalin lahdella kuvasta 5 laskettuna.

### Ilmankosteuden riippuvuus lämpötilasta

Hiilidioksidin ilmastoa lämmittävä vaikutus ei riipu pelkästään hiilidioksidin määrästä. Päättelyketju menee seuraavasti:

1. Hiilidioksidin lisääntyminen nostaa lämpötilaa
2. Lämpimämpi ilma voi sisältää enemmän vesihöyryä
3. Vesihöyryn määrä ilmassa kasvaa
4. Lisääntynyt vesihöyry nostaa lämpötilaa

Kuulostaa loogiselta ja varmaan jonkinlainen kytkentä onkin olemassa, mutta ilmakehä ei nytkään ole vesihöyryn kyllästämä (kuva 5). Miten lämpötilan nousu vaikuttaa vesihöyryn määrään ja jakautumiseen ilmakehässä, ei tiedetä, sillä siihen vaikuttaa mm. tuulet.

On esitetty ainakin kolme erilaista vaikutusta.

1. Lukemissani jutuissa ja artikkeleissa yleisin näkemys on ollut, että lämpötilan nousu vaikuttaa ilmankosteuteen 1 – 2 korkeuteen asti.
2. Erityisesti ilmastomallittajilla tuntuu olevan käsitys, että ilmankosteus lisääntyy läpi koko troposfääriin.
3. R. Linzen on esittänyt, että kosteuden lisääntyminen alätroposfäärissä lisää pilvisyyttä ja sadantaa niin, että ylätroposfääri itseasiassa kuivuu.
4. Minusta näyttää, että ilmankosteuden vaihtelu pienenee ylöspäin mentäessä (esim. kuva 5). Siitä voisi päätellä, että myös lämmön nousun vaikutus vähenee ylöspäin.

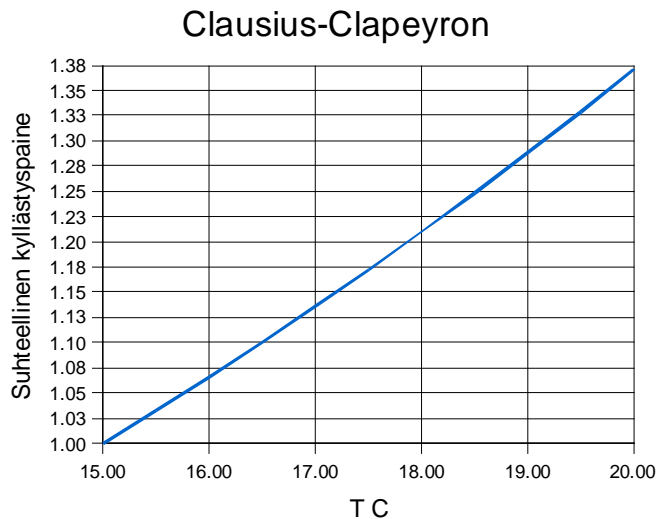


Esitetyt vaikutusmekanismit kuvaavat vain muutoksen suuntaa määrittelemättä sen suuruutta. Yksinkertaisin arvio on tietenkin lineaarinen. Oletan tässä laskelmassa, että ilman suhteellinen kosteus merenpinnan tasolla muuttuu suoraan verrannollisena kyllästyspaineeseen.

Clausius-Clapeyron-yhtälö antaa vedenpinnan yläpuolella olevan ilman kyllästyspaineen  $p_s$  lämpötilariippuvuuden.

$$\ln \frac{p_s}{p_{s0}} = 6808 \left( \frac{1}{T_{C0}} - \frac{1}{T} \right) - 5.09 \ln \frac{T}{T_{C0}}, \quad T_{C0} = 273.13 \text{ K} \quad (18)$$

Kuvan 7 mukaan yhden asteen lämpötilan nousu nostaa vesihöyryn kyllästyspainetta 7 % merenpinnan tasolla.



Kuva 7. Vesihöyryn suhteellinen kyllästyspaine lämpötilan funktiona

Eri vaikutusmekanismien mallittaminen vaatii vielä lisää oletuksia.

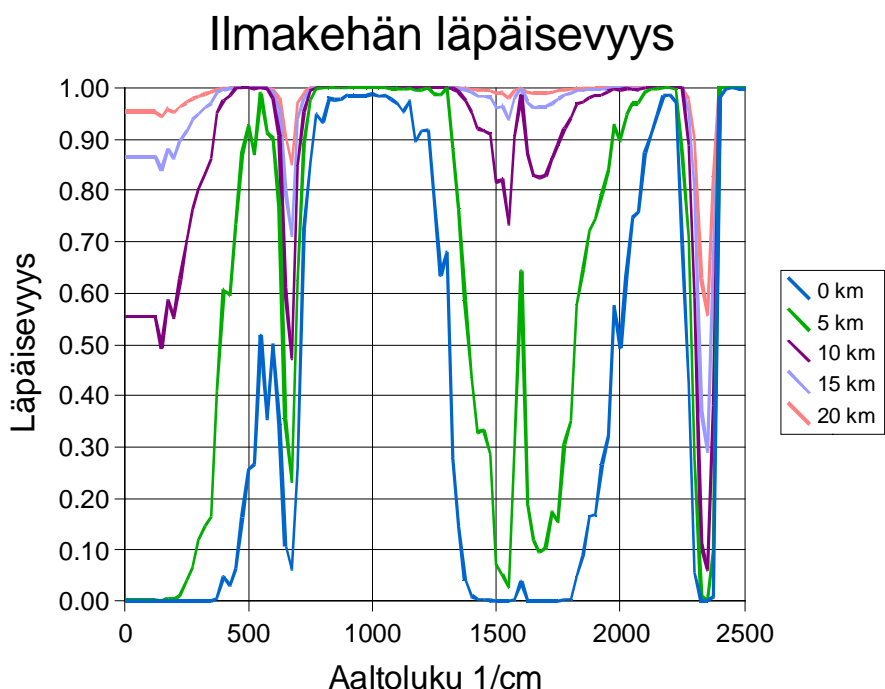
1. Oletetaan jouheva muutos. Ilmankosteuden kasvu pienenee lineaarisesti nollaan merenpinnan tasolta 4 km korkeuteen noustaessa. Silloin lämpötilan nousun vaikutus on 50 % vielä 2 km korkeudessa.
2. Kerrotaan ilman suhteellinen kosteus kyllästyspaineen suhteellisella muutoksella 11 km korkeuteen asti.
3. En saanut selville, miten paljon ylätroposfääri kuivuu.
4. Ilmankosteuden kasvu pienenee lineaarisesti nollaan merenpinnan tasolta 11 km korkeuteen noustaessa.

## Lämpötilan ratkaiseminen

Nyt on koossa kaikki tarvittava tasapainoyhtälön (3) ratkaisemiseen. Numeerista integrointia varten ilmakehän malli jaettiin 200 kerrokseen. Kerrosten paksuus kasvaa geometrisessa sarjassa. Alin kerros on 5 m paksu ja ylin noin 450 m. Maanpinnan lämpötilaa ei tietenkään saa suljetussa muodossa ratkaistua, mutta sen voi etsiä suorahaululla halutulla tarkkuudella. Pysäytysehtona käytettiin  $\Delta T_0 < 0.01$  K.

## Ilmakehän käyttäytyminen

Ymmärtääkseni paremmin, miten hiilidioksidi vaikuttaa ilmakehässä, piirsin erilaisia kuvaajia. Tässä pari.



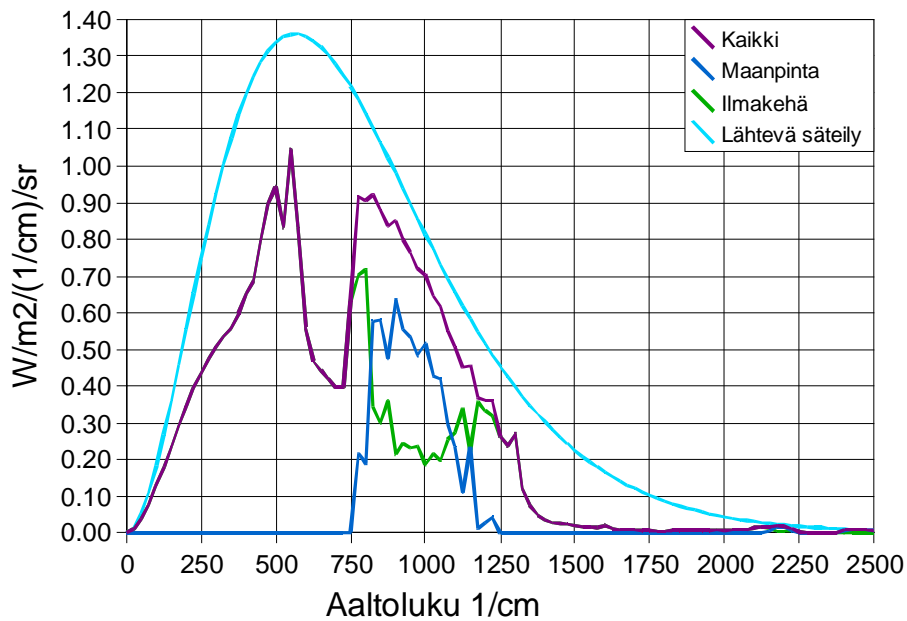
Kuva 8. Eri korkeuksien olosuhteissa olevan 100 m paksun ilmakerroksen läpäisevyys

Kuvaan 8 on piirretty 100 m paksujen ilmakerrosten läpäisevyys eri korkeuksia vastaavissa olosuhteissa. Hiilidioksidin aiheuttamat kuopat aaltoluvuilla 667 1/cm ja 2350 1/cm näkyvät selvästi. Samoin infrapuna-alueen ”ikkuna” välillä 700 1/cm ja 1500 1/cm, joka vaimentaa avaruudesta tulevaa säteilyä vain vähän.

Maan lämpösäteily avaruuteen on mielenkiintoinen (kuva 9). Maanpinnasta pääsee säteilyä läpi vain ”ikkunan” kohdalta. Kaikki muu on pelkkää ilmakehän lämpösäteilyä.

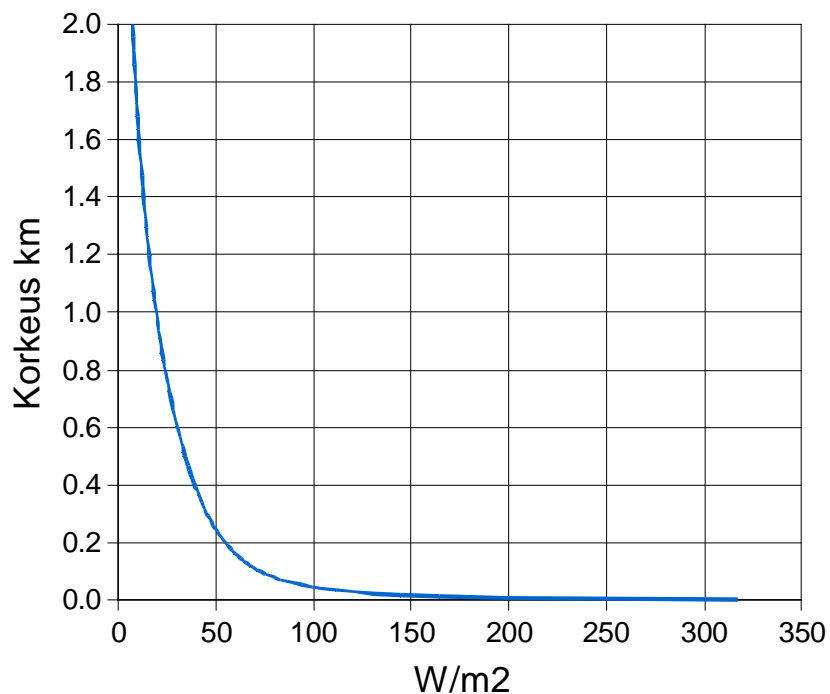
Ilmakehä absorpoo nopeasti maanpinnan lämpösäteilyn. Vastaavasti maanpintaan osuva ilmakehän lämpösäteily tulee varsin alhaalta. 80 % säteilystä on peräisin alle 200 m korkeudelta (kuva 10).

## Maan säteily avaruuteen



Kuva 9. Maan säteily avaruuteen aaltoluvun mukaan. Maanpinnasta lähtevä säteily on lisätty vertailu kohdaksi.

## Ilmakehän säteily alaspäin



Kuva 10. Ilmakehän eri korkeuksilta maanpintaan kohdistama säteilyteho.

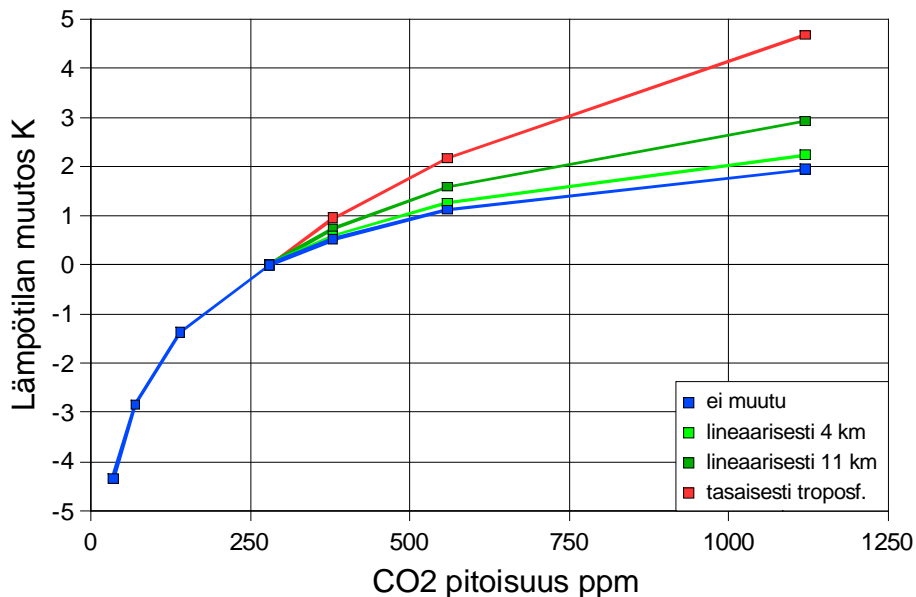
## Tulokset

Ensimmäiseksi kokeilin mallia ilman hiilidioksidia ja vesihöyryä. Maanpinnan lämpötilaksi tuli 253.7 K, niin kuin pitikin, joten ilmeisesti ratkaisuosuus toimii.

Nykyisellä hiilidioksidipitoisuudella, 380 ppm, maanpinnan lämpötilaksi tuli 284.0 K. Se jää 4 K alle virallisen keskilämpötilan. Tulokseen vaikuttaa tietenkin moni asia, mutta todennäköisesti eniten se, että mallin ilmakehä on kirkas. Siinä ei ole aerosoleja tai pilviä estämässä lämmön säteilemistä avaruuteen, mutta toisaalta kaikki mahdolliset tekijät ovat mukana lähtötiedoissa estämässä Auringon säteilyä maanpintaan. Joka tapauksessa ilmakehän lämmitysvaikutuksen vaje on vain noin 10 %, joten malli on riittävän tarkka hiilidioksidin vaikutusten tutkimiseen.

Kuvassa 11 on esitetty saadut tulokset. Vertailukohtaksi on valittu esiteollista aikaa vastaava tilanne, hiidioksidipitoisuus 280 ppm. Sininen käyrä on perustilanne, jossa ilmakehän kosteus ei muutu lämpötilan noustessa. Se on laskettu useammalla hiilidioksidipitoisuuden arvolla, jotta saturaatioilmiö tulee selvästi näkyviin. Muut käyrät vastaavat edellä kuvattuja malleja lämpötilan vaikutuksesta ilmakehän vesihöyrypitoisuuteen. Taulukossa 1 on esitetty vastaavat lämpötilan muutokset nykytilanne vertailukohtana.

### H<sub>2</sub>O pitoisuus muuttuu lämpötilan mukana



Kuva 11. Lämpötilan muutos maanpinnan tasolla verrattuna esiteolliseen aikaan

Taulukko 1. Lämpötilan muutos maanpinnan tasolla verrattuna nykytilanteeseen

	CO <sub>2</sub>		
	280	560	1120
H <sub>2</sub> O			
ei muutu	-0.53	0.59	1.42
lineaarisesti 4 km	-0.60	0.67	1.64
lineaarisesti 11 km	-0.73	0.85	2.19
tasaisesti troposf.	-0.95	1.22	3.73

IPCC:n mukaan maapallon keskilämpötila on noussut  $0.6 \pm 0.2$  C sadan vuoden aikana. Lasketut tulokset mahtuvat vaihteluväliin lukuun ottamatta viimeistä. Kolme ensimmäistä vaikutusmekanismia käyttäytyvät muutenkin samalla lailla. Hiilidioksidipitoisuuden kaksinkertaistuminen esiteollisesta ajasta ei nosta lämpötilaa edes asteella eikä nelinkertaistuminenkaan ole katastrofi. Viimeinen vaikutusmekanismi eli tasaisesti läpi troposfäärin tapahtuva vesihöyrypitoisuuden nousu nostaa lämpötilaa selvästi enemmän.

### **Yhteenveto**

Tämän laskelman mukaan hiilidioksidin lisääntyminen ilmakehässä ei johda liialliseen lämpenemiseen, koska hiilidioksidi ei saturaation vuoksi pysty absorboimaan merkittävästi lisää säteilyä. Ellei samalla troposfäärin yläosan vesihöyrypitoisuus kasva merkittävästi.

Oleellinen tekijä on siis vesihöyry. Pilvien mallittaminen ja sadanta eivät oikein vielä suju nykyisillä ilmastomalleilla. Silloin tuskin vesihöyrynkään vertilaalijakautuma on kohdallaan. Tämän laskelman perusteella ilmastomallien ennusteet ovat kuitenkin hyvin herkkiä sille.