

# Epäpuhtauksien leviäminen ilmakehässä

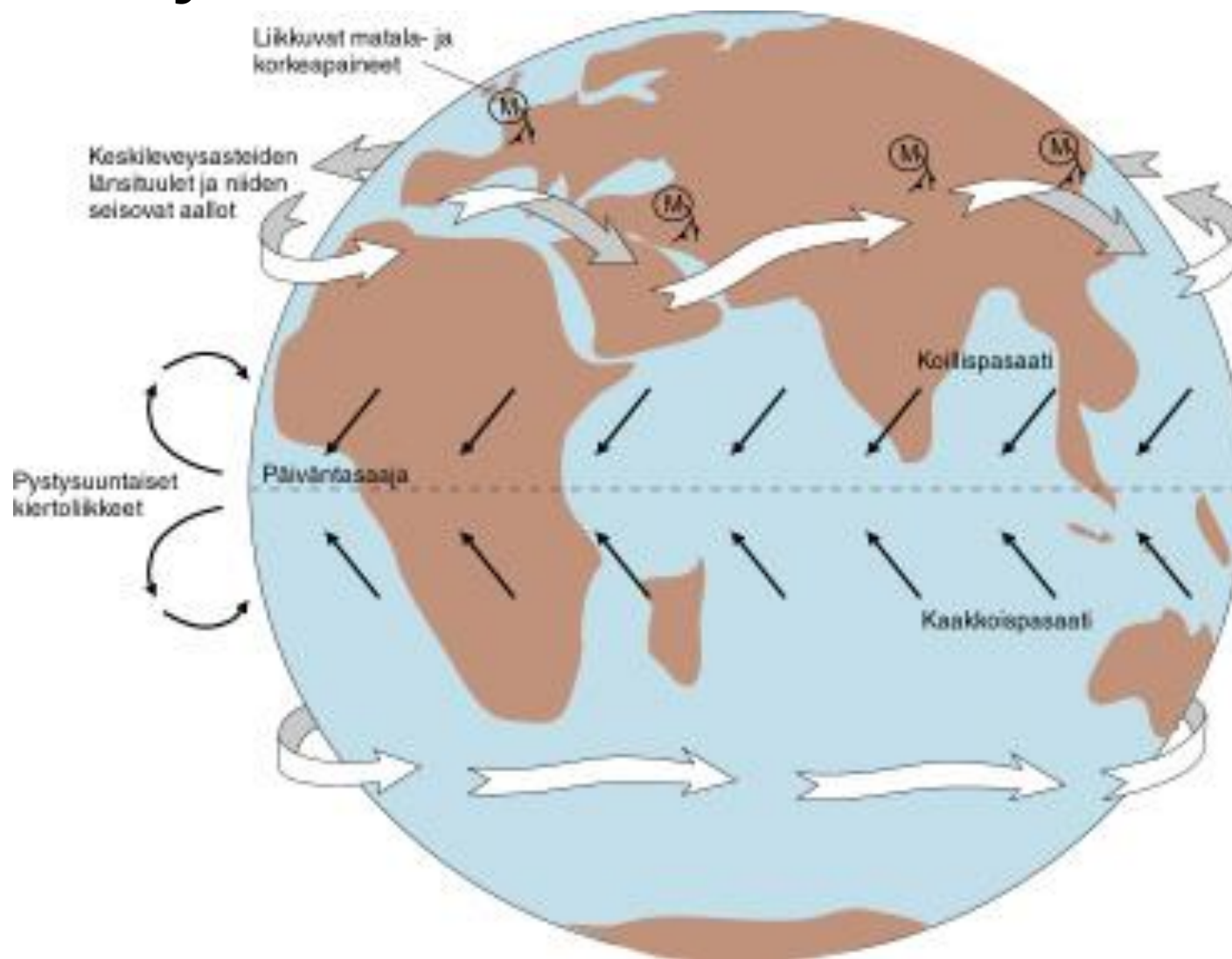
Yleinen kiertoliike  
Kulkeutuminen  
Sekoittuminen  
Ilmakehän stabiilius



Tämä teos on lisensoitu Creative Commons Nimeä-EiKaupallinen-JaaSamoin 4.0 Kansainvälinen -lisenssillä.  
Tarkastele lisenssiä osoitteessa <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Kaupallinen käyttö sallittu vain KiertotalousAMK-hankkeen 2018–2020 (OKM rahoituspäätös OKM/302/523/2017) partnereille.

# Ilmakehän yleinen kiertoliike



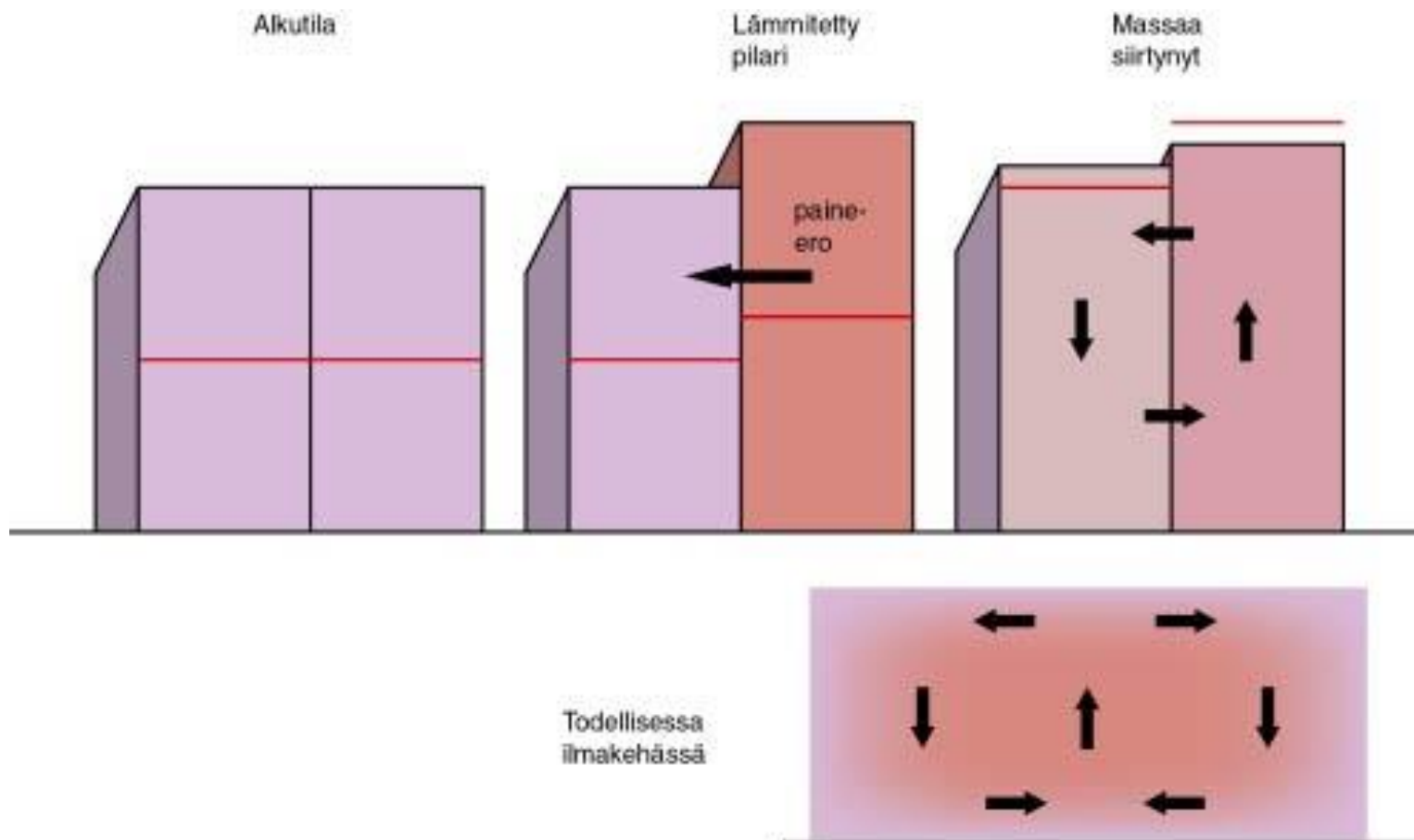
# Yleinen kiertoliike

- Energia auringonsäteilystä
  - Jakautuu epätasaisesti maan (ja meren) pinnalle
  - Päiväntasaajalle paljon enemmän energiaa kuin napa-alueille
- Ulossäteilyä tapahtuu koko pallon pinnalta.
- Syntyy lämpötilaeroja, joiden tasoittamiseksi lämpöä siirtyy päiväntasaajalta napoja kohti.
- Maapallon pyörimisen seurauksena virtaussysteemeistä tulee vyöhykkeellisiä
- Mantereitten ja merien epätasainen jakautuminen

# Keskileveysasteiden länsituulet

- Mutkittelevat aaltomaisesti
- Siirtävät lämpöä napoja kohti
- Muutaman tuhannen kilometrin kokoisia matalapaineen solia ja korkeapaineen selänteitä
- Kymmenien tuhansien kilometrien kokoisia aaltoja
  - Aaltojen rakenne näkyy pitkäaikaisilla keskiarvokartoilla
  - Erottavat parhaiten talvella.
  - Sijaintiin vaikuttavat suurten vuoristojen sekä lämpimien merivirtojen sijainti.

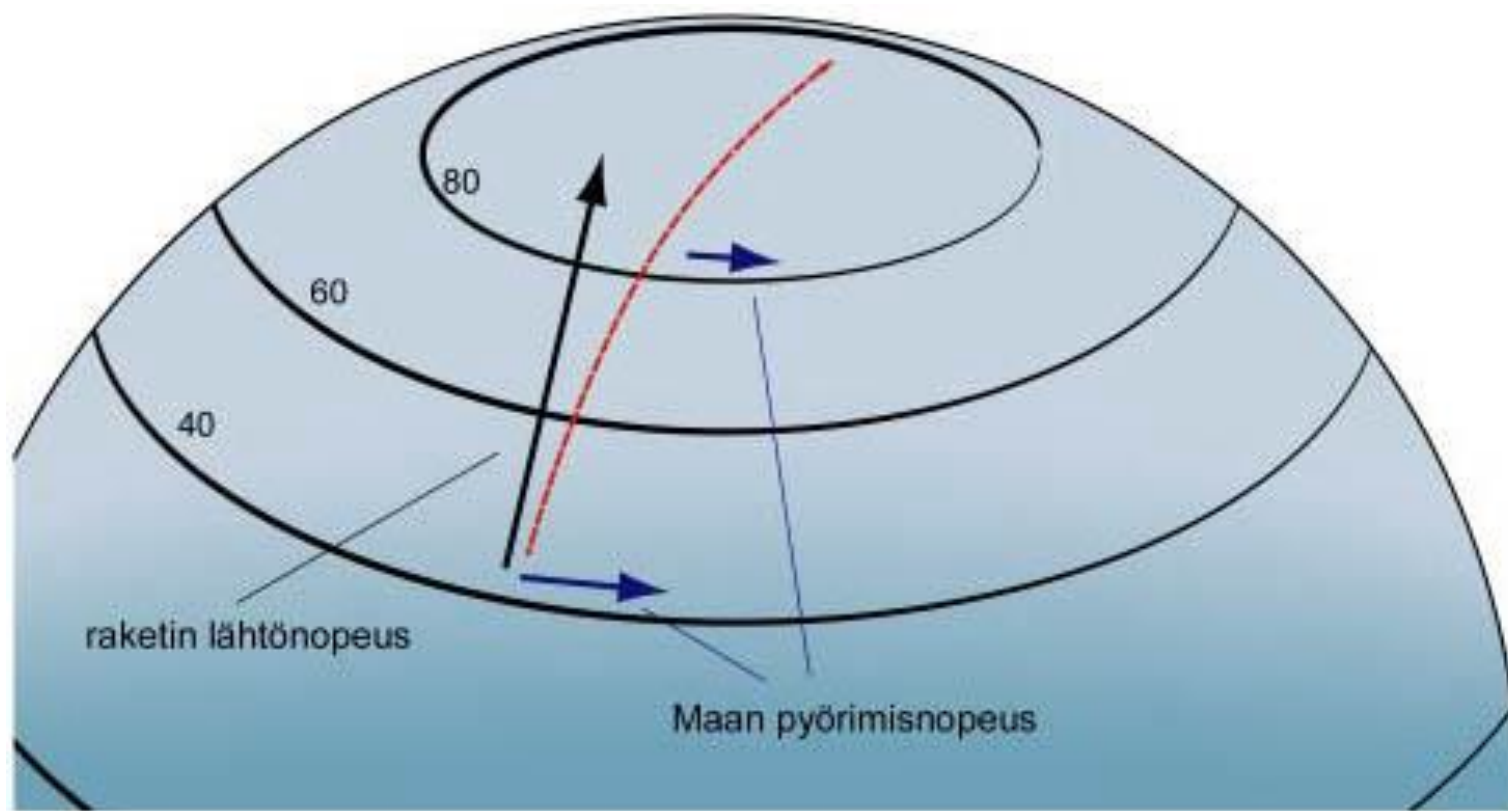
# Lämmityseroista johtuvat pystyliikkeet



# Coriolisvoima

- Tuulen aiheuttaa ilmakehään muodostunut paine-ero, joka saa ilman liikkeelle korkeammasta paineesta matalampaa kohti
- Paine-erot eivät kuitenkaan tasaannu nopeasti
  - Missä syy?

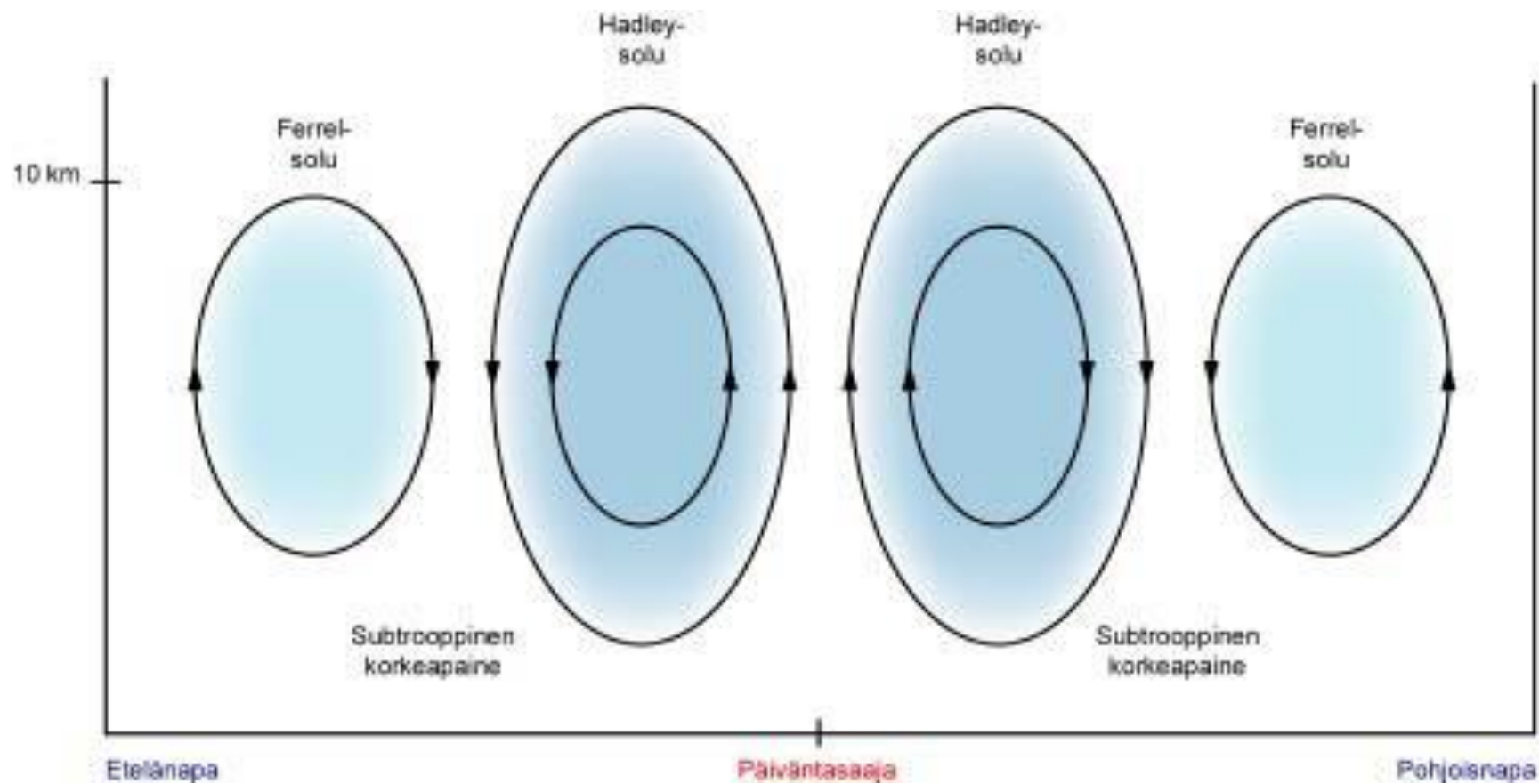
# Coriolisvoima



# Coriolisvoima

- Koordinaatistosta riippuva näennäisvoima
  - Maapallo pyörii ja me olemme mukana pyörivässä koordinaatistossa
- Kääntää virtauksen pohjoisella pallonpuoliskolla oikealle (ja eteläisellä vasemmalle)
  - Päiväntasaajalla coriolisvoima = 0
- Seurauksena on matalapaineen pyörimissuunta vastapäivään (pohjoisella pp)
  - Koskee myös trooppisia hirmumyrskyjä

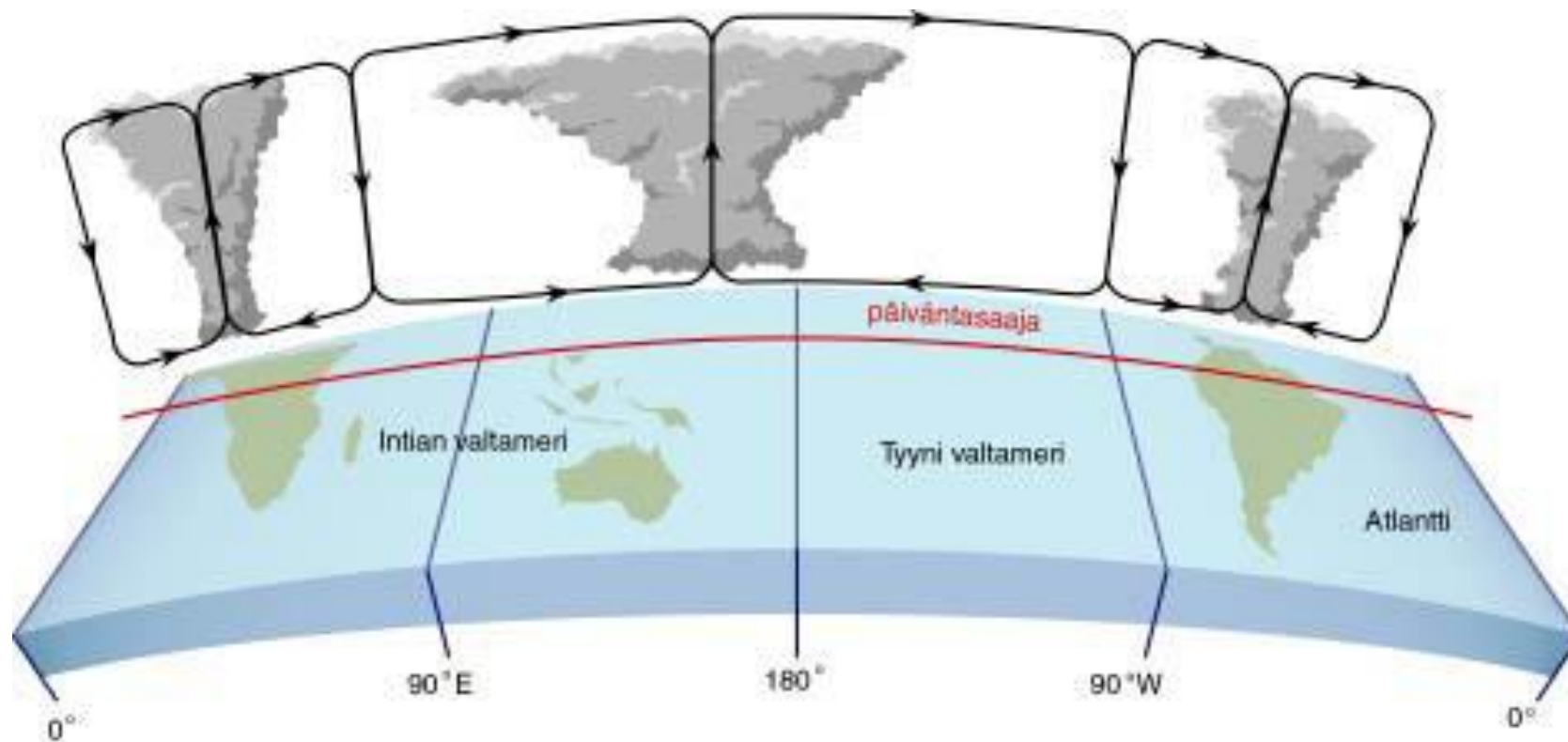
# Hadleyn solu ja Ferrel-solu



# Pasaatituulet

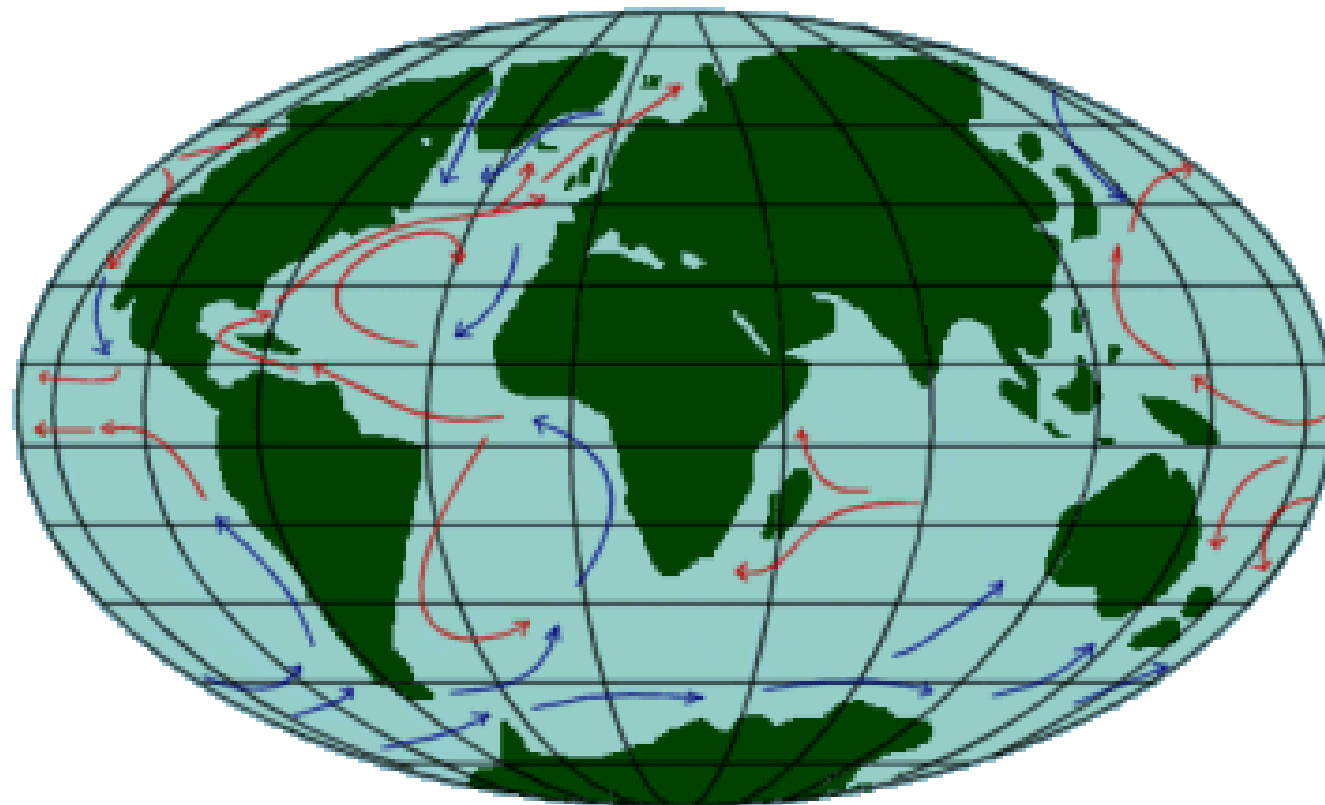
- Hadley-solun päiväntasaajaa kohti suuntautuvat tuulet kääntyvät kohti länttä
  - Pohjoinen pp pohjoistuuli kääntyy oikealle => koillispasaati
  - Eteläinen pp etelätuuli kääntyy vasemmalla =>kaakkoispasaati
- Pasaativyöhyke liikkuu vuodenaikojen mukaan kesäpallonpuoliskolle hiukan päiväntasaajan pohjois- tai eteläpuolelle
  - monsuunisateet

# Walker-kiertoliike

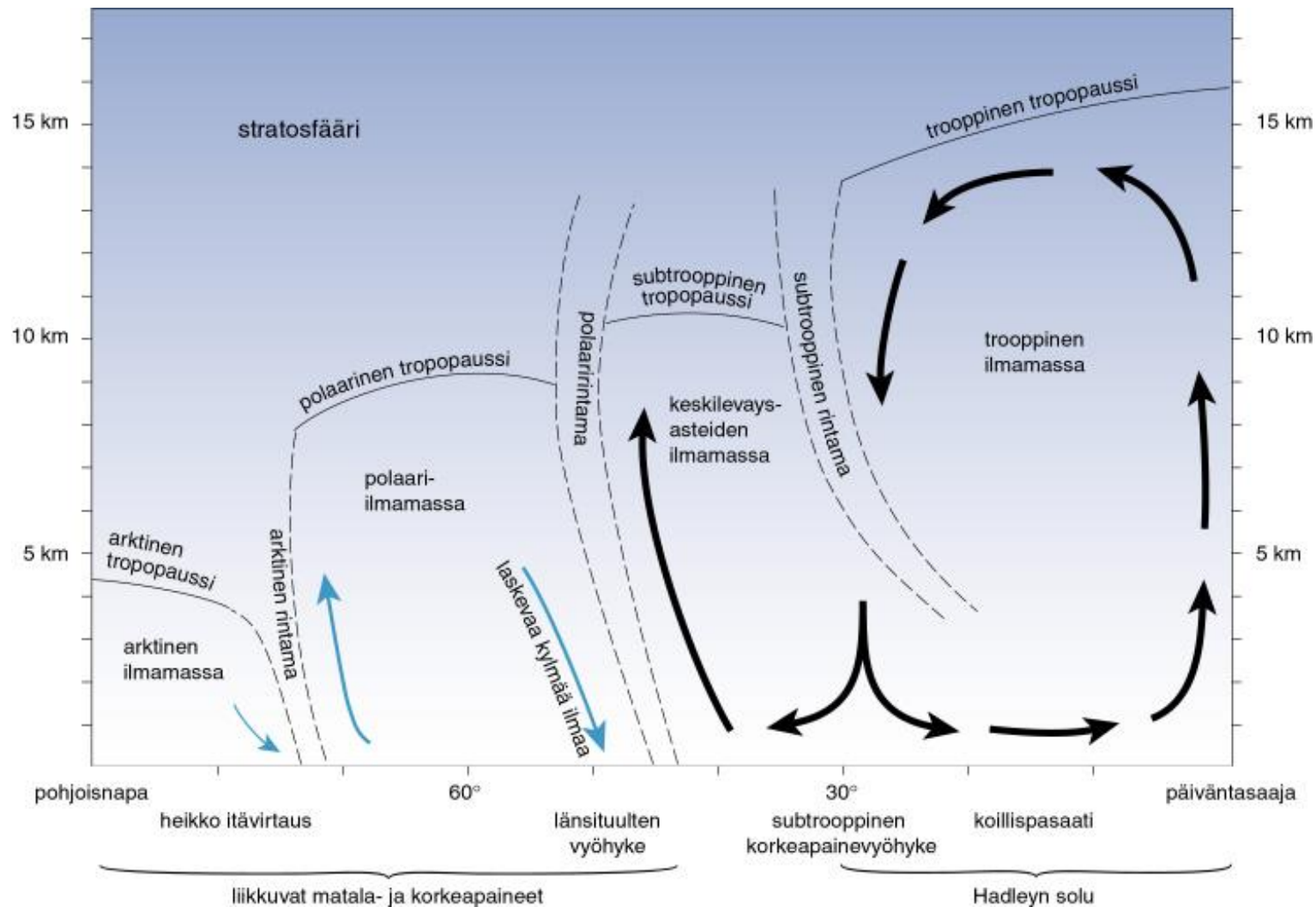


El Niño –ilmiö johtuu Walker-kiertoliikkeen häiriöistä

# Merivirrat



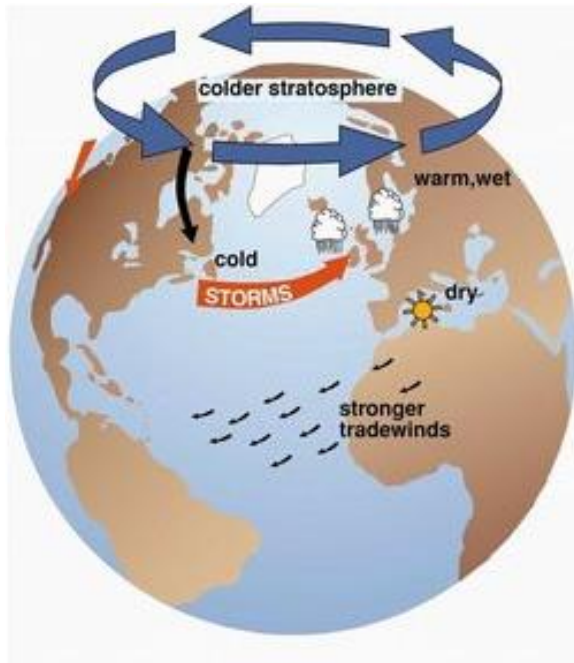
# Ilmamassat



# Stratosfäärin kiertoliike

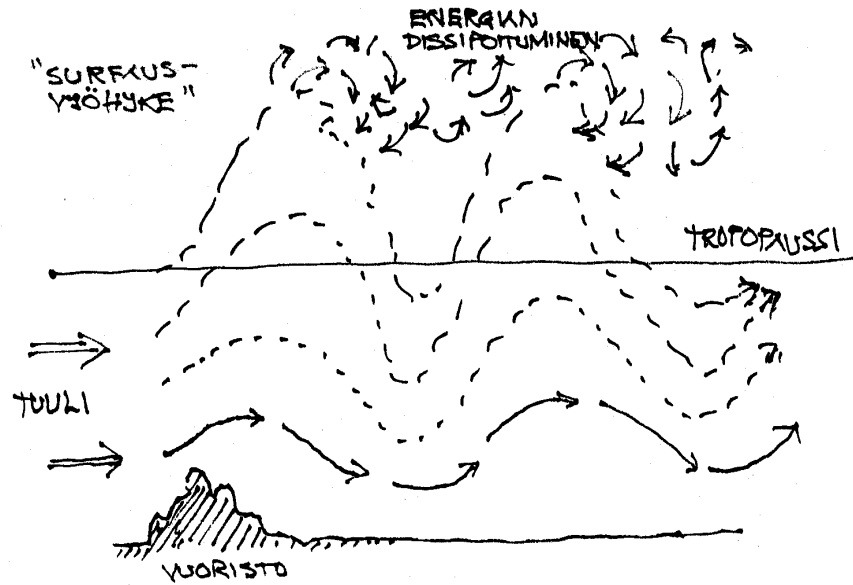
- Yksi etelä-pohjoissuuntainen solu kullakin pallonpuoliskolla
- Gravitaatioaallot
- Polaaripyörre

# Polaaripyörre



- Polaaripyörre syntyy stratosfäärissä lämpötilagradientin ja coriolisvoiman vaikutuksesta
- Voimakkaampi talvipuolella
- Eristää napaseutujen ilman (stratosfäärissä)

# Gravitaatioaallot



- Erytisesti pohjoisella pallonpuoliskolla vuoristot aiheuttavat häiriöitä lännestä itään virtaaviin tuuliin

Vuoret troposfäärissä, mutta aaltojen energia siirtyy myös stratosfääriin

# Epäpuhtauksien leviäminen

- Kaksi mekanismia eri mittakaavoissa:
  - Kulkeutuminen (ilmavirtaukset, tuuli)
  - Sekoittuminen (turbulenssi)
- Pitkäikäisimmät yhdisteet ehtivät levitä (lähes) tasaisesti koko troposfääriin ja jopa stratosfääriin
- Lyhytikäisten pitoisuudet vaihtelevat paikallisesti
  - Suurimmillaan lähteen läheisyydessä
  - Pitoisuus riippuu etäisyydestä ja tuulen suunnasta ja säätilasta

# Tuuli

- Tuulen virtaus ei ole tasaista (laminaarista)
- Koostuu virtauksen pääsuunnan (x) ja poikittaisten komponenttien (y ja z) yhteisvaikutuksesta
- Pääsuunta vaakatasossa, pystykomponentti aina huomattavasti pienempi
- Puuskittaista (nopeus ja suunta vaihtelee)
  - Puuskittaisuuden määrä riippuu ilmakehän vakaudesta (säätilanteesta)

# Geostrofinen tuuli

- Painegradientin (paine-eron) aiheuttama tuuli
- Ilma pyrkii virtaamaan kohti matalampaa painetta
- Koriolisvoima kääntää sitä, kunnes saavutetaan tasapaino
- Lopputuloksena ilma virtaa isobaarien (paineen samanarvonkäyrien) suuntaisesti
- Vapaassa ilmakehässä (rajakerroksen yläpuolella) tuuli on lähes geostrofinen
  - Päiväntasaajan lähellä geostrofinen tuulilaki ei toimi

# Isobaarit

Kuvituskuva netistä löytyy hakusanalla ”isobars”.

Isobaarit ovat saman paineen viivoja.

# Tuuli rajakerroksessa

- Rajakerroksessa kitka ja turbulenssi muuttavat tilannetta ja tuuli kääntyy hiukan matalapaineen keskusta kohti
  - Merellä vähemmän, maalla enemmän
  - Rajakerros ilmakehässä = kerros, jossa maanpinnan kitka vaikuttaa ilman virtaukseen
- Tuulen nopeus on alempi maanpinnan lähellä kitkan ansiosta
- 10 m korkeudella maanpinnasta:
  - Suunta eroaa geostrofisesta 10-30°
  - Nopeus 10-30 % alempi

# Terminen tuuli

- Lämpötilaerojen aiheuttama
- Suunta lämpimästä kylmempään
  - Koriolisvoima vaikuttaa tässäkin
- Vaikea havaita troposfäärissä
  - Näkyy yleisessä kiertoliikkeessä
- Merkittävä stratosfäärissä
  - Aiheuttaa polaaripyörteen navan ympärille talvipallonpuoliskolla

# Ilmakehän stabiilius

- Liittyy lämpötilajakaumaan ilmakehässä
- Vaikuttaa voimakkaasti pystysuuntaiseen sekoittumiseen
- Stabiilissa (vakaassa) ilmakehässä pystyliikkeet vähäisiä
- Labiilissa (epävakaassa) ilmakehässä voimakkaita pystyliikkeitä

# Käsitteitä

- Ilmapaketti
  - Kuvitteellinen pieni ilmamassan osa (ilmapallo ilman kuorta)
- Adiabaattinen (tai isokalorinen) prosessi
  - lämpöopissa tapahtuma, jossa lämpöä (tai myöskään massaa) ei siirry tapahtuman kohteena olevaan aineeseen tai poistu siitä.
  - adiabaattisen prosessin lämpöenergian määrä on vakio
- Kuiva-adiabaattinen
  - Ilmassa oleva kosteus ei muuta olomuotoaan (höyry/vesi/jää)
- Kosteaa-adiabaattinen
  - Olomuodonmuutoksia tapahtuu
  - Lämpöä vapautuu tai sitoutuu olomuodonmuutoksissa

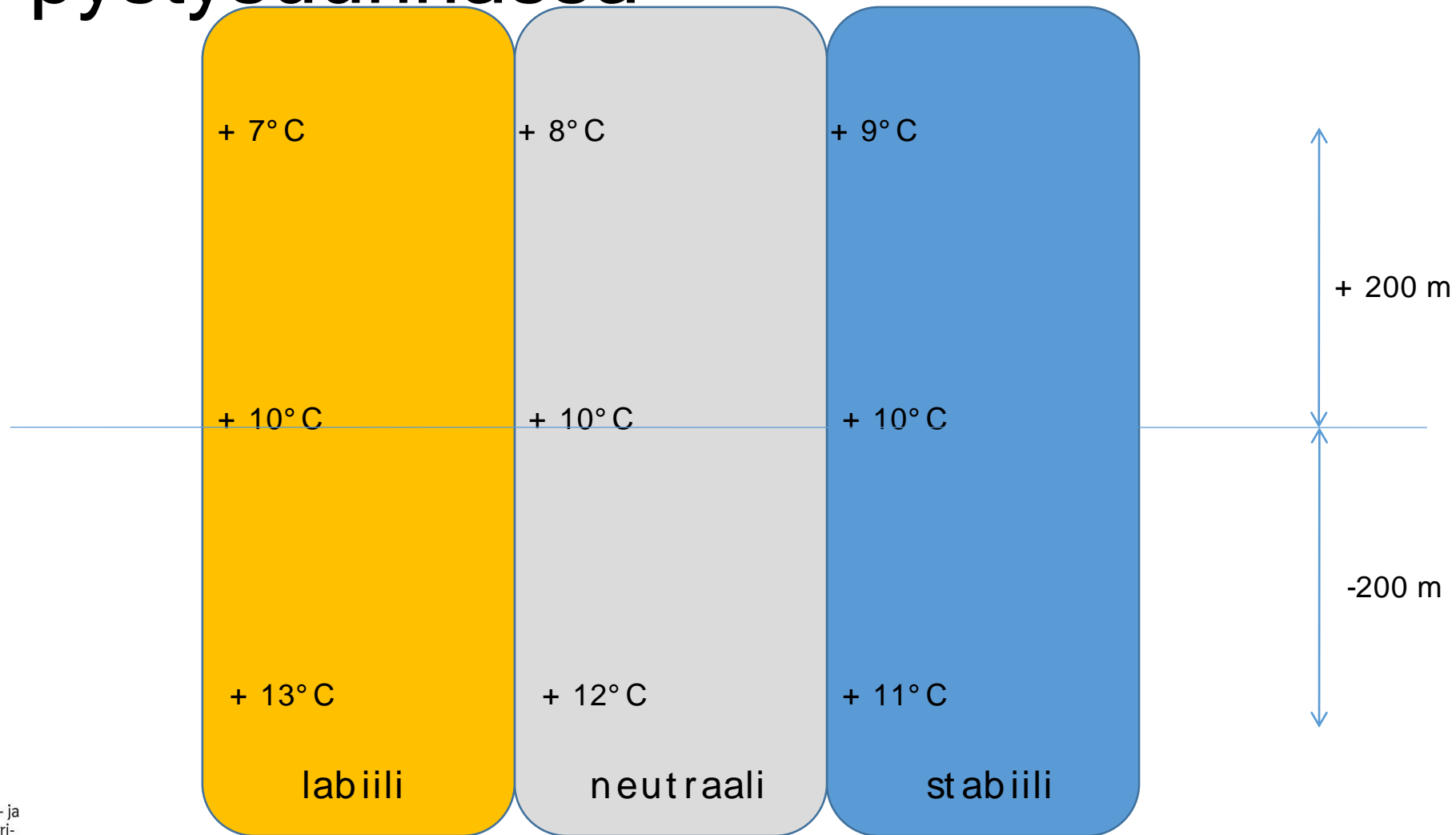
# Adiabaattinen lämpötilan muutos pystyliikkeissä

- Kuvitellaan ilmapaketti, joka liikkuu ilmakehässä pystysuunnassa.
- Paine laskee aina ylöspäin mentäessä.
- Jos paketti liikkuu ylös, se tulee pienemmän paineen alueelle.
  - Pienemmässä paineessa paketti laajenee.
    - Kaasun tilavuus riippuu voimakkaasti paineesta.
- Laajentuessaan paketti tekee työtä, johon tarvittavan energian se saa omasta lämpöenergiastaan.
- Ilmapaketti jäähtyy.
- Vastaavasti alaspäin liikkuva ilmapaketti puristuu kokoon ja lämpenee.
- Ilmakehässä kuiva-adiabaattinen lämpötilagradientti on  $0,98 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ 
  - Lämpötila muuttuu siis noin yhden asteen sadalla metrillä

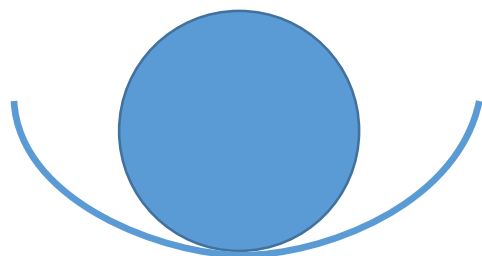
# Ympäröivän ilman vaikutus

- Kaasujen tilanyhtälö  $pV=nRT$  (tai  $V=nRT/p$ )
  - Kaasun tilavuus (ja tiheys)  $V$  riippuu siis paineesta, kaasun ainemäärästä ja lämpötilasta,  $R$  on vakio
- Samalla korkeudella ilmakehässä vallitsee sama paine -> kaasun tiheys riippuu sen lämpötilasta
- Jos ilmapaketti on lämpimämpi kuin ympäröivä ilma, sen tiheys on pienempi ja se pyrkii ylöspäin.
- Ympäröivää ilmaa kylmempi ilmapaketti on tiheämpi ja pyrkii alaspäin.

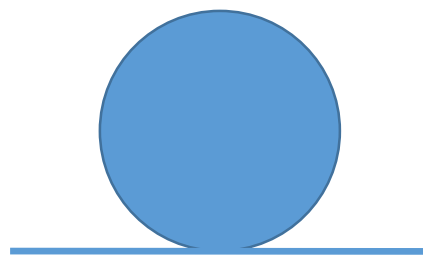
# Ilmapaketin ja ympäröivän ilman lämpötila ilmapaketin liikkuess pystysuunnassa



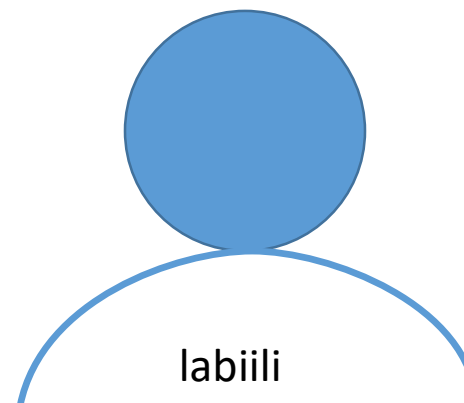
# Stabiili, neutraali ja labiili



stabiili



neutraali



labiili

# Stabiili, neutraali ja labiili ilmakehä

- Neutraalissa ilmakehässä lämpötilan pystyjakauma noudattaa adiabaattista jakaumaa
  - Lämpötila laskee  $1\text{ °C}/100\text{ m}$  ylöspäin mentäessä
  - Paikaltaan pystysuuntaan liikahtanut ilmapaketti asettuu uuteen paikkaansa tai jatkaa matkaansa esim. tuulen kuljettamana
- Stabiilissa (vakaassa) ilmakehässä lämpötilan muutos on  $< 1\text{ °C}/100\text{ m}$ 
  - Paikaltaan pystysuuntaan liikahtanut ilmapaketti pyrkii palaamaan takaisin paikoilleen
  - Pystyliikkeet tukahtuvat nopeasti
- Labiilissa (epävakaassa) ilmakehässä lämpötilan muutos on  $> 1\text{ °C}/100\text{ m}$ 
  - Pystyliikkeeseen lähtenyt ilmapaketti jatkaa kiihtyen matkaansa

# Mitä siitä sitten seuraa?

- Suurin osa epäpuhtauksien päästöistä tapahtuu lähellä maanpintaa
- Labiilissa ilmakehässä pystysuuntainen sekoittuminen on tehokasta
  - Epäpuhtaudet sekoittuvat ylempiin kerroksiin
  - Pitoisuudet maanpinnan läheisyydessä pysyvät pienempinä
- Stabiilissa ilmakehässä pystysuuntaista sekoittumista ei juuri tapahdu
  - Pitoisuudet maanpinnan lähellä nousevat korkeiksi

# Neutraali lämpötilajakauma

- Tuulinen sää tasoittaa pyörteillään lämpötilajakauman lähelle adiabaattista (neutraalia)
- Pilvisellä säällä ei muodostu auringon säteilyn erilaisesta imeytymisestä johtuvia lämpötilaeroja
- Pilvet toimivat ”peittona” yöllä ja talvella eikä inversiotilanteita synny kovin helposti, koska maan pinta ei jäähdy voimakkaasti ulossäteilyn vaikutuksesta

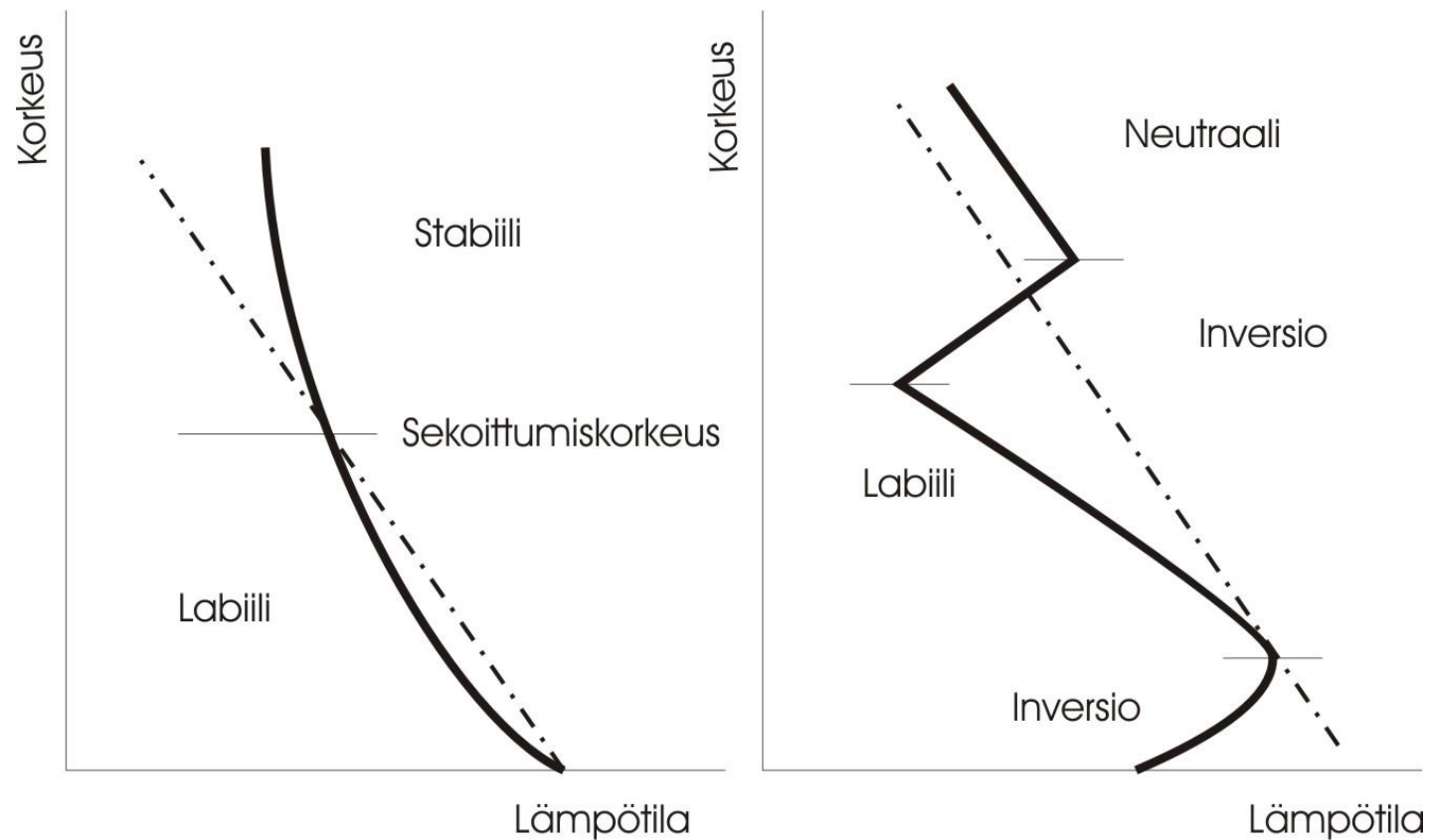
# Labiili ilmakehä

- Heikkotuulinen aurinkoinen kesäpäivä
- Auringon säteily lämmittää voimakkaasti maanpintaa ja maanpinta alimpia ilmakerroksia
- Lisäksi maanpinta lämpenee epätasaisesti, jolloin syntyy paikallisia lämpötilaeroja

# Stabiili ilmacehä

- Pilvettömät heikkotuuliset yöt
- Selkeä heikkotuulinen sää talvella
- Maanpinta kylmenee tehokkaasti ulossäteilyn vaikutuksesta
  - Pinnan lähelle muodostuu inversiokerros, jossa kylmin ilma on alimmaisena
- Myös kylmän ilman virtaus maanpinnan lähellä
- Suomen kaupungeissa liikenteen ja energiantuotannon päästöt suurimmillaan kylminä talviaamuina, jolloin sekoittuminen heikkoa
  - Heikko ilmanlaatu
  - Toisaalta inversiokerroksen yläpuolelle jäävien korkeiden piippujen savut eivät leviä alas

# Esimerkkejä lämpötilajakaumasta



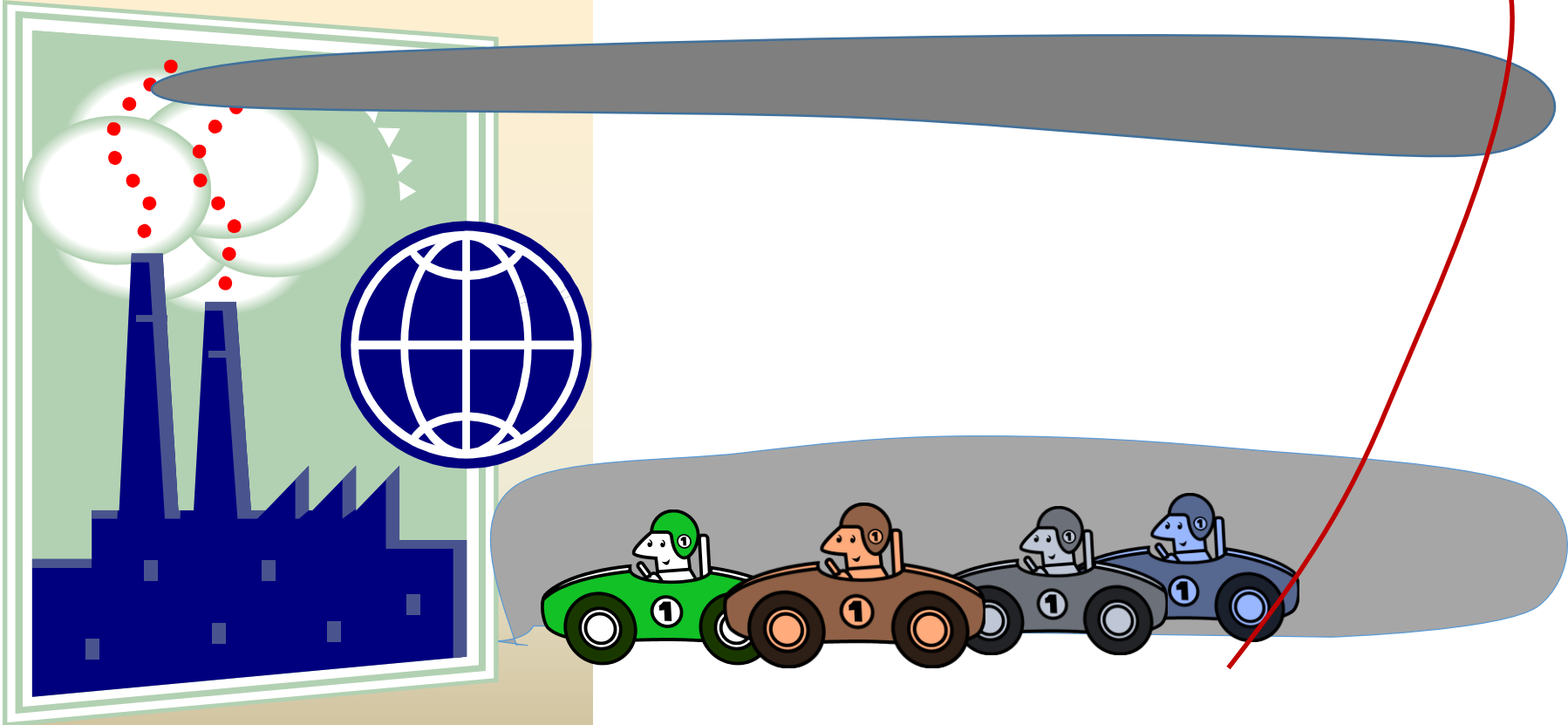
# Kostea-adiabaattinen prosessi

- Todellisessa ilmakehässä asiat mutkistuvat, kun veden olomuodonmuutokset tulevat mukaan
- Nousevassa ilmapaketissa kosteuden tiivistyminen pisaroiksi hidastaa jäähtymistä
  - Tiivistymisen yhteydessä vapautuu lämpöä
    - (Kumpu)pilvissä nouseva liike kiihtyy entisestään tiivistymisen vapauttaman lämmön ansiosta
- Ilmakehässä voi olla ehdollisesti stabiileja kerroksia
  - Stabiili ”kuivalle” ilmalle
  - Labiili ilmalle, jossa tapahtuu pisaroiden muodostumista

# Esimerkkitilanteita

- Miten ilmakehän stabiilit ja labiilit kerrokset vaikuttavat epäpuhtauksien pitoisuuksiin maanpinnan läheisyydessä?
- Seuraavissa kuvissa saastepilven tummuus kuvaa epäpuhtauksien pitoisuuksia
  - Mitä tummempi pilvi, sitä korkeammat pitoisuudet.

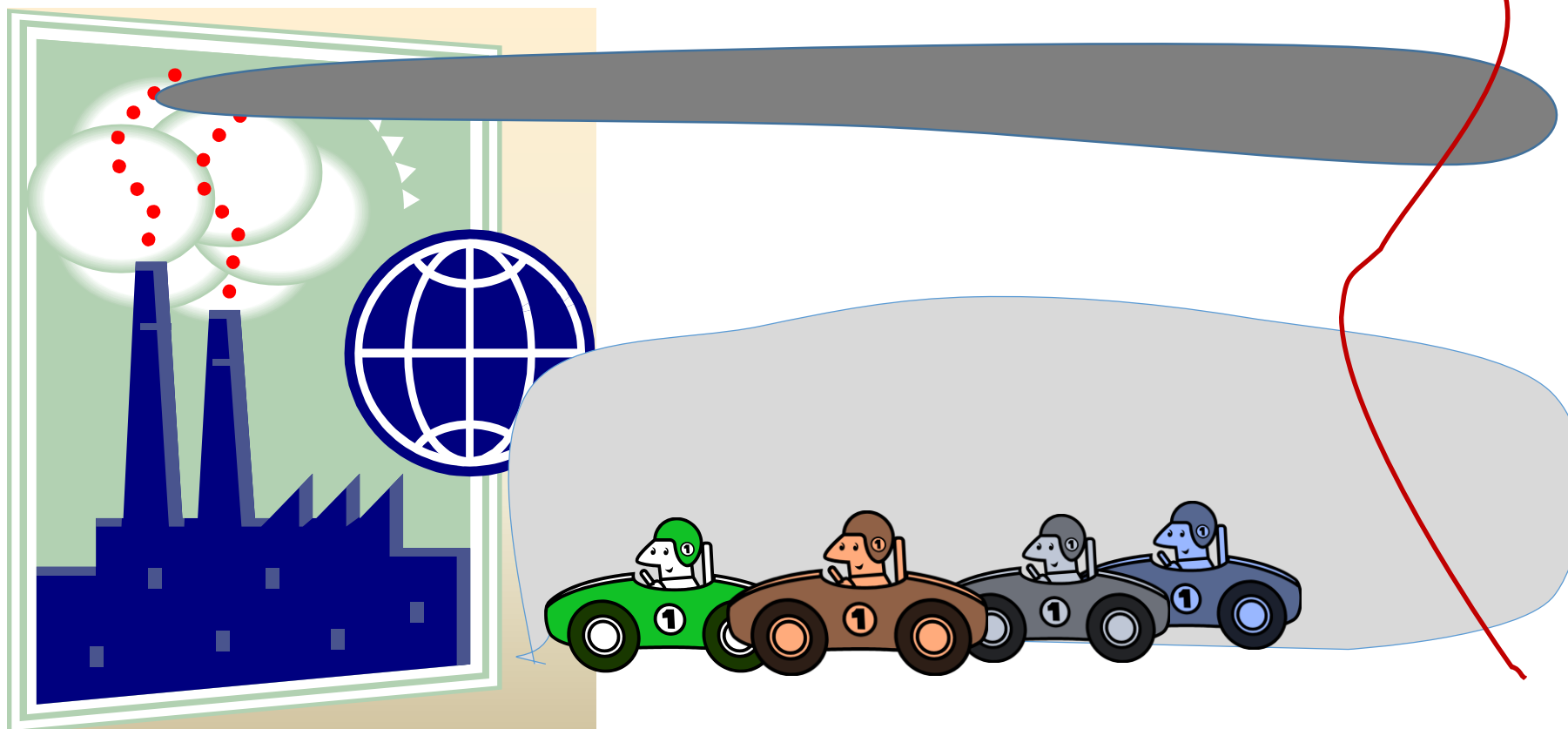
# Aamun inversio



lämpötila

# Inversio purkaantuu aamulla alhaalta

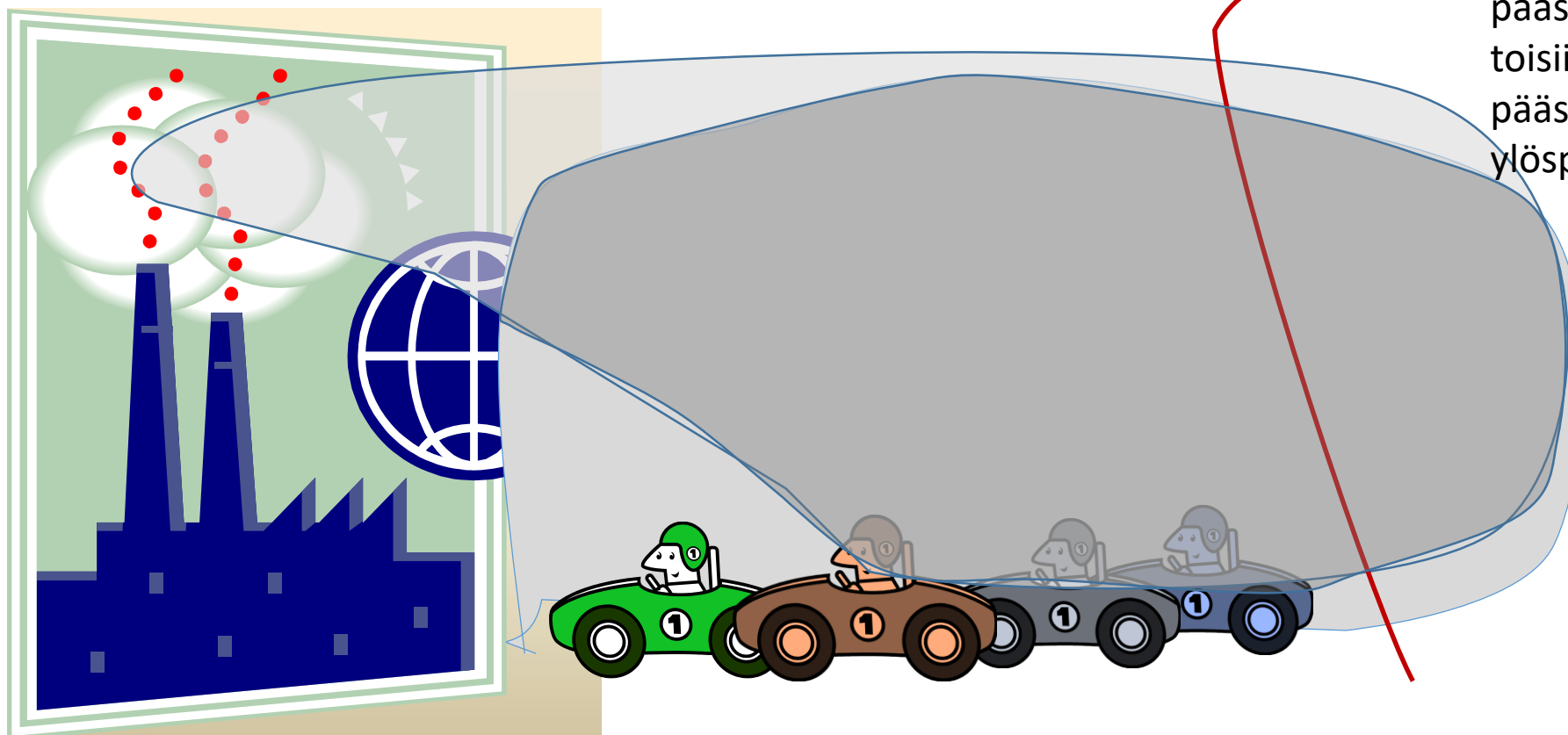
38



lämpötila

# Aamupäivän savuttava tilanne

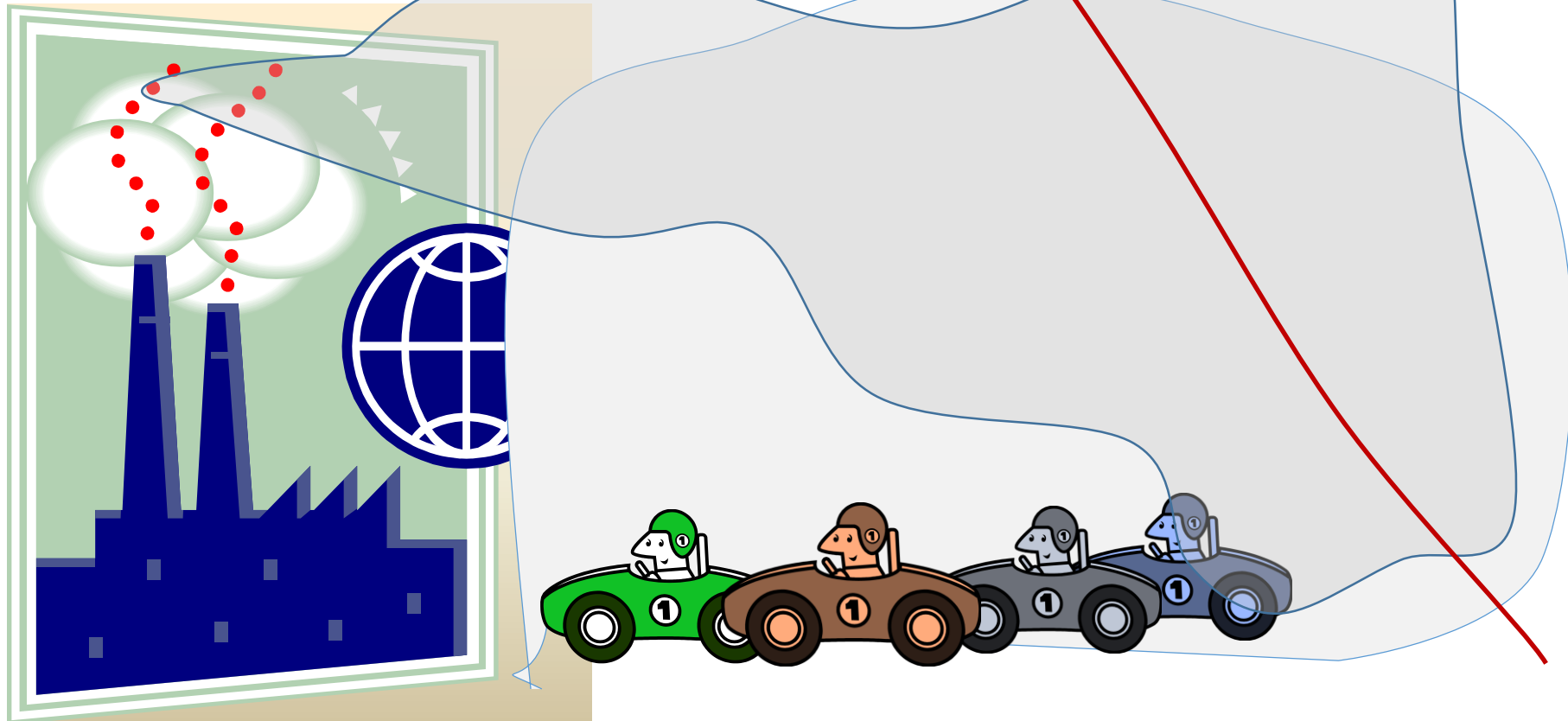
39



Pahimmillaan piipuista tulevat päästöt ja liikenteen päästöt sekoittuvat toisiinsa mutteivät pääse laimenemaan ylöspäin.

lämpötila

# Labiili (ei inversiota) <sup>40</sup>



lämpötila