

# **Ilmastonmuutoksen todennäköisyysennusteet**

Jouni Räisänen

Helsingin yliopiston fysiikan laitos

13.1.2009

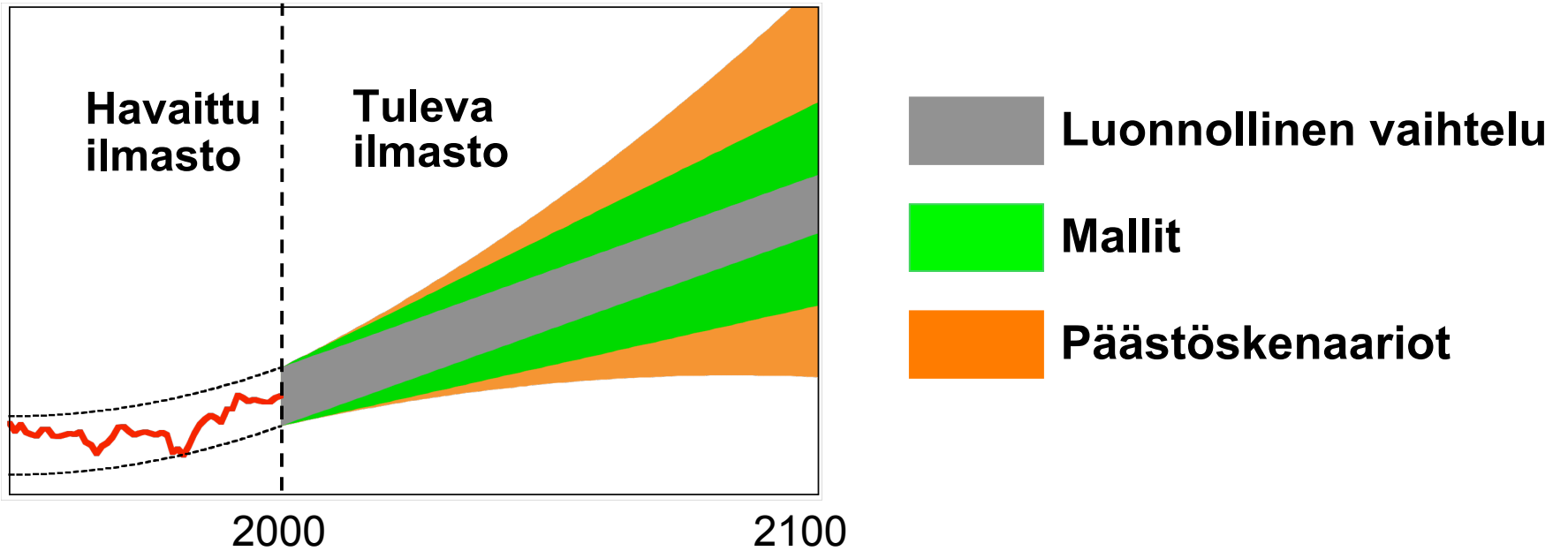
# Epävarmuus ilmastoennusteissa

- **Päästöskenaarioepävarmuus**
  - Ihmiskunnan tuleva käyttäytyminen
- **Malliepävarmuus**
  - ilmaston herkkyys kasvihuonekaasujen lisääntymiselle ym. ilmankemian koostumuksen muutoksille
  - hiilen kiertokulun mallittaminen yms.
- **Ilmaston luonnollinen vaihtelu**
  - auringon toiminta + tulivuorenpurkaukset
  - Ilmastojärjestelmän kaoottisuuteen liittyvä ”satunnainen” vaihtelu (vrt. pitkien sääennusteiden mahdottomuus)

# Voidaanko epävarmuuksia kuvata todennäköisyysjakaumilla?

- **Päästöskenaariot: huonosti**
  - sosiologit ja taloustieteilijät eivät tätä suosittelle!
- **Malliepävarmuus: jossain määrin**
  - eri tutkimuslaitosten ilmastomallit (N ~20) erilaisia
  - avoin kysymys, ovatko mallit riittävän erilaisia (keskinäiset riippuvuudet; puuttuvien palauteilmiöiden vaara)?
- **Ilmaston luonnollinen vaihtelu: melko hyvin**
  - vaihtelun voimakkuutta voidaan arvioida sekä havaintojen että mallitulosten perusteella
  - pitkäjaksoinen (> 100 v.) vaihtelu tunnetaan kuitenkin lyhytjaksoista vaihtelua heikommin

# Ilmastonmuutoksen epävarmuudet skemaattisesti



<b>EPÄVARMUUKSIEN SUURUUS:</b>	Lähi-tulevaisuus	Vuosisadan loppu
Luonnollinen vaihtelu	+	+
Mallit	(+)	++
Päästöskenaariot		++

# Esityksen loppuosa

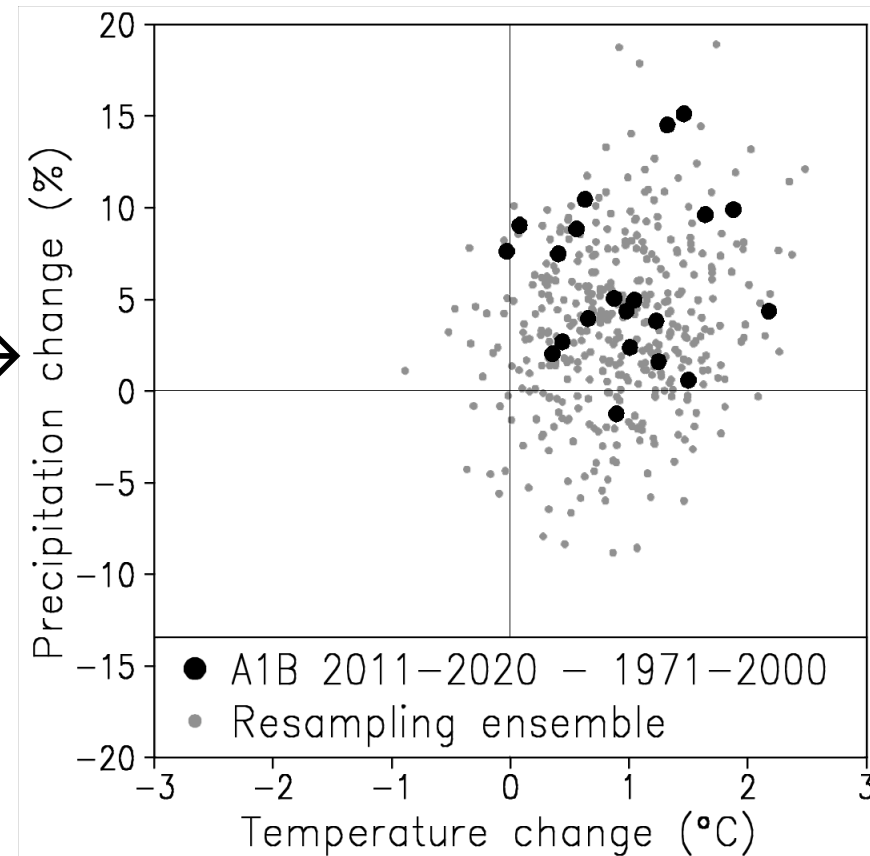
- **Todennäköisyysennusteita lähitulevaisuuden ilmastolle Etelä-Suomessa**
  - Vuosikymmenkeskiarvot
  - Lämpötilan ääri-ilmiöt
- **Ilmastonmuutokset ja hiilen kiertokulku pidemmällä tähtäimellä**

# Todennäköisyysennusteita lämpötilan ja sademäärän muutoksille Etelä-Suomessa

- **Lyhyt aikaskaala:** miten vuosikymmenen 2011-2020 ilmasto eroaa 'normaalijakson' 1971-2000 ilmastosta
- **Otetaan huomioon**
  - ilmaston luonnollinen vaihtelu
  - Ilmastomallien väliset erot (vähemmän tärkeitä)
- **Ei oteta huomioon kasvihuonekaasujen päästöihin liittyvää epävarmuutta**
  - lähes merkityksetön lyhyellä tähtäimellä

# Laskentamenetelmä

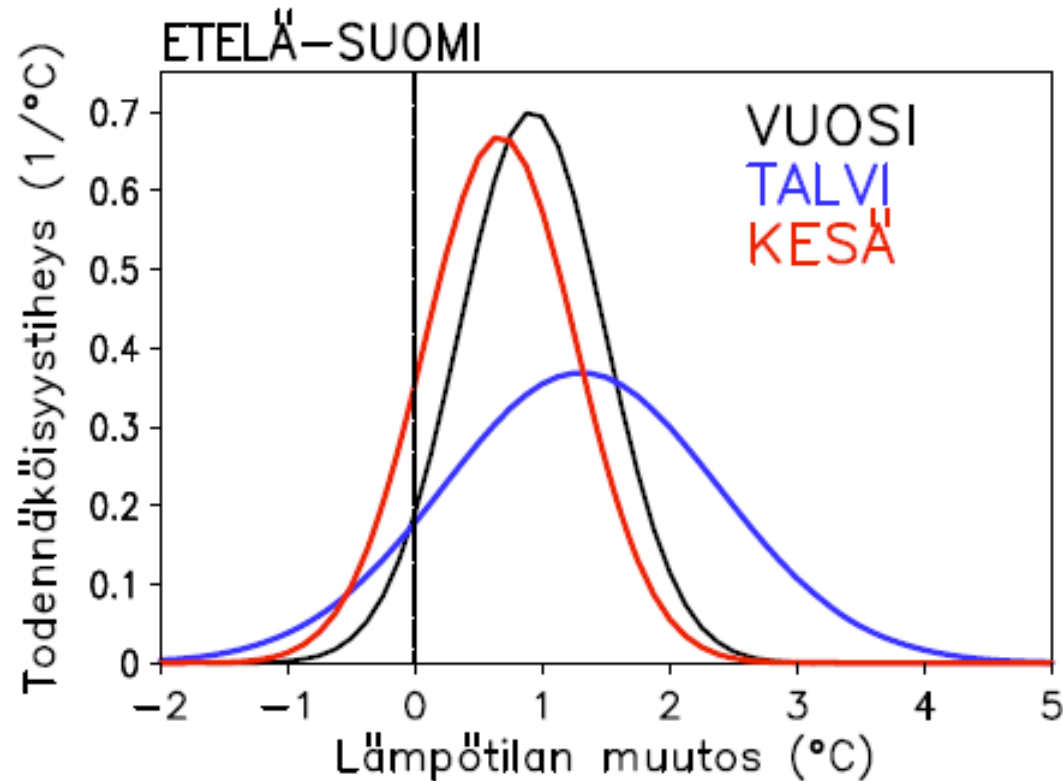
- Perustana **21** ilmastomallin tulokset
- Uudelleenotantamenetelmä → suurempi otos ilmaston luonnolliseen vaihteluun liittyvästä epävarmuudesta
- Tulosten visualisointi normaalijakaumia käyttäen



## Menetelmästä tarkemmin:

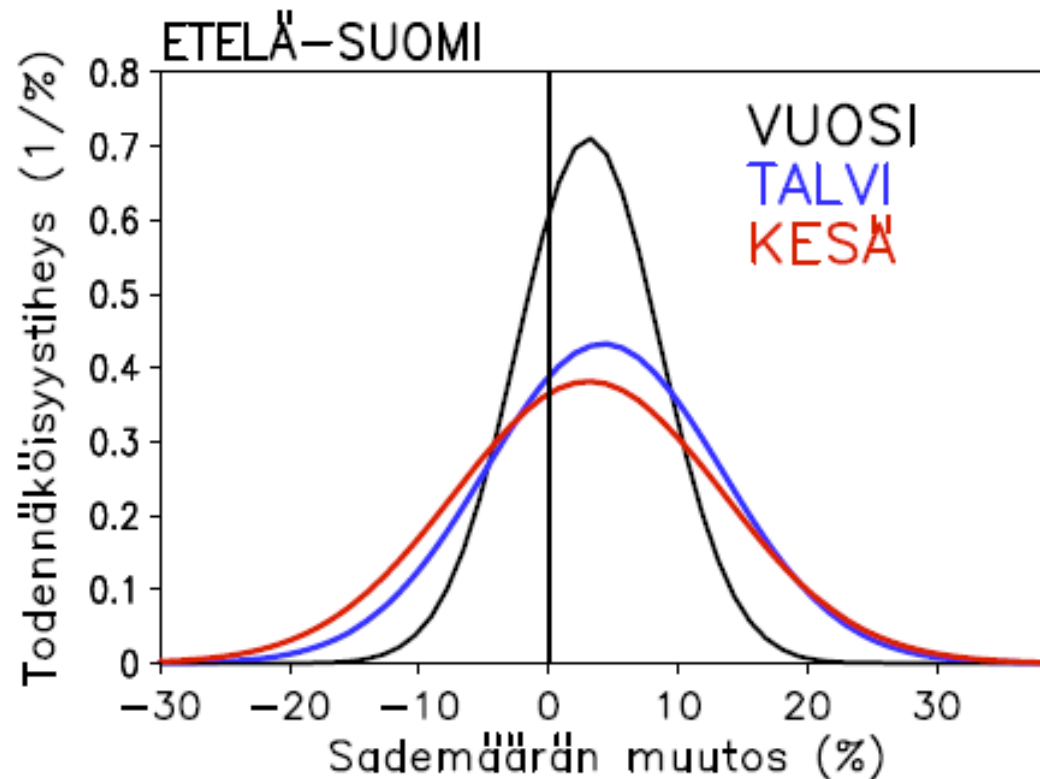
Räisänen & Ruokolainen, 2006: Tellus, 58A, 461-472.

# Ennusteita keskilämpötilan muutokselle Etelä-Suomessa (1971-2000 → 2011-2020)



Jakauman leveys ensisijaisesti riippuvainen luonnollisen ilmastovaihtelun suuruudesta: talvilämpötilat paljon vaihtelevaisempia kuin kesälämpötilat

# Ennusteita sademäärän muutokselle Etelä-Suomessa (1971-2000 → 2011-2020)



Sademäärän muutos suhteellisesti ottaen paljon epävarmempi kuin lämpötilan muutos: sademäärän kasvu vain hiivenen sen vähenemistä todennäköisempää.

# Ennuste taulukkomuodossa

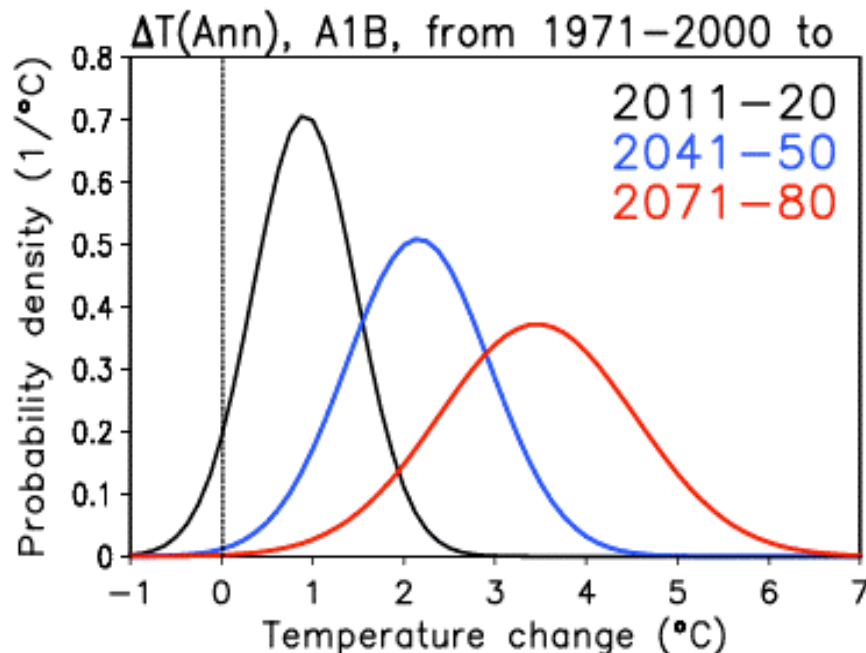
(Etelä-Suomi, 1971-2000 → 2011-2020)

<b>Lämpötilan muutos</b>	Talvi	Kesä	Vuosi
Paras arvio (°C)	<b>1.3</b>	<b>0.7</b>	<b>1.0</b>
5-95% epävarmuusväli (°C)	-0.5...+3.1	-0.2...+1.6	0.0...+1.8
Lämpenemisen todennäköisyys (%)	<b>90%</b>	<b>90%</b>	<b>96%</b>

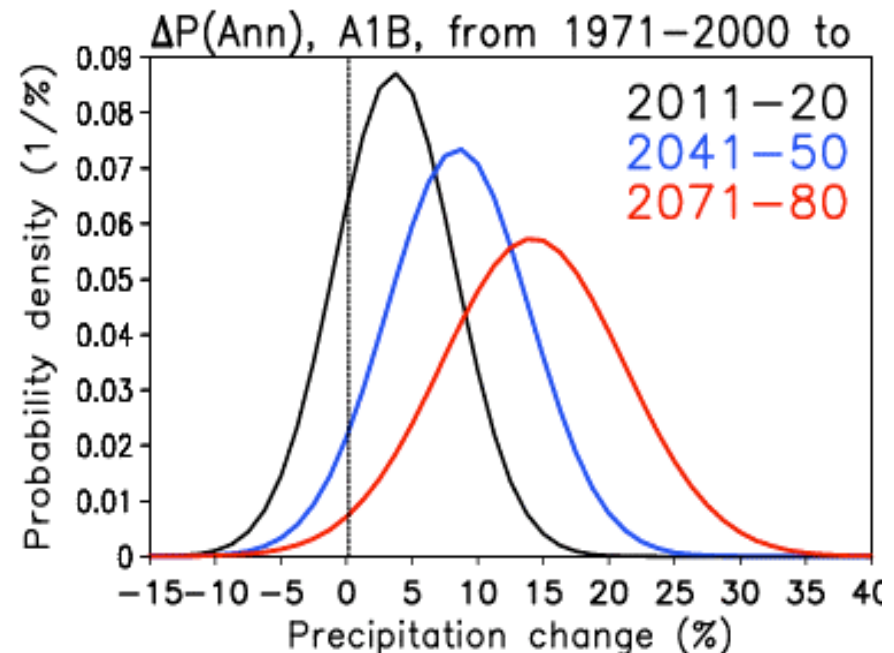
<b>Sademäärän muutos</b>	Talvi	Kesä	Vuosi
Paras arvio (%)	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
5-95% epävarmuusväli (%)	-10...+22	-14...+22	-6...+12
Sademäärän kasvun todennäköisyys (%)	<b>69%</b>	<b>63%</b>	<b>75%</b>

# Todennäköisyysjakaumien muutos ajan funktiona (skenaarioepävarmuus ei mukana!)

## Lämpötilan muutos



## Sademäärän muutos



Kasvihuonekaasujen lisääntymisen aiheuttamien ilmastonmuutosten odotetaan voimistuvan vähitellen → Jakaumien huippu siirtyy oikealle. Samalla mallien väliset erot kasvavat → Jakaumat levenevät.

# Ilmastonmuutos ja lämpötilan ääri-ilmiöt

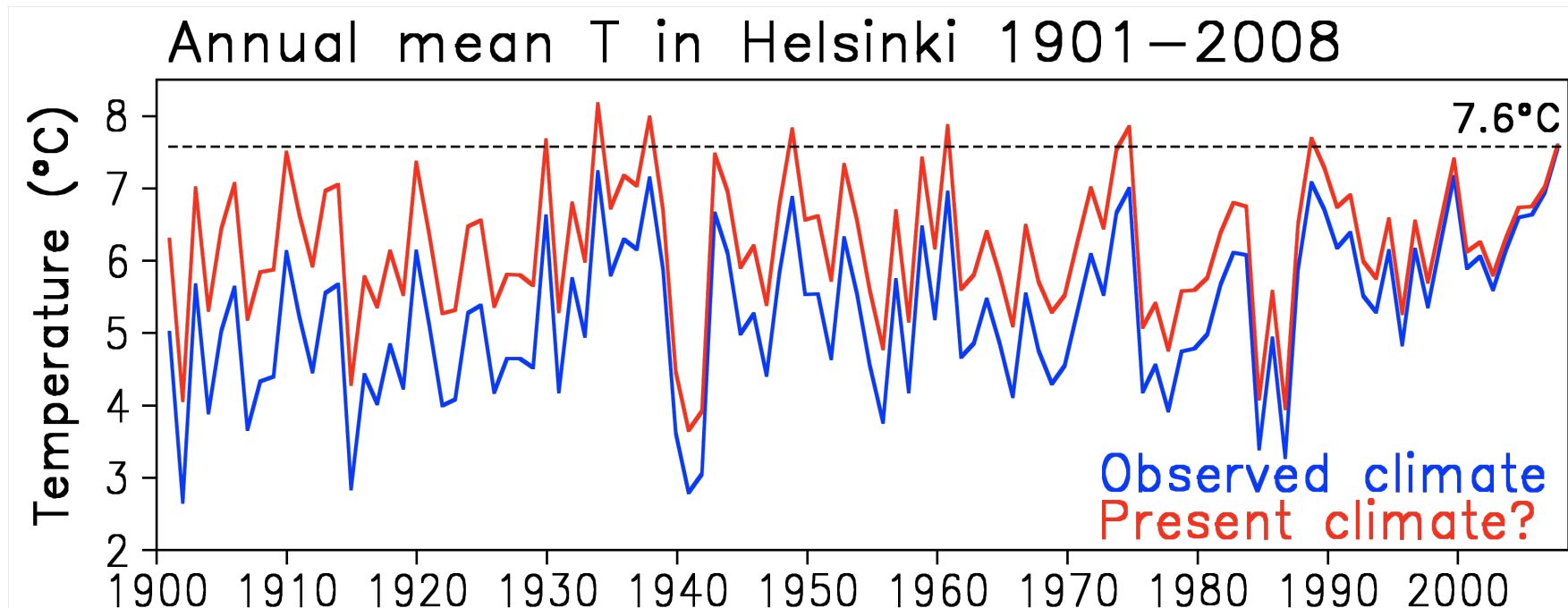
- **Esimerkki:**

- Vuoden 2008 keskilämpö Helsingissä: **+7.6°C**  
(v. 1934 ja 2000: +7.2°C)
- Kuinka usein näin lämpimiä vuosia voisi odottaa
  - A) 1900-luvulla tehtyjen havaintojen mukaan
  - B) Todellisessa nykyilmastossa
  - C) Tulevaisuudessa?

- **Menetelmä:**

- ”korjataan” aiemmat havainnot nykyilmaston / tulevan ilmaston mukaisiksi (← ilmastomallien tulokset + jo havaittu globaalin keskilämpötilan muutos)
- Arvioidaan todennäköisyysjakauma ”korjatuista” havainnoista

# Vuoden keskilämpötila Helsingissä

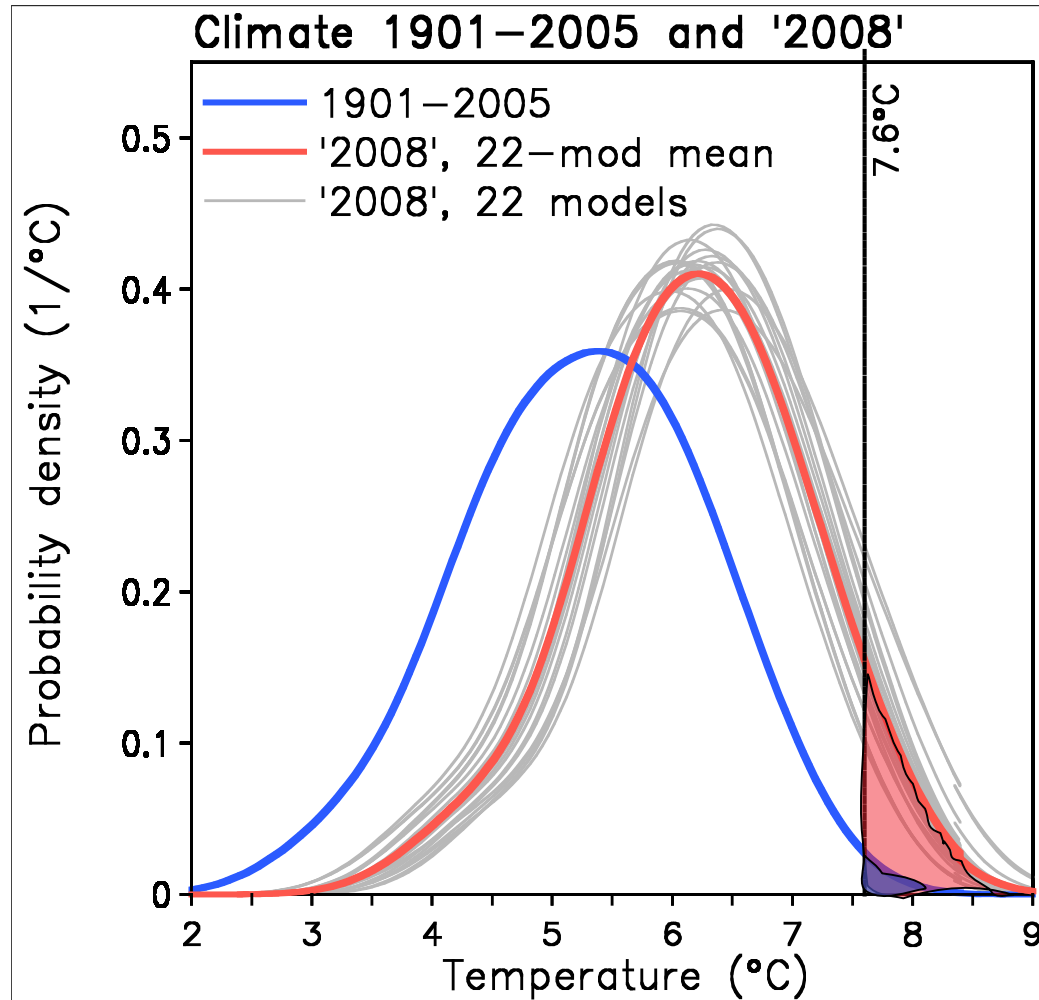


**Sininen:** todelliset havainnot

**Punainen:** ilmastomallitulosten perusteella ”korjatut”  
nykyilmastoa vastaavat havainnot

**Huom:** ”korjaus” riippuu käytetystä ilmastomallista,  
kuvassa kaikkien mallitulosten keskiarvo

# Vuoden keskilämpötila Helsingissä



**Havaittu  
keskilämpö +7.6°C**

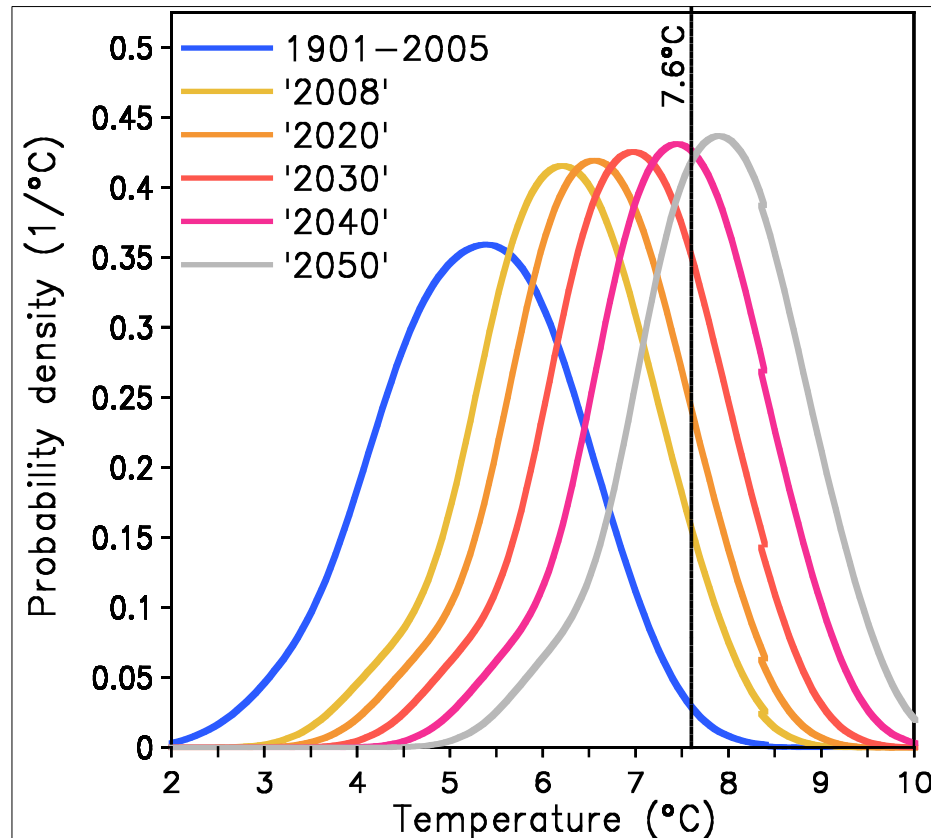
**Edellinen ennätys  
(1934, 2000) +7.2°C**

**Toistuvuusajaka,  $\geq 7.6^{\circ}\text{C}$ ,  
1901-2005: ~ 200 v.?**

**Paras arvio toistuvuus-  
ajalle nykyilmastossa:  
15 vuotta**

**Huom:** Todennäköisyys ~ pinta-ala

# Tulevaisuus: lämpimämpi ilmasto → entistä useampia huippulämpimiä vuosia?

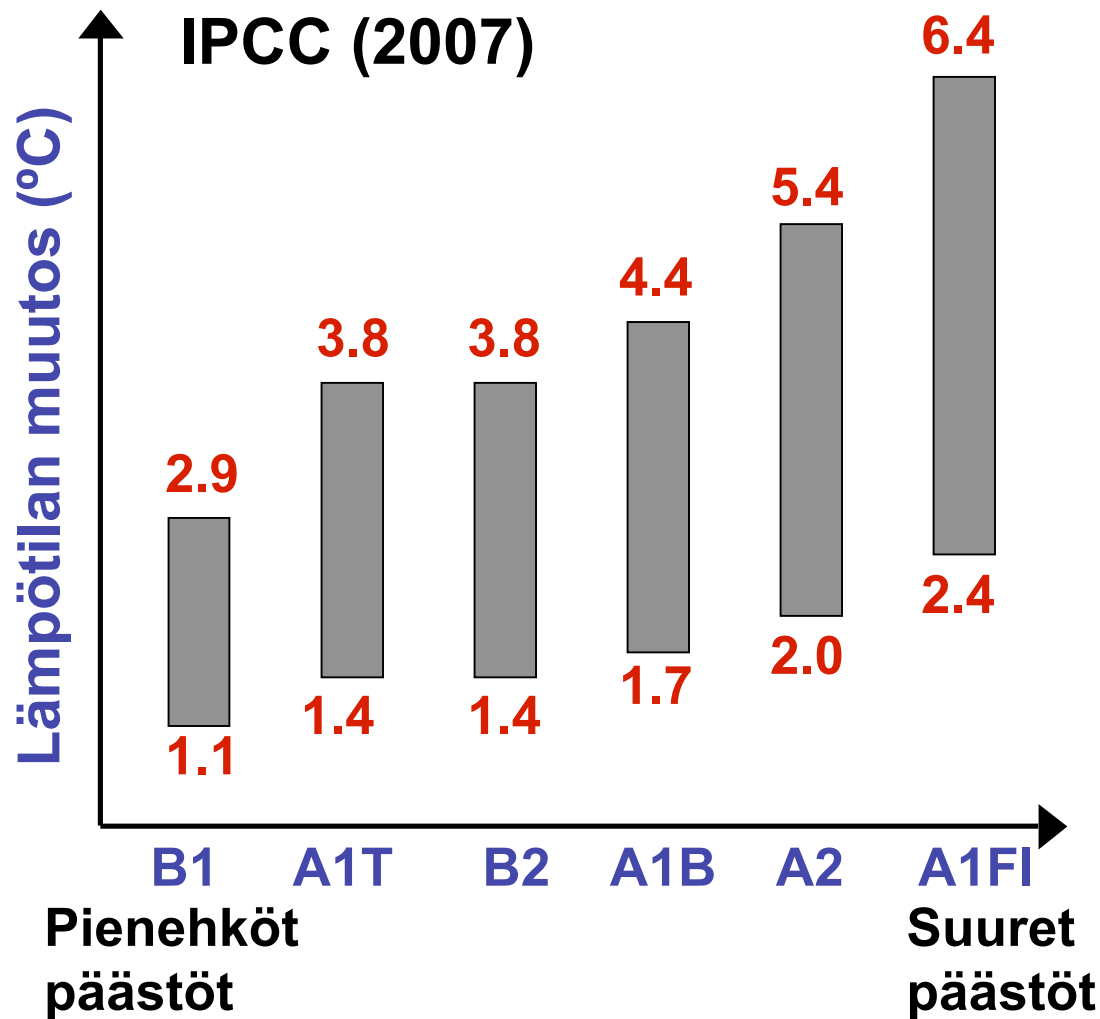


Vuoden keskilämpötilan todennäköisyysjakauma Helsingissä: mallituloksiin perustuva ”paras arvio”.

Vuoden 2030 paikkeilla jo 1 vuosi 4:stä, ja vuoden 2050 tienoilla jo 6 vuotta 10:stä, olisi laskelman mukaan vähintään yhtä lämmin kuin vuosi 2008.

**Kaikkien ääri-ilmiöiden todennäköisyys** (rankkasateet, myrskyt, jne.) ei toki muutu ilmaston lämmetessä yhtä dramaattisesti.

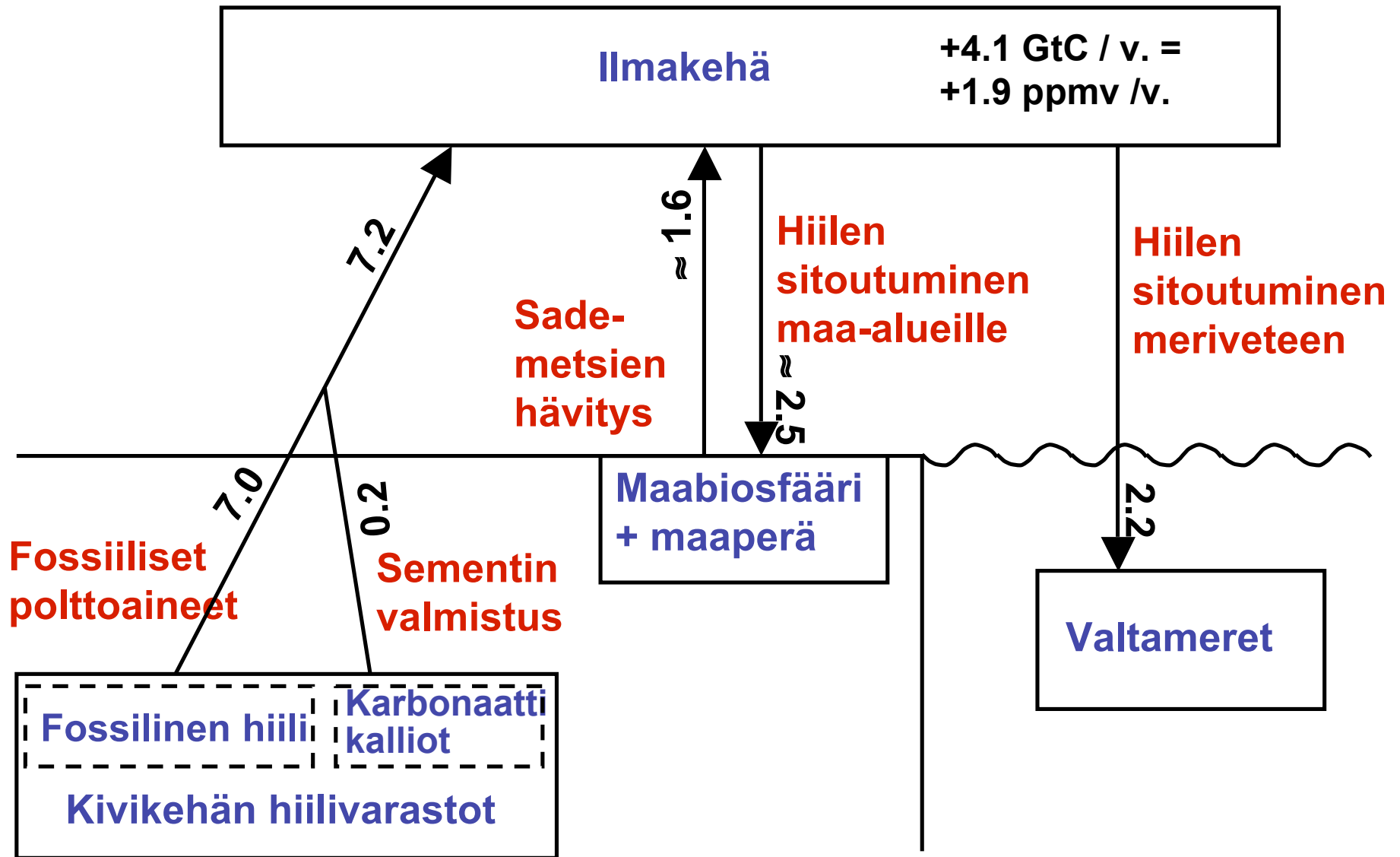
# Ennustettu maapallon keskilämpötilan nousu 1990 → 2095 eri päästöskenaarioille



Huomioon otetut epävarmuudet  
(i) ilmastomallit  
(ii) hiilen kiertokulku

Pylväät edustavat arvoaluetta, jolle muutoksen arvioidaan osuvan ”vähintään 2/3 todennäköisyydellä”

# Ihmiskunnan vaikutus hiilen kiertokulkuun (GtC / vuosi, 2000-2005)

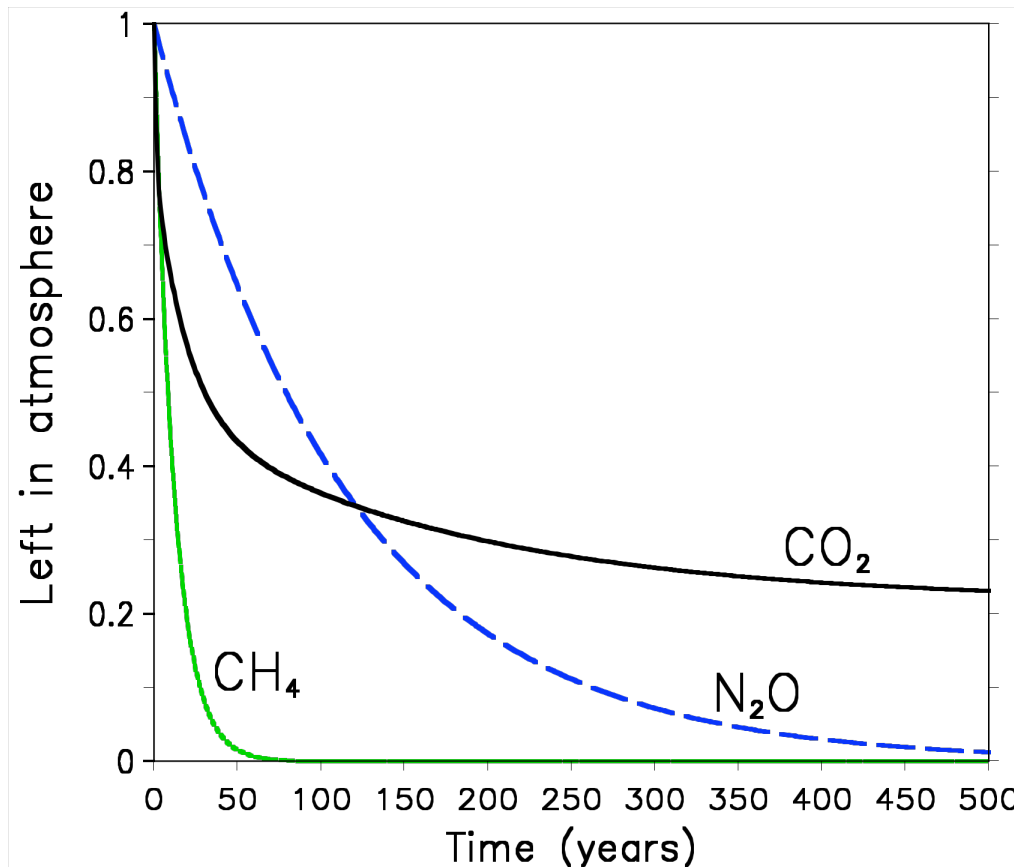


# Ihmiskunnan vaikutus hiilen kiertokulkuun (jatkoa)

- Nykyisellään noin puolet ihmiskunnan vuosittaisista CO<sub>2</sub>-päästöistä jää ilmakehään
  - loput imeytyvät kasvillisuuteen (← CO<sub>2</sub>-lannoitus ym.) ja valtameriin
- Ilmakehään jäävä osuus ei universaali vakio, vaan riippuu mm.
  - päästöjen kehityksestä
  - ilmastonmuutoksista

# Kasvihuonekaasujen poistuminen

**ilmakehästä**, olettaen (esim.) 1 tonnin päästöt vuonna 0, minkä jälkeen ei päästöjä

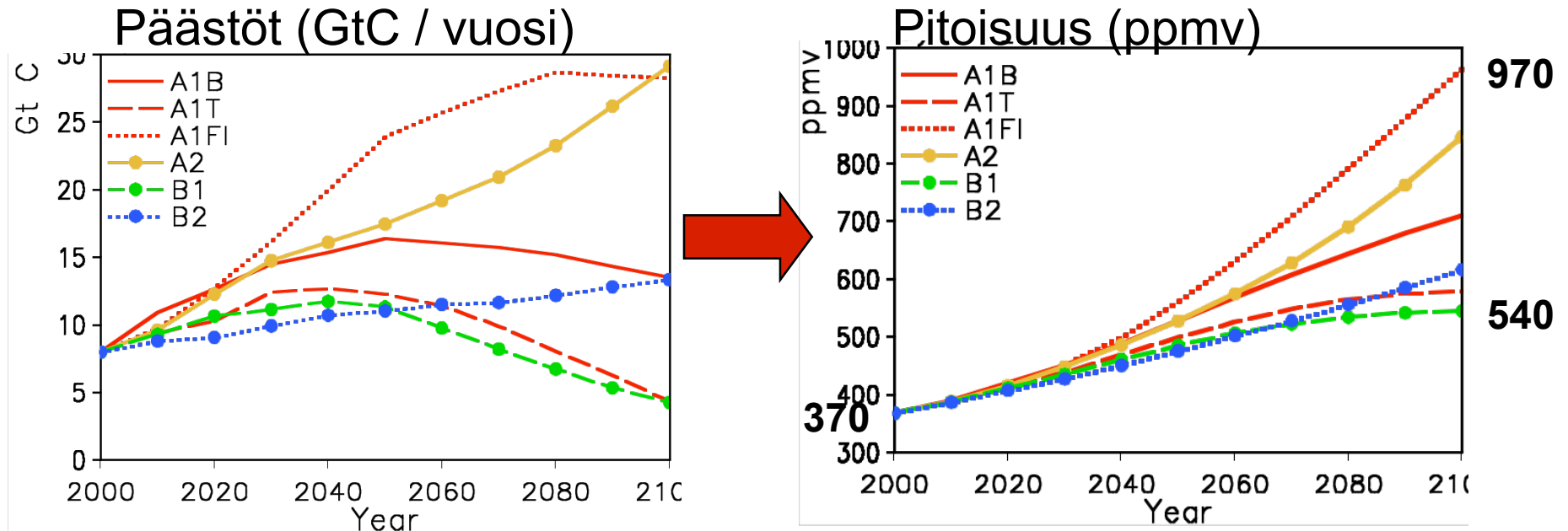


**CH<sub>4</sub>**  
eksponentiaalinen poistuma,  
 $\tau = 12$  yr

**N<sub>2</sub>O**  
Eksponentiaalinen poistuma,  
 $\tau = 114$  yr

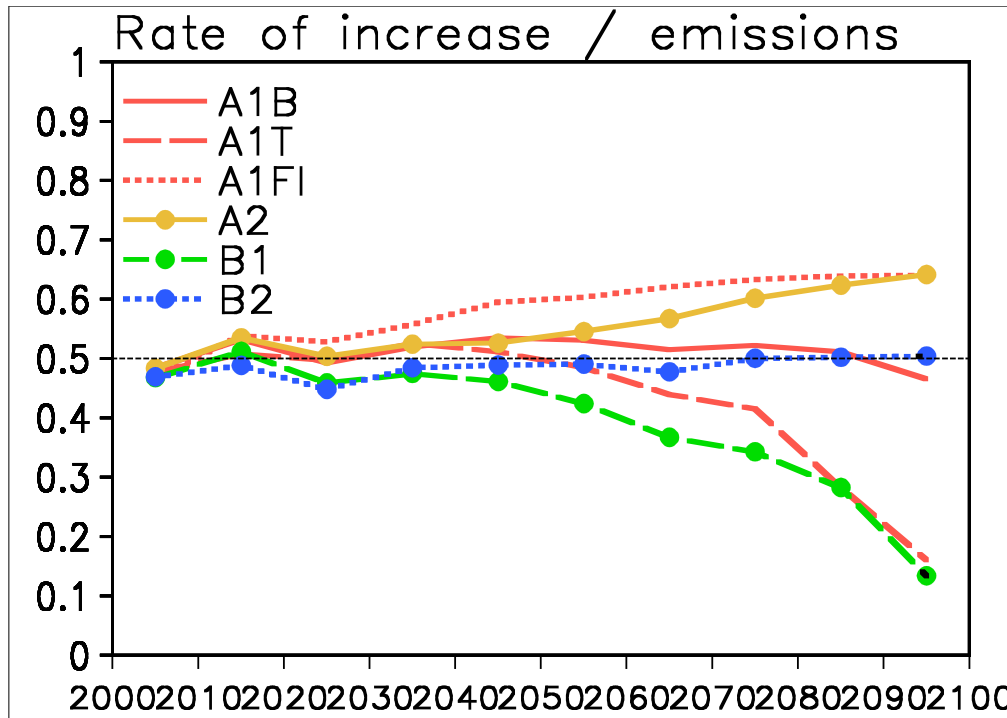
**CO<sub>2</sub>**  
Poistumista ei voi kuvata eksponentiaalisella lailla

# Tulevat CO<sub>2</sub>-päästöt → CO<sub>2</sub>-pitoisuus



- Päästö- ja pitoisuuskenaarioiden erot merkittäviä noin v. 2030 lähtien
- Edes päästöjen puolittuminen ei pysäytä pitoisuuden kasvua!
- Laskelmassa mukana ilmastonmuutosten vaikutus hiilen kiertokulkuun nykyisen ”parhaan arvion” mukaisena. Tähän asiaan liittyy kuitenkin melkoisesti epävarmuutta.

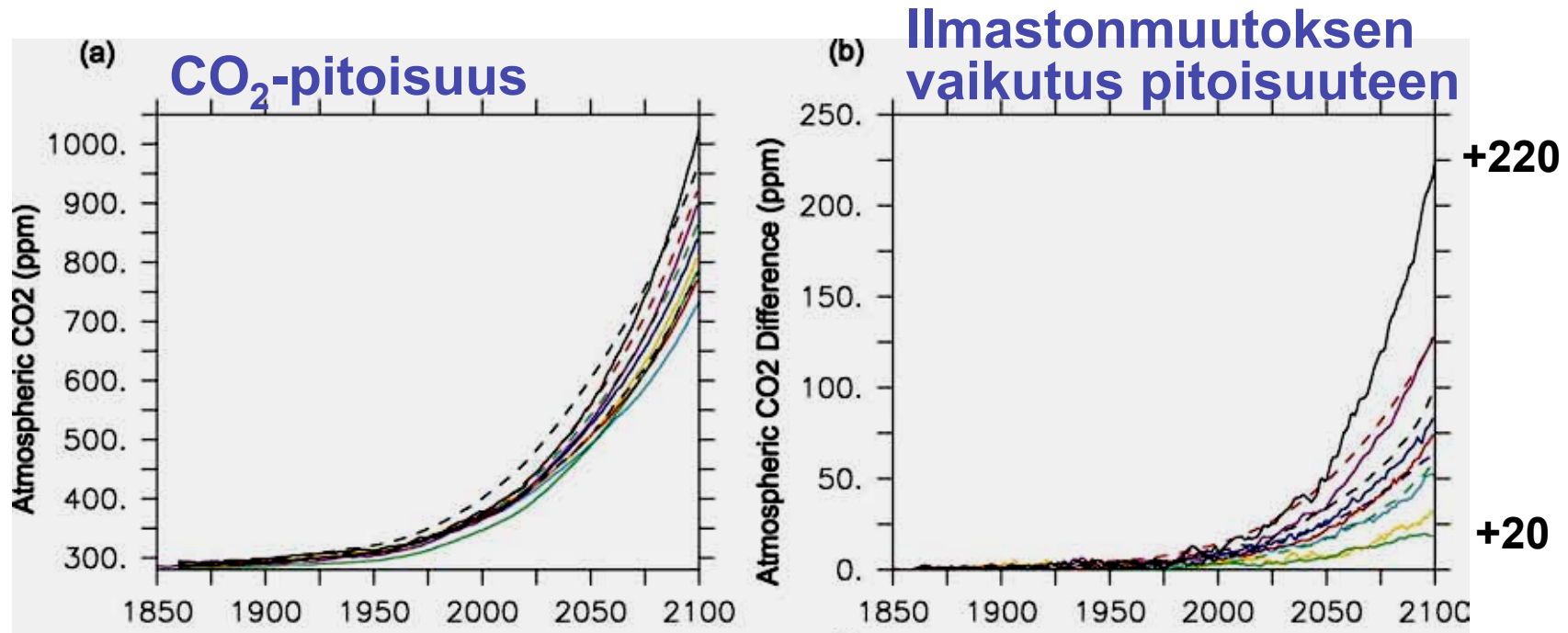
# Ilmakehään jäävä osuus päästöistä: parhaat arviot eri skenaarioille



Ilmakehän hiilivaraston  
kasvu / päästöt  
vuosikymmenittäin

**Mitä isommat päästöt, sitä suurempi prosenttiosuus niistä myös jää ilmakehään (= hiilen nielut eivät ole rajattomia)!**

# Ilmastonmuutosten vaikutus CO<sub>2</sub>-pitoisuuteen (A2-skenaario = suuret päästöt)



- Ilmaston lämpeneminen kiihdyttää CO<sub>2</sub>-pitoisuuden kasvua, mutta palauteilmion voimakkuus tunnetaan huonosti
- Tämä nostaa 100 vuoden lämpenemishaarukan ylärajaa **~1.5°C** (alaraja muuttuu vähemmän: jos ilmasto lämpenee vähän, myös lämpenemisen vaikutus hiilen kiertokulkuun jää pieneksi).

## Maa- ja merialueiden hiilivaraston herkkyys ilmaston lämpenemiselle mallitulosten mukaan (IPCC 2007:n lukujen perusteella)

	Maabiosfääri + Maaperä	Valtameret
Keskiarvo ± hajonta (yksikkö GtC / 1°C)	<b>-79 ± 45</b>	<b>-30 ± 15</b>
Vaikutus ilmakehän CO <sub>2</sub> -pitoisuuteen (ppmv / 1°C)	<b>37 ± 21</b>	<b>14 ± 7</b>

- Ilmaston lämpeneminen näyttää vaikuttavan voimakkaammin maa-alueiden kuin merten hiilivarastoon
- Tärkein syy maa-alueiden hiilivaraston pienenemiseen malleissa hajoamisen voimistuminen lämpötilan noustessa.

# Yhteenveto

- **Lähitulevaisuuden ilmastonmuutoksista voidaan tehdä järkeviä todennäköisyysennusteita**
  - lämpötilan muutokset näkyvät luonnollisen vaihtelun seasta paljon sademäärän muutoksia selvemmin
- **Ajan myötä kokonaisepävarmuus kasvaa ja vaikeasti kvantifioitavien epävarmuustekijöiden osuus korostuu.**
- **Ilmakehään jäävä osuus CO<sub>2</sub>-päästöistä kasvaa päästöjen kasvaessa ja ilmaston lämmitessä.**