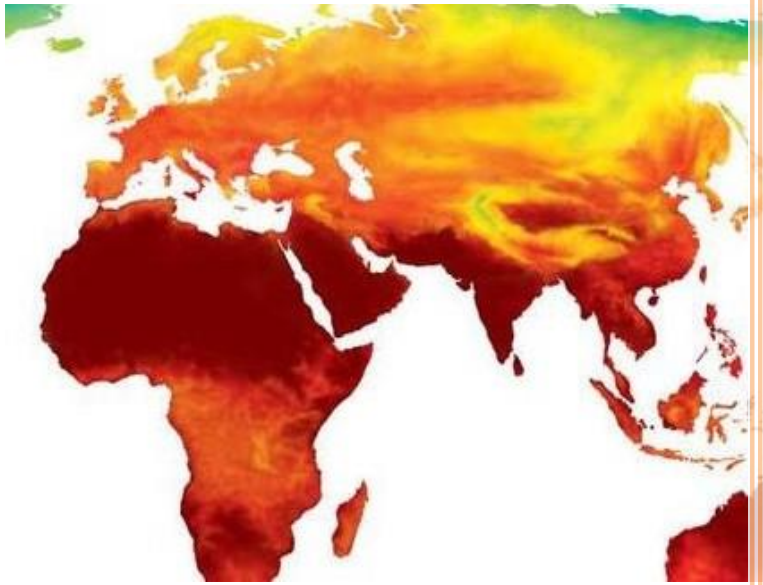




ILMASTON LÄMPENEMISEN PYSÄYTYS KAHTeen ASTEESEEN

Maailman seuraavat 200 vuotta

Asko Vuorinen

Ekoenergo Oy

1.1.2021

ILMASTON LÄMPENEMISEN PYSÄYTYS KAHTEN ASTEeseen

Maailman seuraavat 200 vuotta

Asko Vuorinen

Ekoenergo Oy

ILMASTON LÄMPENEMISEN PYSÄTYS KAHTeen ASTEESen

Asko Vuorinen

Copyright © 2020

Ekoenergo Oy

Kirjokansi 2 A 12

02100 Espoo, Finland

Askovuorinen (at) gmail.com

Ekoenergo Oy on vuonna 1979 perustettu suomalainen perheyryty, joka julkaisee kirjoja ja selvityksiä energiasta ja ilmastomuutoksesta. Yhtiön julkaisemat kirjat löytyvät sen kotisivuilta. Niihin kuuluvat E-kirjat “*Truth of Climate Change*”, 2016 ja “*Fundamentals of Global Warming*”, 2019 sekä painetut kirjat: “*Planning of Optimal Power Systems*”, 2008 ja “*Planning of Nuclear Power Systems to Save the Planet*”, 2011.

ISBN 978-952-68394-7-9 (nid.)

ISBN 978-952-68394-8-6 (PDF)

Tämän kirjan voi tilata **Books on Demand** verkkosivuston kautta www.bod.fi.

Kirja on omistettu rakkaalle vaimolleni Sinikalle. Samalla haluan kiittää kaikkia uusien energialähteiden kehittämisen parissa työskennelleitä henkilöitä, joiden ansiosta ilmaston lämpenemisen pysäyttäminen on nyt mahdollista.

Sisällys

Esipuhe	9
1 JOHDANTO	11
1.1 Lämpötilan vaihtelun historiasta	11
1.2 Lämpeneminen 1900-luvulta alkaen	12
1.3 Ilmaston lämpenemisen syyt	13
2. LÄMPÖTILAN MITTAUSTIEDOT	19
2.1 Kansainväliset tiedostot	19
2.2 Suomen lämpötilat	21
3. AURINGON SÄTEILYN VAIKUTUS	27
3.1 Maapallon lämpötila	27
3.2 Planeettojen lämpötilat	30
3.3 Auringon säteilyn vaikutus ilmakehän lämpötilaan	33
3.4 Auringon vaikutuksen ennustaminen	41
4. HIILIDIOKSIDIN VAIKUTUS ILMASTON LÄMPENEMISEEN	45
4.1 Energiasektorin CO ₂ -päästöt	45
4.2 Metsien hiilivarastot	47
4.3 Sementtiteollisuuden päästöt	50
4.4 Maailman CO ₂ -päästöt ja ilmakehän CO ₂ -pitoisuus	51
4.5 Hiilidioksidin vaikutus lämpötilaan (SC-malli)	57
4.6 CO ₂ -päästöjen skenaariot ja lämpötilan nousu	58
5. KOLMEN MUUTTUJAN SCA2-MALLI	63
5.1 Aerosolit ja SO ₂ -päästöt	63
5.2 Kolmen muuttujan SCA2-malli	65
5.3 SO ₂ -päästöjen skenaariot	70
5.4 Skenaariot käyttäen kolmen muuttujan SCA2-mallia	71
6. TAVOITEOHJELMA MAAILMALLE	75
6.1 Tavoitteet	75
6.2 Sähköntuotanto	76
6.3 Öljynkulutus	81
6.4 Muu energiankulutus	88
6.5 Energian kokonaiskäyttö	89

7. TAVOITEOHJELMA SUOMELLE	93
7.1 Nykytilanne	93
7.2 Suomen sähkönhankinta	97
7.3 Kaukolämmön tuotanto Suomessa	103
7.4 Öljyn käyttö Suomessa	106
7.5 Suomen primäärienergian kulutus	111
8. TAVOITEOHJELMA EUROOPAN UNIONILLE	115
8.1 Tavoitteet EU:lle	115
8.2 EU:n sähköntuotanto	117
8.3 EU:n öljynkulutus	120
8.4 Energian kokonaiskulutus EU:ssa	125
9. TAVOITEOHJELMA KIINALLE	129
9.1 Tavoitteet Kiinalle	129
9.2 Kiinan sähköntuotanto	130
9.3 Kiinan öljynkulutus	134
9.4 Kiinan muu energiankulutus	139
9.5 Yhteenveto Kiinasta	140
10. TAVOITEOHJELMA USA:LLE	143
10.1 Tavoitteet USA:lle	143
10.2 USA:n sähköntuotanto	144
10.3 USA:n öljynkulutus	147
10.4 USA:n muu energiakäyttö	152
10.5 Yhteenveto USA:sta	153
11 MAAILMAN TAVOITTEET ALUEITTAIN	157
14.1 Sähköntuotannon tavoitteet alueittain	157
11.2 Maailman öljynkulutus alueittain	159
11.3 Maailman primäärienergiankulutus alueittain	160
11.4 Maailman CO ₂ -päästöt alueittain	162
11.5 Yhteenveto	163
12 MERIEN VAIKUTUS ILMASTOON	165
12.1 Merien lämpeneminen	165
12.2 Sään vaihtelut Atlantilla, NAO	168
12.3 Hurrikaanit	170
12.5 Tyynenmeren lämpeneminen	172

12.6 Jäätiköiden sulaminen	175
12.7 Merenpinnan nousu.....	178
12.8 Sademäärät.....	183
13 PITKÄN AJAN LÄMPENEMINEN	187
13.1 Seuraavat 200 vuotta	187
13.2 Edelliset 450.000 vuotta.....	191
16.3 Seuraavat 300.000 vuotta	195
14 PÄÄSTÖJEN PIENENTÄMISEN KEINOJA	199
14.1 Rakennusten aiheuttamat päästöt.....	199
14.2 Liikenne.....	208
14.3 Sähköntuotanto	212
15 ILMASTOPOLITIIKKAA	221
15.1 Kansainvälinen ilmastopolitiikka	221
15.2 EU:n toimenpiteet.....	222
15.3 Suomen ilmastopolitiikka	223
15.4 Yhteenveto	226
LIITTEET	227
<i>Liite 1 Eniten elävien metsien hiilivarastoja vähentäneet maat (GtCO₂).....</i>	<i>227</i>
<i>Liite 2 Eniten elävien metsien hiilivarastoja kasvattaneet maat (GtCO₂).....</i>	<i>227</i>
<i>Liite 3 Maailman sahateollisuuden tuotanto (Mm³/a).</i>	<i>228</i>
<i>Liite 4 Metsiin varastoitu CO₂-määrä (GtCO₂) EU:ssa vuosina 1990–2016</i>	<i>229</i>

Esipuhe

Kirjoitettuani kirjan *“Fundamentals of Global Warming”* ilmaston lämpenemisestä englannin kielellä nettiin arvelen, että olisi hyvä tehdä aiheesta vihdoinkin myös suomenkielinen kirja. Aiemmassa kirjassani olen kertonut, miten olen johtanut mallit ilmakehän CO₂-pitoisuuden kasvuun ja ilmaston lämpenemiselle. Tässä yritän kertoa asiat pääpiirteittäin menemällä suoraan havaitsemiini tuloksiin. Pidän mallini myös mahdollisimman yksinkertaisina, että niitä voisi esimerkiksi lukiolainenkin ymmärtää ja tehdä samanlaiset mallit myös itse.

Olen tehnyt mallinnuksen perusteella maailman maille tavoiteohjelman, miten voimme rajoittaa lämpötilan nousun Pariisissa sovitun 2,0 asteen sisälle. Sen sijaan en enää usko, että lämpötilan nousu voidaan rajoittaa 1,5 asteen ylärajalle. Päästöjen ja nielujen välillä vallitsee kaksinkertainen epätasapaino, joka nostaa ilmakehän CO₂-pitoisuutta ainakin vuoteen 2050 asti.

Auringonpilkkujen määrä on myös ollut minimissä 2010-luvulla. Kun pilkkujen määrä nousee taas normaalitasolle ilmasto olisi jo tänään 1,3 astetta lämpimämpää kuin vuosina 1901–1930 keskimäärin. Jos pilkkujen määrä olisi maksimitasolla, tänään olisi jo 1,5 astetta lämpimämpää kuin 1900-luvun alussa.

Olen ottanut vertailuarvoiksi vuodet 1901–1930, koska vasta silloin maailmassa oli kattava lämpötilanmittausverkosto. 1800-luvun lämpötiloja emme oikeasti tiedä kuin muutamista paikoista, joista useimmat on mitattu kaupunkien keskustoista kuten esimerkiksi Helsingin Kaisaniemestä ja eivät nekaan edusta oikeaa ympäristön lämpötilaa.

Kirjan tekemisen tärkeimpänä motiivinani on ollut ymmärtää lämpenemisen tilastomatematiikkaa. Tähän tarkoitukseen kansainvälisen ilmastopaneelin IPCC:n raporteista ei löydy mitään apua. Niissä kerrotaan ainoastaan lopputulos, mutta ei matematiikkaa, miten siihen on päädytty. Sieltä ei löydy edes minkäänlaista matemaattista mallia, kuinka ilmakehän CO₂-pitoisuus vaikuttaa lämpötilaan. Sieltä ei löydy myöskään mallia, miten ilmakehän CO₂-pitoisuus muuttuu CO₂-päästöjen muuttuessa.

Toisena motiivinani on ollut tehdä suunnitelma, jonka avulla ilmaston lämpötila voidaan rajoittaa kahteen asteeseen. Meillä on vielä aikaa, mutta toimeen on tartuttava nopeasti ja maailmanlaajuisesti. Kirjani ***“Ilmaston lämpenemisen pysäytys kahteen asteeseen”*** on tavoiteohjelma, jonka avulla tähän voidaan vielä päästä. Siihen päästään, jos päästöjä vähennetään 50 % vuoteen 2050 mennessä. Tältä pohjalta olen laatinut ennusteen maailman tilalle seuraavien 200 vuoden ajaksi.

Espoossa 1.1.2021

Asko Vuorinen

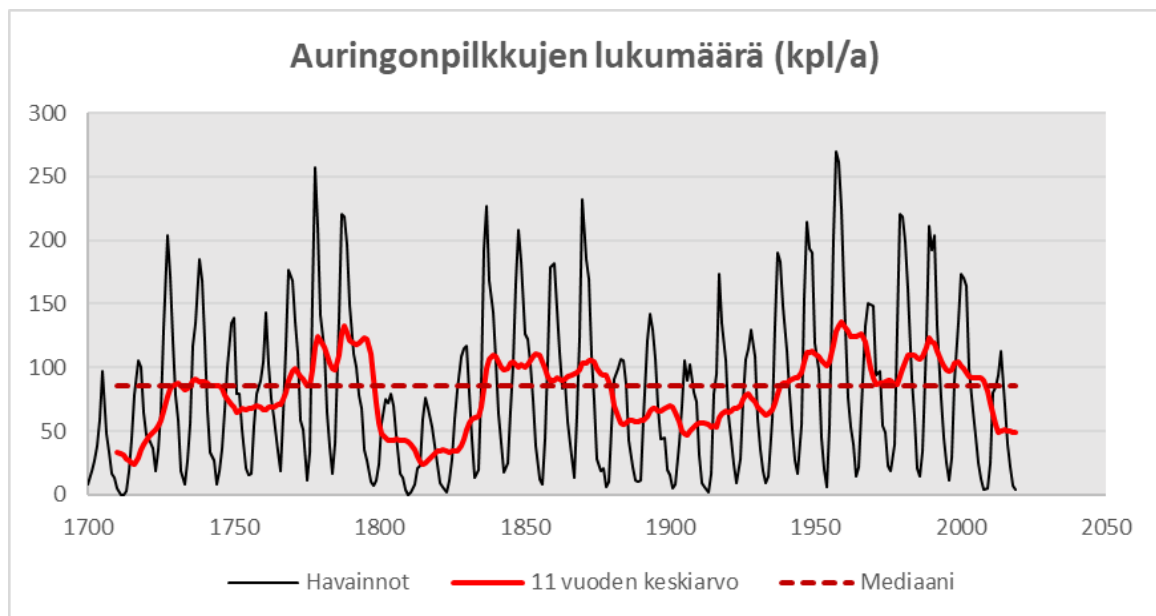
1 JOHDANTO

1.1 Lämpötilan vaihtelun historiasta

Ilmaston lämpeneminen ei ole pelkästään tämän päivän ilmiö. Historiasta tunnetaan ajanjaksoja, jolloin ilmasto välillä lämpeni ja kylmeni huolestuttavasti ja aiheutti nälänhätää. Lämpimän jakson aikana vuosina 900–1100 tiedetään, että viikingit asuttivat Grönlannin, mutta muuttivat takaisin, kun ilmasto kylmeni sen jälkeen.

1400-luvun jälkeen Euroopassa oli kylmä kausi, jolloin useana vuotena mm. Thames-joki jäättyi. Vuonna 1658 Ruotsin armeija valloitti Tanskan kulkemalla jäitä pitkin Vähä-Beltin ja Iso-Beltin yli. Suomen historiassa tunnetaan suuret nälkävuodet 1690-luvulla, jolloin jopa noin 28 % (140.000) suomalaisista kuoli nälkään ja sairauksiin. Nälkävuodet aiheutti kylmä kausi, jolloin sato tuhoutui osittain kolmena peräkkäisenä kesänä vuosina 1695–97.

Pohjoismaiden kylmää kautta 1600-luvulla on selitetty auringon aktiivisuuden heikkenemisellä ja tulivuorten purkauksilla. Auringon aktiivisuutta on mitattu 1600-luvun puolivälistä alkaen laskemalla auringonpilkkujen määrää. Niistä havaitaan, että 1600-luvulla aina vuoteen 1730 asti oli ns. **Maunderin** minimi, jolloin auringonpilkkujen määrä oli pienempi kuin mediaaniarvo 87 (Kuva 1.1.1). Tarkkoja lukuja ei ole saatavissa 1600-luvulta, koska kaukoputket olivat alkeellisia ja yhtenäistä laskentatapaa pilkkujen määrittämiseen ei ollut käytössä.



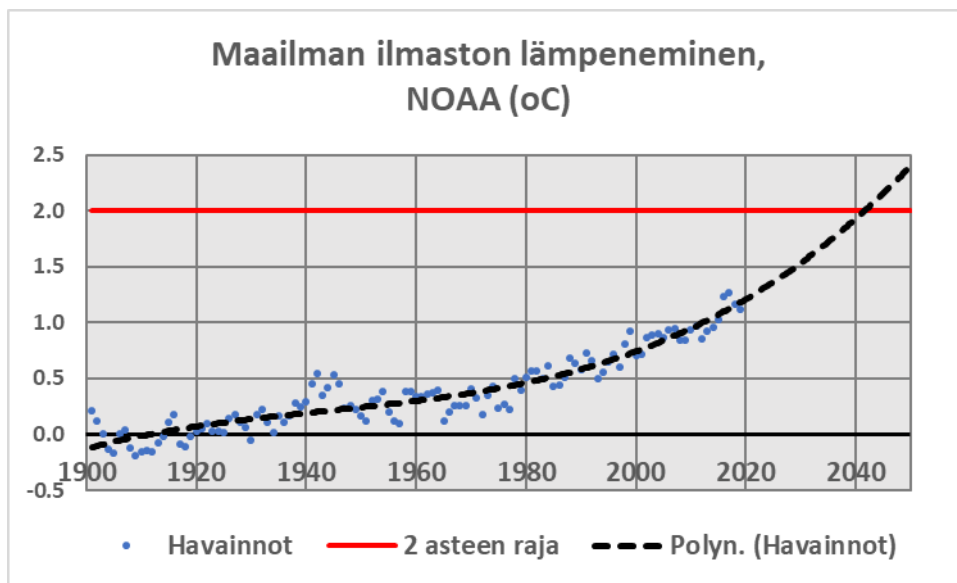
Kuva 1.1.1 Auringonpilkkujen lukumäärä vuosittain. Mediaani on 87, joka on laskettu 11 vuoden keskiarvoista.

1600-luvun kylmä kausi oli myös Italiassa, koska tiedetään, että Stradivarius-viulut on tehty huomattavasti tiheäsisemmästä puusta kuin nykyisin tehtävät viulut. **Antonio Stradivarius** (1644–1737) rakensi noin 1100 viulua elinaikanaan. Tiheäsyisen puumateriaalin ansiosta viulun ääni ja kestävyys olivat myös ainutlaatuisia.

Auringonpilkkujen määrästä voidaan päätellä, että maailman lämpötila oli keskimäärin noin 0,4 astetta viileämpää 1700-luvun alussa kuin vuosina 1700–2000 keskimäärin. Suomessa oli samaan aikaan noin kaksi astetta viileämpää kuin 1900-luvun alussa. Toinen kylmä kausi osui 1800-luvun alkuun ja kolmas 1900-luvun alkuun.

1.2 Lämpeneminen 1900-luvulta alkaen

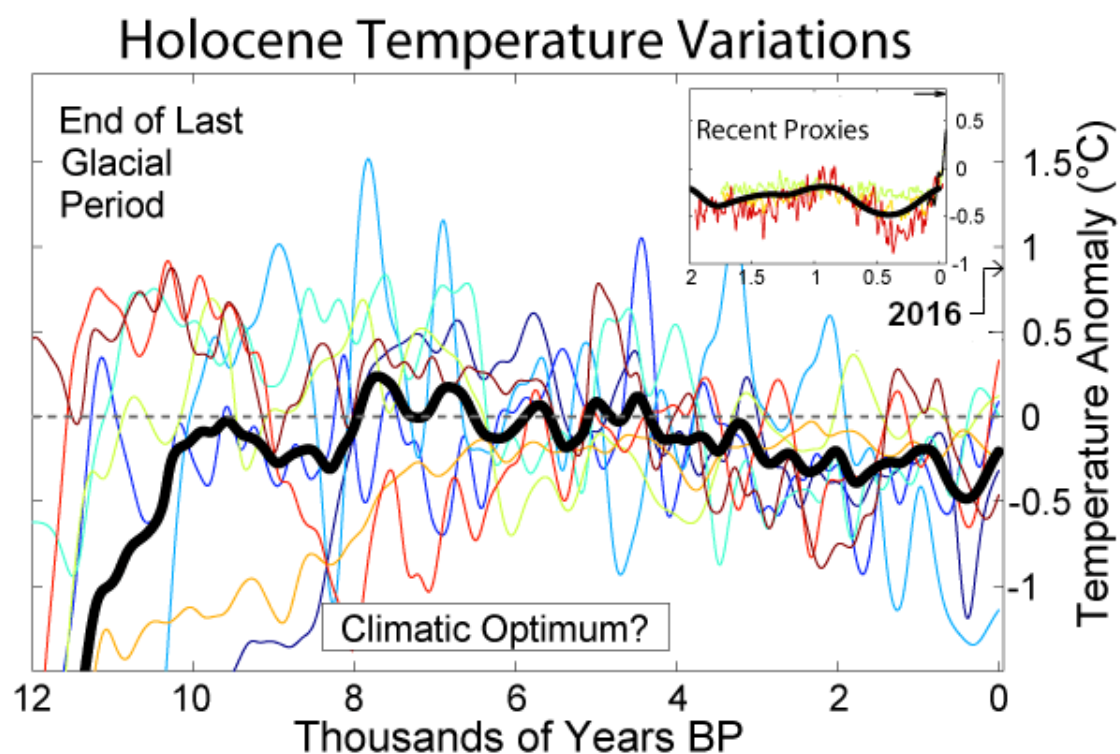
Viime vuosien lämmin kausi on 1900-luvun alusta alkaen pystytty mittamaan lämpötilamittareilla tarkasti. Mittausten mukaan lämpötila on noussut 1900-luvun alkuvuosista noin 1,2 astetta (Kuva 1.2.1). Jos nousu jatkuu polynomisen trendin mukaan, 1,5 asteen nousu on edessä vuonna 2030 ja kahden asteen nousu vuonna 2040.



Kuva 1.2.1 Mitattu lämpötilan nousu vuosista 1901–1930 lähtien. (Lähde: NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration).

Kuvan mukaan ensimmäinen 0,5 asteen lämpeneminen kesti 80 vuotta. Yhden asteen lämpeneminen oli totta vuonna 2010, jolloin 0,5 asteen lämpeneminen tapahtui 30 vuodessa. Lämpenemisnopeus on ollut 0,17 astetta vuosikymmenessä. Polynomisen trendin mukaan seuraava 0,5 asteen lämpeneminen tapahtuu noin 15 vuodessa, jolloin lämpenemisnopeus olisi 0,33 astetta kymmenessä vuodessa.

Viimeaikaista lämpenemisnopeutta voidaan verrata jääkauden jälkeen tapahtuneeseen lämpenemiseen, Holoseeniin. Silloin lämpötila nousi 1,5 astetta noin 1300 vuodessa (Kuva 1.2.2). Vuoden 1900 jälkeen 1,5 asteen nousu tapahtuu noin 130 vuodessa. Lämpeneminen on ollut nyt kymmenen kertaa nopeampaa kuin viime jääkauden jälkeen.

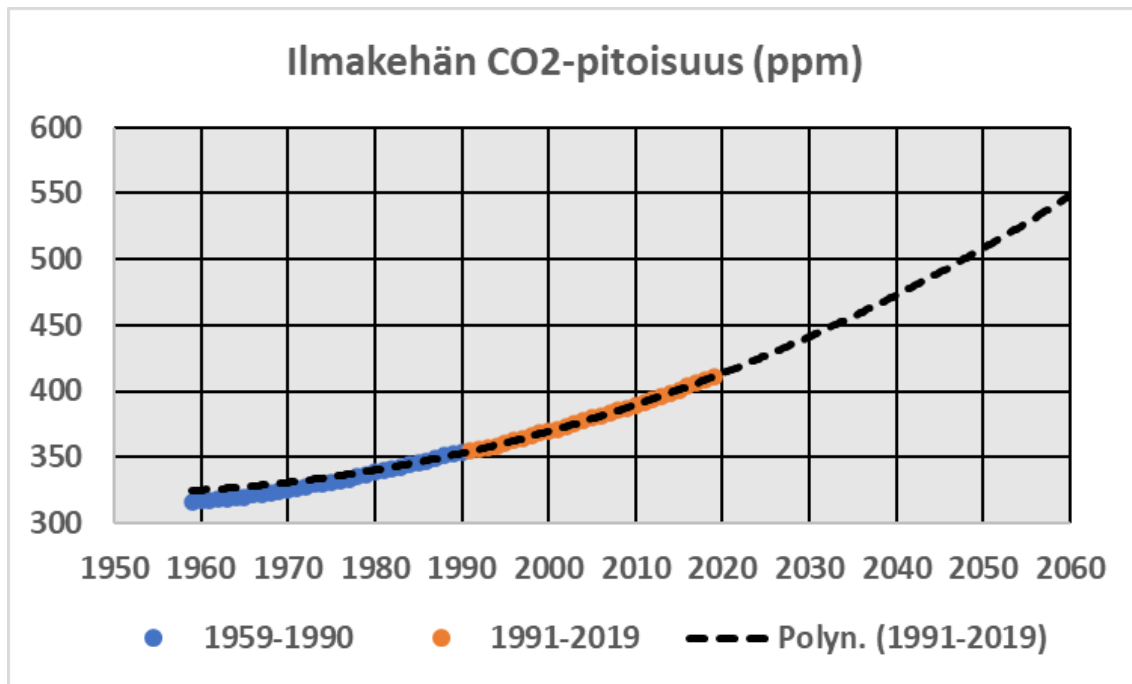


Kuva 1.2.2 Ilmaston lämpeneminen viimeisen jääkauden jälkeen (Wikipedia).

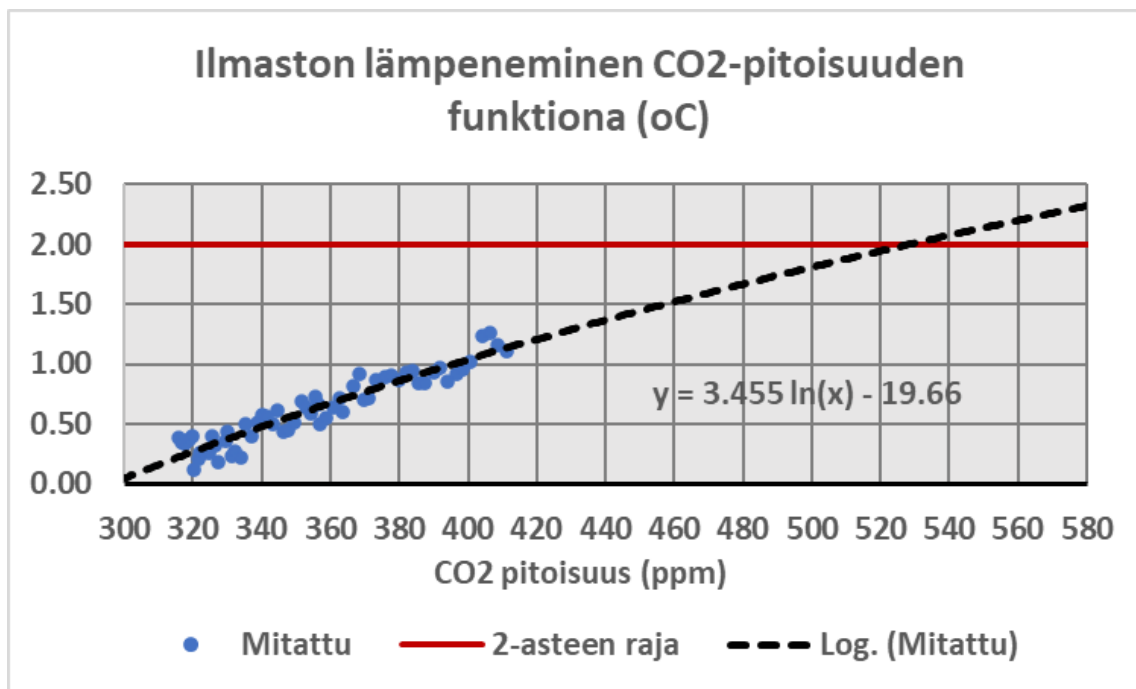
1.3 Ilmaston lämpenemisen syyt

Ilmaston lämpenemisen tärkeimpänä syynä on pidetty ilmakehän CO₂-pitoisuuden nousua. CO₂-pitoisuutta on mitattu vuodesta 1958 lähtien ja sen on havaittu nousevan koko ajan kiihtyvällä nopeudella (Kuva 1.3.1). Pitoisuus on noussut vuodesta 1960 vuoteen 1990 mennessä 319 ppm:stä 350 ppm:ään eli 31 ppm (1 ppm/vuosi).

Vuoden 1990 jälkeen vuonna 2019 ollaan jo 411 ppm:n arvossa, jolloin 29 vuodessa nousu on ollut 59 ppm (n. 2 ppm/vuosi). Polynomisen trendin mukaan CO₂-pitoisuus nousee seuraavan 40 vuoden aikana arvoon 550 ppm eli noin 140 ppm:llä (3,5 ppm/vuosi). Silloin pitoisuus olisi noin kaksinkertainen esiteolliseen aikaan verrattuna.



Kuva 1.3.1 Ilmakehän CO₂-pitoisuuden nousu.



Kuva 1.3.2 Ilmaston lämpeneminen CO₂-pitoisuuden funktiona.



Kuva 1.3.3 Svante Arrhenius (1859 – 1927).

Hiilidioksidin vaikutus lämpötilaan tunnetaan jo vuodesta 1896 alkaen, jolloin Nobelin palkinnon saanut ruotsalainen kemisti **Svante Arrhenius** (Kuva 1.3.3) julkaisi Philosophical Magazinessa artikkelinsa “*On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground*” (April 1896). Siinä hän oli laskenut **Samuel Pierpoint Langley**n tekemien kuun infrapunataulukoiden avulla, että CO₂-pitoisuuden kaksinkertaistuessa ilmakehän lämpötila muuttuu 5–6 °C. Hän esitti lämpenemiselle (dT) matemaattisen mallin:

$$dT = A \times \ln (C/Co),$$

jossa A = vakio

C= ilmakehän CO₂-pitoisuus

Hänen laskelmiensa mukaan CO₂-pitoisuuden kaksinkertaistuminen tarkoittaa, että lämpötila nousee 5 astetta päiväntasaajalla ja noin 6 astetta Suomen korkeudella. Keskimääräinen luku olisi noin 5,5 astetta. Sen mukaan Arrheniuksen vakio A olisi ollut 8.

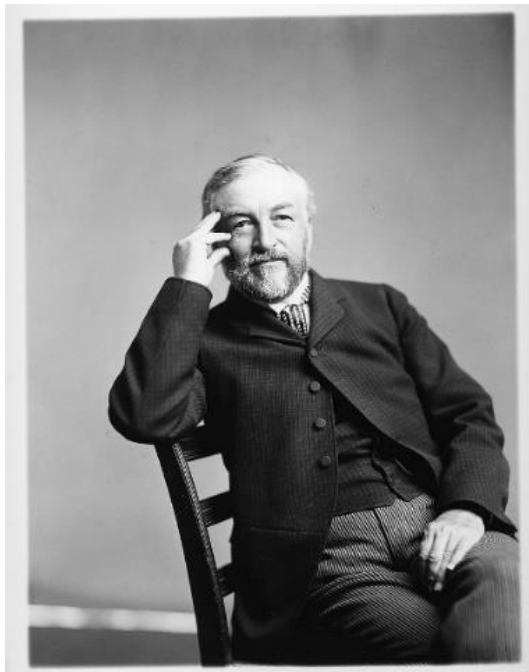
Kun ilmaston lämpenemisen esittää mitattujen CO₂-pitoisuuksien funktiona, havaittu kerroin A onkin 3,455 eli alle puolet Arrheniuksen arvioimasta kahdeksasta (Kuva 1.3.2). Kuvan mukaan lämpeneminen olisi 1,5 astetta, jos CO₂-pitoisuus nousee arvoon 450 ppm ja 2,0 astetta, kun pitoisuus on 530 ppm. CO₂-pitoisuuden noustessa kaksinkertaiseksi esiteollisesta ajasta arvoon 550–560 ppm, lämpötilan nousu olisi logaritmisin mallin mukaan 2,2 astetta.

Arrheniuksen mallin kertoimiksi saadaan edellisen mitattujen havaintojen mukaan (Kuva 1.3.2) kaava:

$$dT=3,455 \times \ln (C)-19,66 =3,455 \times \ln (C/296)$$

Arrheniuksen mallin kerroin $A = 8$ voi kuitenkin olla oikea, jos lisämuuttujaksi otetaan ilmakehän aerosolipitoisuus, joka puolestaan kylmentää ilmastoa. Kuten tuolla jo aiemmin todettiin, vuosien 1695–97 tulivuorenpurkaukset viilensivät ilmastoa.

Arrheniuksen malli olisi vastannut mitattuja lämpötiloja, jos aerosolien viilentävä vaikutus olisi ollut $5,5 - 2,4 = 3,1$ astetta. Myös auringon säteilyllä on ollut vaikutusta lämpenemiseen. Kunnollinen malli saadaan vasta, kun myös auringon ja aerosolien osuus otetaan mukaan mallinnukseen. Auringon ($S=\text{sun}$), hiilidioksidin ($C=\text{CO}_2$) ja aerosolien ($A=\text{Aerosolit}$) osuus voidaan laskea SCA2-mallin avulla.

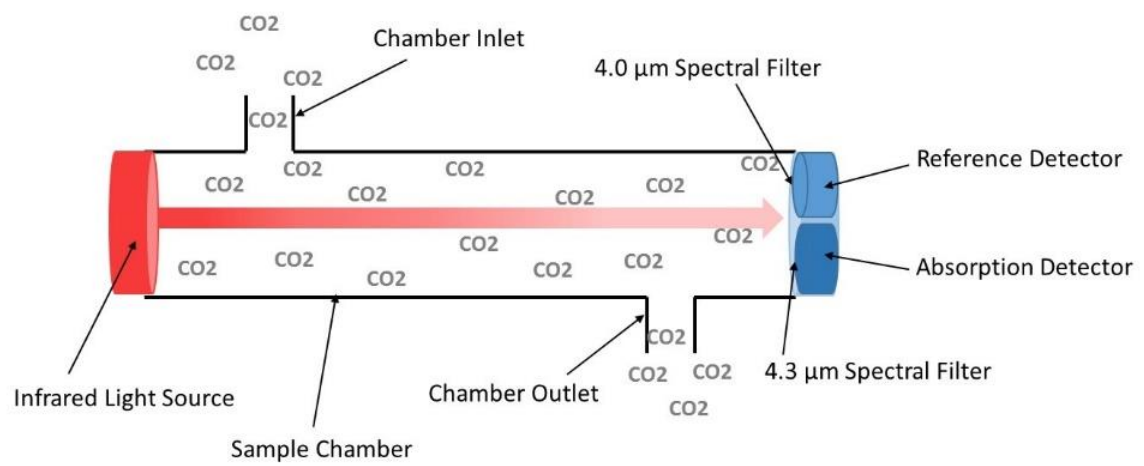


Kuva 1.3.4 Samuel Langley (1836 – 1906).

Samuel Langley toimi astronomian professorina Pittsburghin yliopistossa. Hän oli keksinyt vuonna 1880 Bolometrin, joka mittasi infrapunasäteilyn voimakkuutta eri taivaankappaleista (Kuva 1.3.5).

Hän oli laatinut taulukot kuun infrapunasäteilystä mittaamalla sitä Kalliovuorilla. Bolometrin toimintaan perustuvat myös CO_2 -pitoisuuden mittarit, joissa anturin toisesta päästä lähetetään infrapunasignaali, joka mitataan anturin toisesta päästä.

CO_2 -mittarin toiminta perustuu infrapunasäteilyn voimakkuuden mittaukseen koeputkessa, johon päästetään ilmaa. Mitä suurempi on ilman CO_2 -pitoisuus, sitä pienempi osa infrapunasäteilystä pääsee mittarin anturiin. CO_2 -mittarin toiminnan ymmärtäminen on avainasia myös CO_2 :n lämmittävän vaikutuksen ymmärtämiseen.



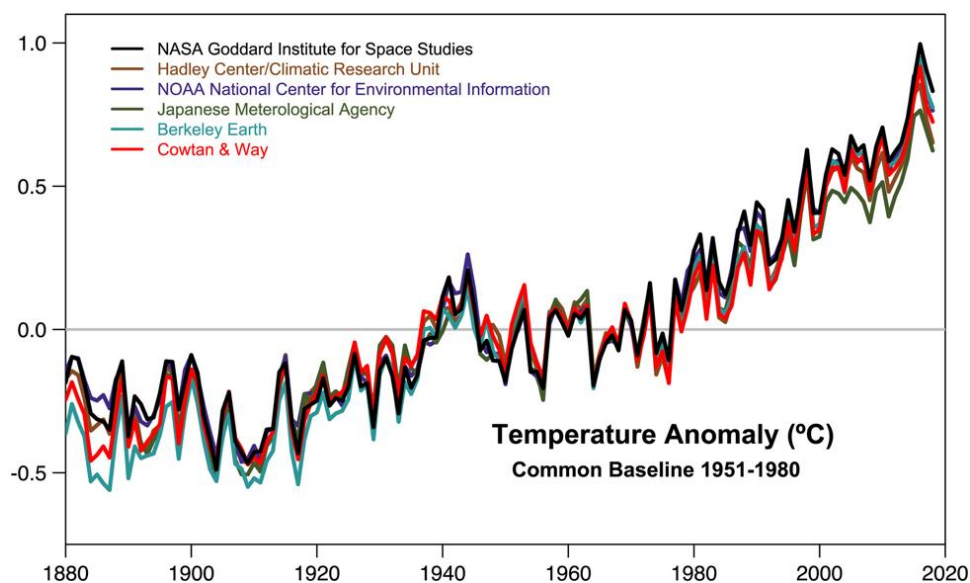
Kuva 1.3.5 CO₂-mittarin toimintaperiaate (Vaisala)



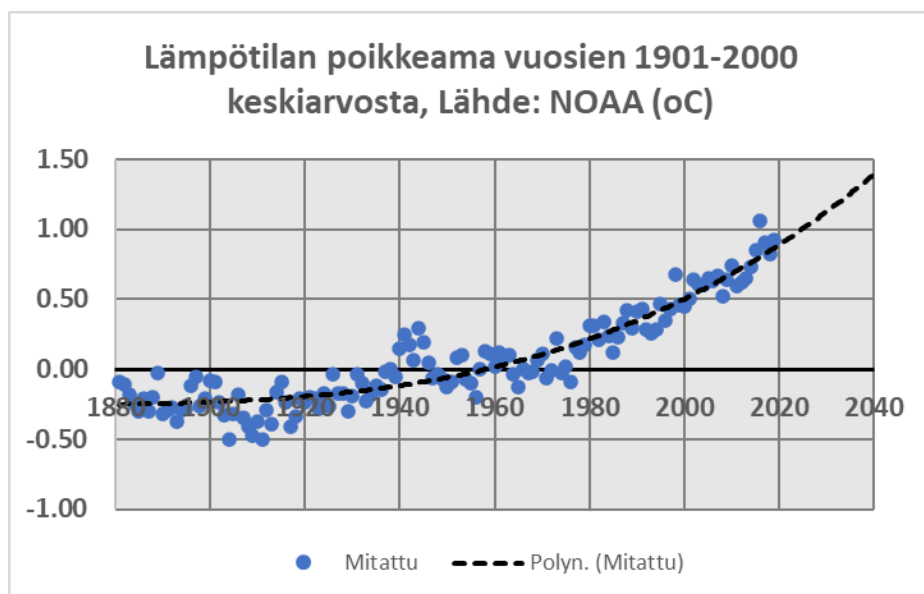
2. LÄMPÖTILAN MITTAUSTIEDOT

2.1 Kansainväliset tiedostot

Lämpötilojen mittaustietoja on kerätty 1880-luvulta alkaen usean eri instituutin toimesta (Kuva 2.1.1.). Näistä National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) osuu näiden arvioiden keskivaiheelle ja sen vuoksi olen käyttänyt heidän lukujaan (land and sea) kuvaamaan maailman keskilämpötilaa.

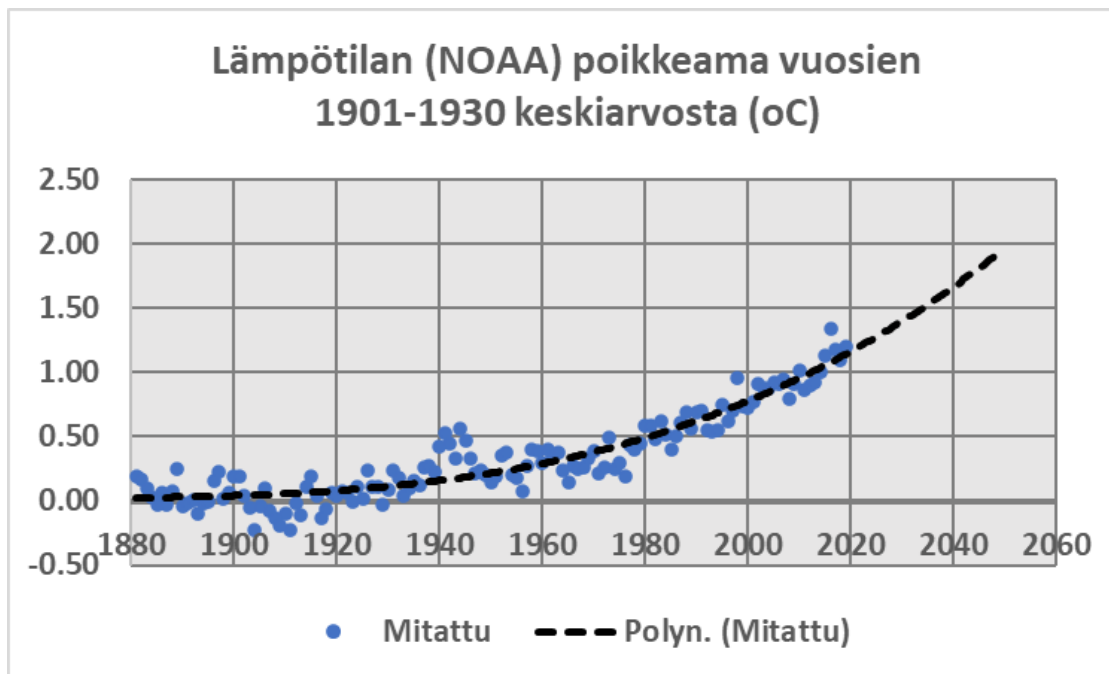


Kuva 2.1.1 Eri instituuttien lämpötilatietoja.



Kuva 2.1.2 NOAA:n keräämät lämpötilatiedot 1880–2019.

Kuvan 2.1.2 mukaan lämpötila on nyt noin 0,9 astetta korkeampi kuin vuosina 1901–2000 keskimäärin. Kun vertailuvuosi on vuosien 1901–1930 keskilämpötila, vuoden 2019 lämpötila on noin 1,2 astetta korkeampi (Kuva 2.1.3). Polynomien trendi kertoo, että 2,0 astetta ylittyisi noin vuonna 2050.

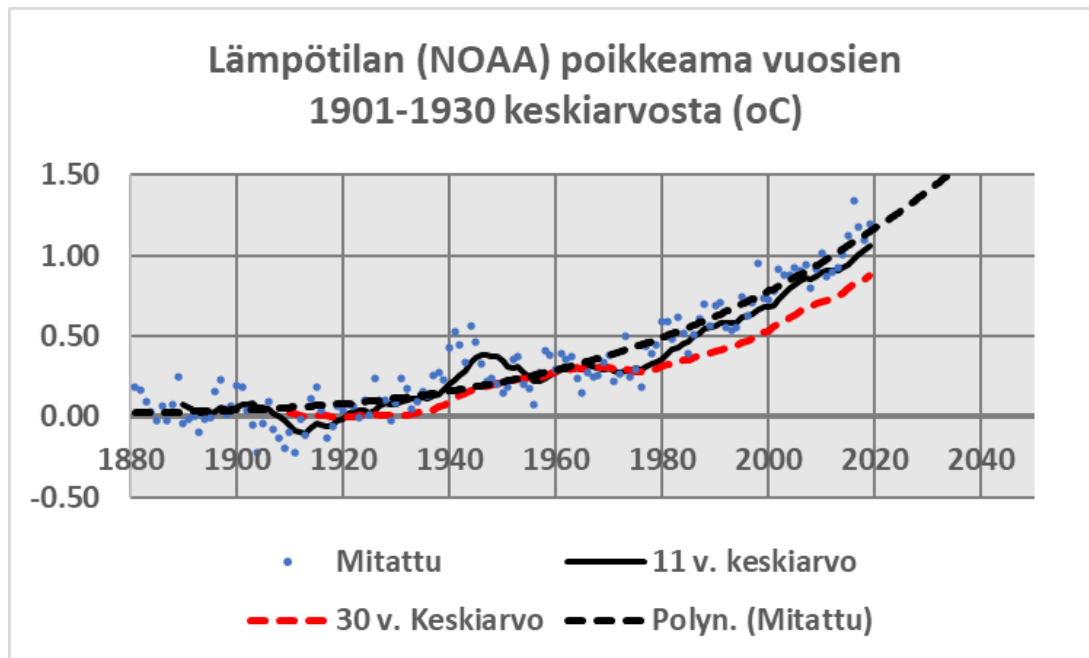


Kuva 2.1.3 Lämpötila vuosien 1901–1930 keskiarvoon verrattuna, NOAA.

Ilmastotieteessä 30 vuoden keskiarvoja on pidetty vertailukohtana, kun ilmaston lämpenemisen kehitystä on seurattu. Tässä kirjassa vuosien 1901–1930 lämpötilojen keskiarvoa pidetään vertailutasona, johon lämpötilaa verrataan. Tästä ajanjaksosta mittauksia löytyy myös Suomesta. Kuvasta 2.1.4 havaitaan, että 30 vuoden keskilämpötila on noussut 0,87 astetta vuosien 1901–1930 keskiarvosta vuoteen 2019 mennessä.

Samasta kuvasta havaitaan, että 11 vuoden keskiarvo on noussut vuosista 1901–1930 lähtien puolestaan 1,07 astetta. Vuosikeskiarvoja mittavaan trendin mukaan lämpötila on noussut puolestaan jo 1,20 astetta vuosiin 1901–1930 verrattuna.

Jo tämä vuosiarvojen trendi jatkuu samanlaisena, lämpötilan nousu olisi lähes 1,5 astetta vuoteen 2030 mennessä. Kun vielä huomioidaan, että nyt eletään auringonpilkkujen minimivaihetta, niin voidaan jo ennustaa, että lämpötilan nousua ei ehditä enää pysäyttämään 1,5 asteeseen. Sen sijaan nousu voidaan kylläkin pysäyttää alle kahden asteen.



Kuva 2.1.4 Lämpötila vuosien 1901–1930 keskiarvoon verrattuna, NOAA.

2.2 Suomen lämpötilat

Tarkkoja aikasarjoja Suomen eri paikkakuntien lämpötiloista on julkaistu yhtenäisinä tiedostoina vain Helsingin ja Sodankylän osalta (Kuva 2.2.1). Kuvasta havaitaan, että Sodankylän ja Helsingin 11 vuoden keskilämpötilat ovat nousseet 1,6 ja 2,1 astetta vastaavasti vuodesta 1911 vuoteen 2019 mennessä.

Helsingin nousua voidaan pitää osittain kaupunkisään aiheuttajana ja sitä ei voi pitää vertailukelpoisena, kuten kuukausikohtaisista mittaustiedoista (Taulu 2.2.1) huomataan. Teorian mukaan lämpötilan nousun pitäisi olla hitaampaa Helsingissä, koska se on etelämpänä.

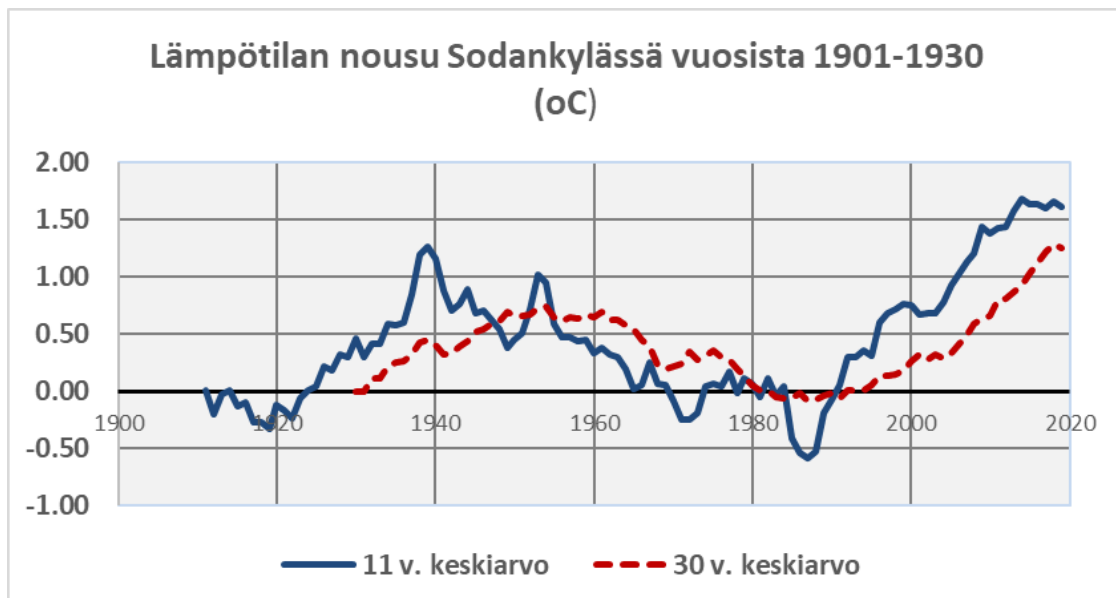
Sodankylän lämpötiloja voidaan uskoa edustavan parhaiten Suomen ja Pohjois-Euroopan lämpötiloja. Sodankylän 11 vuoden lämpötilan keskiarvo nousi ensi vuodesta 1911 arvoon 1,2 vuoteen 1940 mennessä (Kuva 2.2.2). Sen jälkeen tapahtui lasku nolnaan vuoteen 1980 mennessä ja edelleen nousu 1,6 asteeseen vuoteen 2019 mennessä. Tämä on seurausta Pohjois-Atlantin merivirtojen lämpötilojen vaihtelusta (AMO-ilmiöstä), johon palataan luvussa 15.

Toinen tekijä on rikkipäästöt, joiden määrä oli suurimmillaan 1970- ja 1980-lukujen aikana. Lämpötilan nousu on Sodankylässä ollut 60 % nopeampaa kuin maailman 11 vuoden keskilämpötila, joka on noussut samana aikana noin 1,0 astetta. Tähän vaikuttaa vielä nytkin AMO-ilmiö, joka nostaa meriveden lämpötiloja Pohjois-Atlantilla.



Kuva 2.2.1 Sodankylän ja Helsingin 11 vuoden keskilämpötilat.

Kuvasta 2.2.2 havaitaan, että Sodankylän 30-vuoden keskilämpötila nousi ensin vuodesta 1930 vuoteen 1960 mennessä noin 0,6 astetta, mutta laski takaisin ja oli Sodankylässä vuosina 1980–1990 jopa alle vuosien 1901–1930 keskiarvon.



Kuva 2.2.2 Sodankylän lämpötilojen nousu vuosien 1901–1930 keskiarvosta.

Suomen tilastollisista vuosikirjoista selviää kunkin vuoden lämpötilat kuukausittain muutamalla paikkakunnalla vuosina 1901–1930 ja 1981–2010. Niistä on poimittu 30 vuoden keskilämpötilat neljällä paikkakunnalla vuosina 1901–1930 ja 1981–2010 (Taulu 2.2.1).

Taulu 2.2.1 Lämpötilan nousu Suomessa neljällä paikkakunnalla vuosista 1901–1930 vuosiin 1981–2010 (Lähde: Suomen tilastolliset vuosikirjat).

kk	Oulu	Sodankylä	Ahvenanmaa	Helsinki	Mediaani
1	-0.60	0.00	0.30	1.60	0.15
2	0.70	1.10	0.30	1.10	0.90
3	0.70	1.40	1.00	1.40	1.20
4	1.40	1.20	1.50	1.70	1.45
5	1.90	1.30	2.10	2.00	1.95
6	1.70	1.00	1.60	1.60	1.60
7	0.80	0.70	1.10	1.50	0.95
8	0.90	0.90	1.00	1.10	0.95
9	0.70	0.50	0.90	0.90	0.80
10	1.30	1.30	0.80	1.30	1.30
11	0.50	0.90	0.60	1.10	0.75
12	0.30	0.20	0.50	1.40	0.40
Vuosi	0.86	0.90	1.07	1.43	0.99

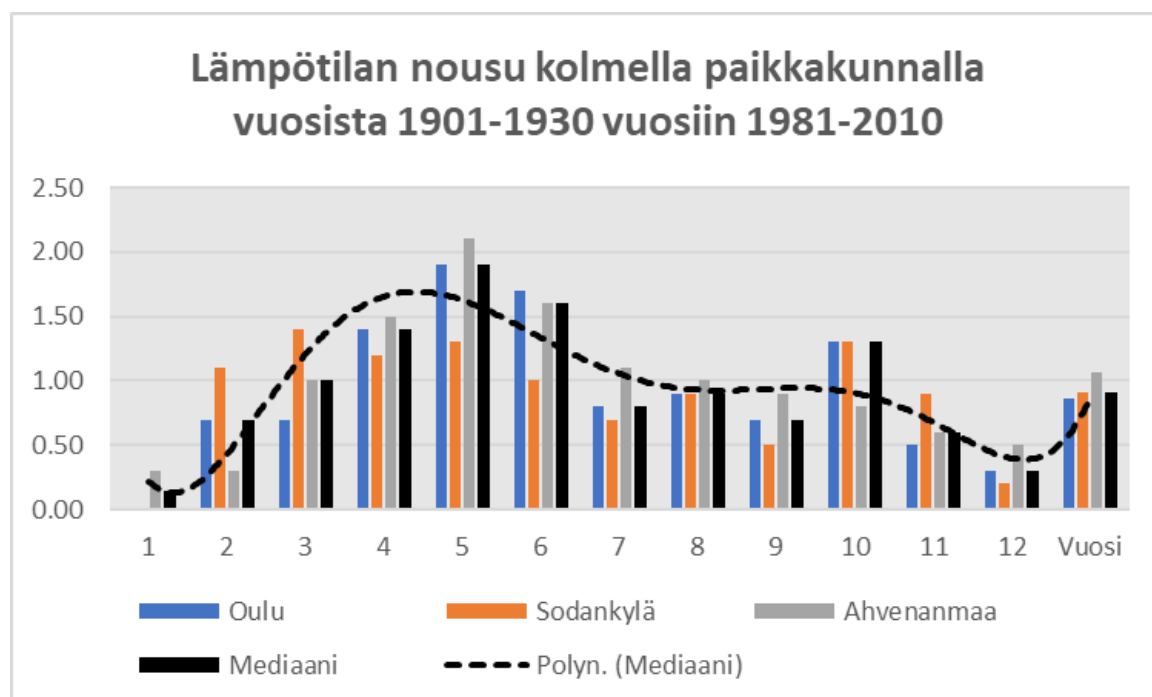
Lämpötilan nousu on muilla paikkakunnilla ollut hyvin samantapaista paitsi Helsingissä. Eniten ovat nousseet kevään lämpötilat huhti-, touko- kesäkuussa ja vähiten joului- ja tammikuun arvot. Tämä voidaan selittää osittain auringon säteilyn vaikutuksena, koska joului- ja tammikuusta nousua juurikaan ole tapahtunut.

Taulusta voidaan havaita, että lämpötilan nousu on Helsingissä ollut erikoista, koska siellä lämpötila on noussut myös joului- ja tammikuussa yli yhden asteen. Vaikuttaa siltä, että Helsingin mittauksiin vaikuttaa juuri talvella kaupungin lämmitys, joten se ei edusta millään tavalla ilmaston lämpenemistä.

Ilman Helsinkiä saadaan 30 vuoden keskilämpötilan mediaaninousuksi 0,93 astetta 80 vuodessa (Taulu 2.2.2). Lämpötilan nousu 80 vuodessa (1930–2010) on ollut Suomessa 30 % nopeampaa kuin maailmassa keskimäärin, jossa 30-vuoden keskilämpötila on noussut samana aikana 0,72 astetta. Tähän pitää laittaa kuitenkin huomautus, että Suomen lämpötilaan vaikuttavat Atlantin meriveden lämpötilan heilahtelut eli ns. AMO-ilmiö.

Taulu 2.2.2 Lämpötilan nousu kolmella paikkakunnalla vuosista 1901–1930 vuosiin 1981–2010. (Lähde: Suomen tilastolliset vuosikirjat).

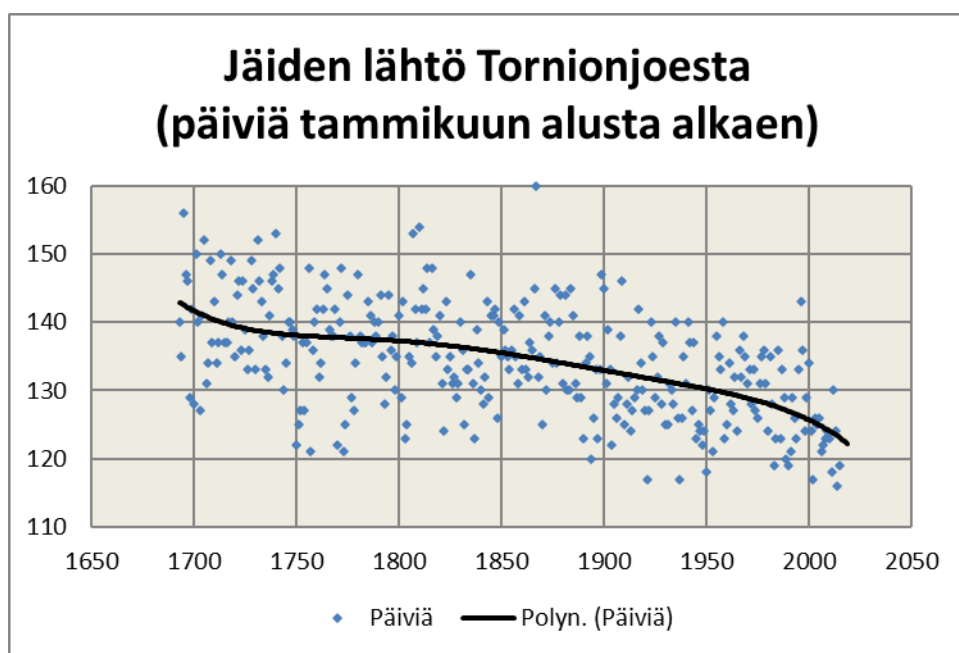
kk	Oulu	Sodankylä	Ahvenanmaa	Mediaani
1	-0.60	0.00	0.30	0.00
2	0.70	1.10	0.30	0.70
3	0.70	1.40	1.00	1.00
4	1.40	1.20	1.50	1.40
5	1.90	1.30	2.10	1.90
6	1.70	1.00	1.60	1.60
7	0.80	0.70	1.10	0.80
8	0.90	0.90	1.00	0.90
9	0.70	0.50	0.90	0.70
10	1.30	1.30	0.80	1.30
11	0.50	0.90	0.60	0.60
12	0.30	0.20	0.50	0.30
Vuosi	0.86	0.90	1.07	0.93



Kuva 2.2.3 Lämpötilan nousu kolmella paikkakunnalla vuosista 1901–1930 vuosiin 1981–2010. (Lähde: Suomen tilastolliset vuosikirjat).

Jäiden lähtö Tornionjoesta

Suomessa tunnetaan pitkäaikainen aikasarja Tornionjoen jäidenlähdestä, jota on tilastoitu vuodesta 1690 lähtien. Vuosina 1691–1720 jäät lähtivät noin 141 päivää vuoden alusta, mutta vuosina 1981–2010 noin 127 päivää tammikuun alusta (Kuva 2.2.4). Jäiden lähtö on siirtynyt 14 päivää aikaisemmaksi.

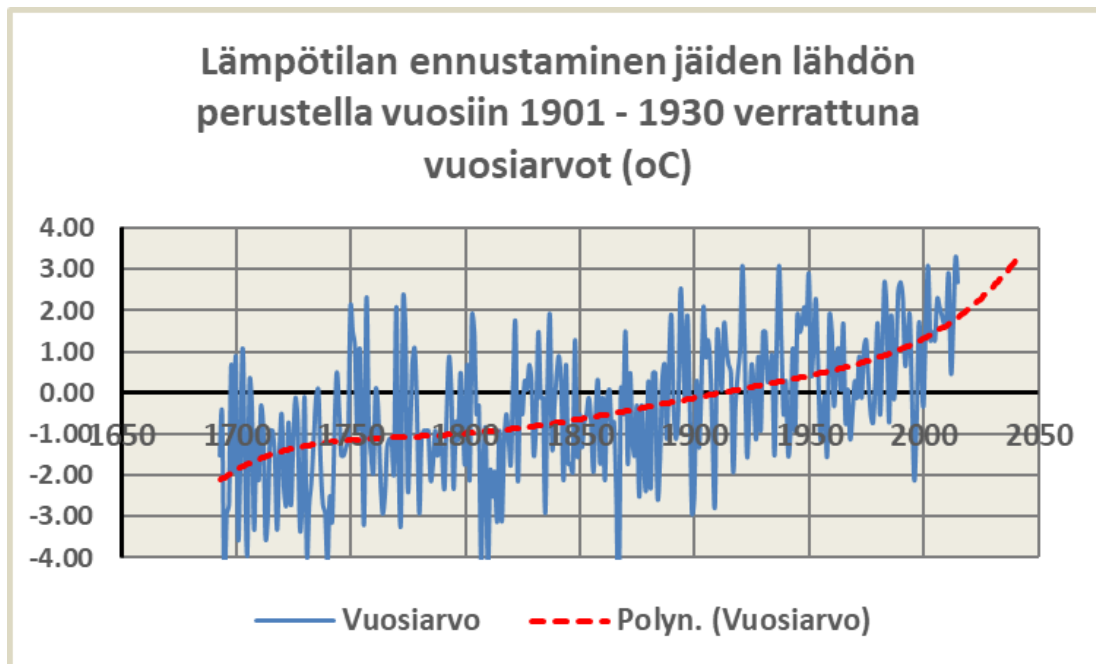


Kuva 2.2.4 Jäiden lähtö Tornionjoesta vuodesta 1680 alkaen.

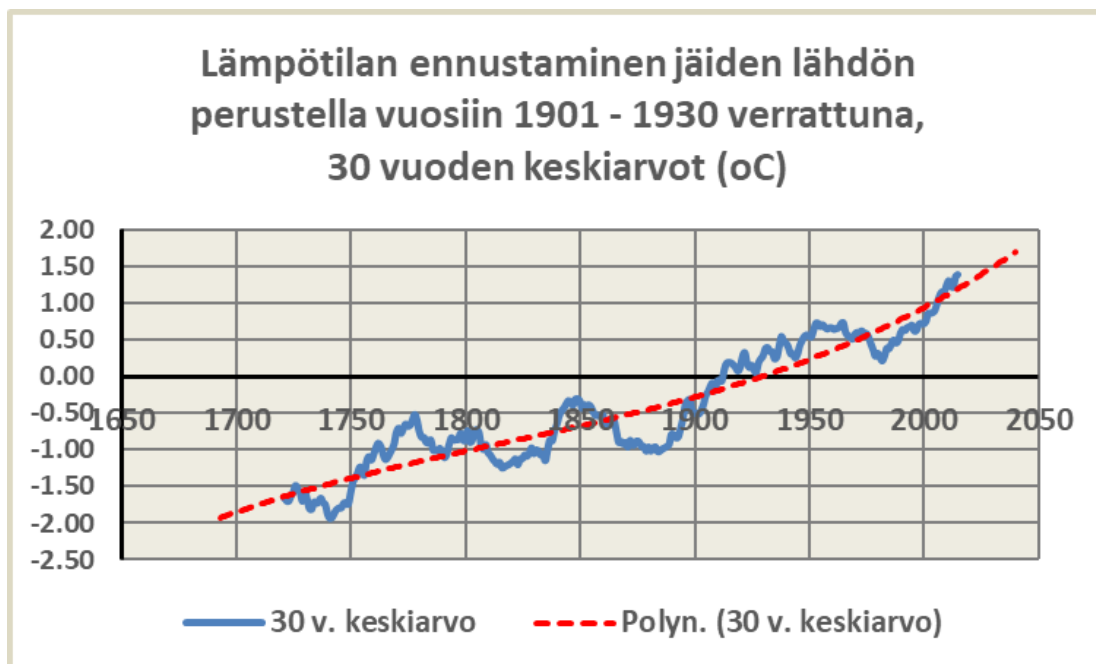
Kuvasta huomataan, että vuosista 1691–1720 vuosiin 1901–1930 jäiden lähtö muuttui noin 10 päivällä eli 4,8 päivällä sataa vuotta kohti. Vuosista 1901–1930 vuosiin 1981–2010 jäiden lähtö on aikaistunut noin 4,5 päivällä eli 5,6 päivällä sataa vuotta kohti.

Ilmasto on lämmennyt Oulussa ja Sodankylässä vuosina 1930–2010 keskimäärin noin 0,88 astetta eli 1,1 astetta sataa vuotta kohti. Samana aikana jäidenlähtö on aikaistunut noin 4,5 päivällä. Karkea malli jäiden lähdölle on noin kaksi astetta per 10 päivää. Vuonna 1700 jäät lähtivät noin 10 päivää myöhemmin kuin vuonna 1900. Siitä saadaan karkeaksi arvioksi, että Oulussa ja Sodankylässä oli vuonna 1700 noin 2,0 astetta (0,11 °C/p) kylmempää kuin vuonna 1900. Lämpötila nousunopeus oli silloin noin 1,0 °C/100 vuotta.

Tästä lämpötilan ja jäidenlähdon riippuvuudesta voidaan tehdä karkea malli vuosien 1690–1900 lämpötilalle Suomessa (Kuva 2.2.5 ja Kuva 2.2.6). Sen mukaan 1690-luvulla Suomessa olisi ollut noin kahden asteen verran kylmempää kuin vuosien 1901–1930.



Kuva 2.2.5 Suomen lämpötilan ennustaminen jäiden lähdön perusteella vuosina 1690–1900 (Vuosi-arvot °C).



Kuva 2.2.6 Suomen lämpötilan ennustaminen jäiden lähdön perusteella vuosina 1690–1900 (30 vuoden keskiarvot, °C).

3. AURINGON SÄTEILYN VAIKUTUS

3.1 Maapallon lämpötila

Auringon lähtevä säteilyteho (P_s)

Auringon säteilyn määrä voidaan laskea Stefan-Boltzmannin kaavalla:

$$(3.1.1) \quad S_{\text{out}} = \sigma \times T^4, \text{ jossa}$$

$$\sigma = \text{Stefan-Boltzmannin vakio} = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$$

$$T = \text{auringon keskilämpötila} = 5774 \text{ K}$$

Auringon säteilyn tehoksi saadaan kaavan mukaan $6,30 \times 10^7 \text{ W/m}^2$. Auringon säde on 696.340 km ja pinta-ala on $4 \times 3,1416 \times 696340^2 = 6,093 \times 10^{18} \text{ m}^2$, jolloin auringon säteilyn kokonaisteho (P_s) on

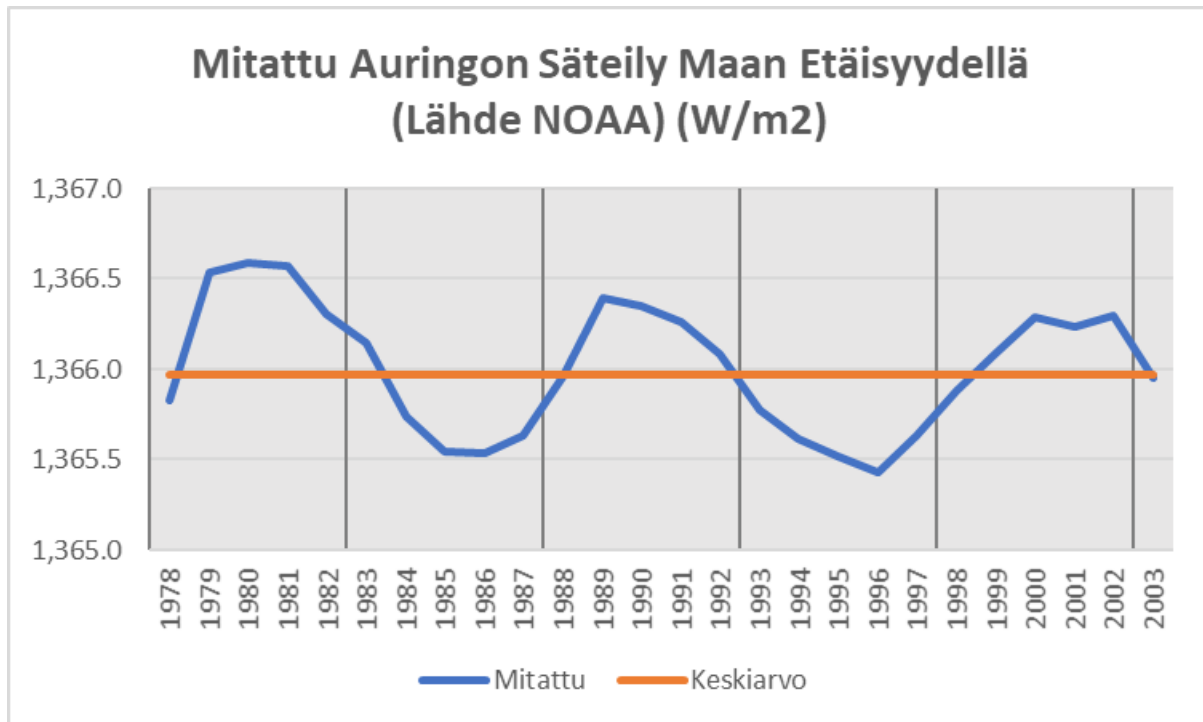
$$(3.1.2) \quad P_s = A \times S_{\text{out}} = (6,093 \times 10^{18}) \text{ m}^2 \times (6,30 \times 10^7) \text{ W/m}^2 \\ = 3,841 \times 10^{26} \text{ W} = 3,841 \times 10^{17} \text{ GW} = 3.84 \times 10^{12} \text{ TW}$$

Auringon säteilyteho maan etäisyydellä (S)

Maapallon etäisyydellä auringosta olevien kappaleiden saama ominaissäteilyteho (S) voidaan laskea jakamalla auringon säteilyteho P_s sellaisen pallon pinta-alalla (A_d), jonka halkaisija on sama kuin maan etäisyys auringosta ($R = 1,496 \times 10^{11} \text{ m}$)

$$(3.1.3) \quad S = P_s/A_d \\ = (3,841 \times 10^{26}) \text{ W} / (4 \times 3,1416 \times (1.496 \times 10^{11})^2 \text{ m}^2) \\ = 3,841 \times 10^{26} \text{ W} / 28,12 \times 10^{22} \text{ m}^2 \\ = 1366 \text{ W/m}^2$$

Laskettu auringon ominaissäteilyteho maan etäisyydellä ($S = 1366 \text{ W/m}^2$) on sama, mitä satelliitit ovat mitanneet vuosina 1978–1999 keskimäärin (Kuva 3.1.1). Tässä tapauksessa laskenta on tehty niin pain, että auringon lämpötila (5774 K) on laskettu, kun ensin tiedetään auringon ominaissäteilyteho (S).



Kuva 3.1.1 Auringon säteilyteho maan etäisyydellä (W/m^2), (lähde NOAA)

Kun maahan tuleva säteilyn ominaisteho (S) tunnetaan, sen avulla voidaan laskea, mikä on maahan tulevan säteilyn kokonaisteho (P_s)

$$\begin{aligned}
 (3.1.4) \quad P_s &= S \times A = S \times \pi \times r^2 \\
 &= 1366 \text{ W/m}^2 \times 3.1416 \times (6,371 \times 10^6)^2 \text{ m}^2 \\
 &= 1366 \text{ W/m}^2 \times 127,5 \times 10^{12} \text{ m}^2 \\
 &= 174,2 \times 10^{15} \text{ W} = 174,2 \times 10^3 \text{ GW} = 174.2 \text{ TW}
 \end{aligned}$$

Auringon säteilyn ominaisteho (S) ei suinkaan ole vakio, vaikka sitä kutsuttiin ennen aurinkovakioksi. Säteilyn vuorokauden keskiarvo (**S_{ka}**) on puolestaan:

$$(3.1.5) \quad S_{ka} = S / 4 = 1366/4 = 341,5 \text{ W/m}^2.$$

Kerroin neljä tulee pallon ja ympyrän pinta-alojen suhteesta. Pallon pinta-ala on $4 \times \pi \times r^2$ ja ympyrän pinta-ala on $\pi \times r^2$. Tiedetään, että ympyrän pinta-ala = pallon pinta-ala / 4.

Tulevan säteilyn maan pinnalle kohdistuva ominaisteho **S_{ka}** voidaan laskea seuraavasti:

$$(3.1.6) \quad S_{in} = S_{ka} \times (1 - \alpha), \text{ jossa}$$

S_{ka} = säteilyn ominaistehon keskiarvo vuorokaudessa (341,5 W/m²)

α = albedo = 0,3 = säteilyn avaruuteen heijastuva osuus

Albedon ollessa 0,3 noin 30 % maahan tulevasta säteilystä heijastuu takaisin pilvistä ja lumesta. Säteilyn määrä on 341,5 W/m², jolloin heijastuneen säteilyn osuus on 102,5 W/m² ja maahan tuleva ominaissäteily määrä 239,0 W/m².

Maahan tulevan säteilyn teho (P_{in}) on puolestaan:

$$\begin{aligned} (3.1.7) \quad P_{in} &= S_{in} \times A_m \\ &= 239 \text{ W/m}^2 \times 4 \times 127,5 \text{ m}^2 \\ &= 239 \text{ W/m}^2 \times 510,1 \times 10^{12} \text{ m}^2 \\ &= 121,9 \times 10^{15} \text{ W} = 121,9 \text{ PW} \end{aligned}$$

Tätä lukua 121.9 PW (petawattia=1000 TW) voidaan verrata maailman sähköntuotantoon, joka oli vuonna 2019 noin 16.900 TWh (16,9 PWh), jolloin sähkö tehtiin koko ajan keskimäärin 1,9 TW teholla. Maailman tarvitsemat sähköt voitaisiin tuottaa aurinkovoimalla, jos 1/40.000 osa (1,9/121.000) maahan tulevasta säteilystä voitaisiin muuttaa sähköksi.

Aurinkopaneelien avulla auringon säteilystä noin 15 % voidaan muuttaa sähköksi, jolloin aurinkoenergialla voitaisiin tuottaa noin 18 PW sähköä eli 160.000 PWh vuodessa. Joten aurinkoenergialla voitaisiin tuottaa maailman tarvitsema sähkömäärä noin 10.000-kertaisesti.

3.2 Planeettojen lämpötilat

Maasta lähtevä säteilyteho on Stefan-Blotzmannin mallin mukaan $P_{out} = A_p \times \sigma \times T^4$, jossa A_p = maapallon pinta-ala $4 \times \pi \times r^2$, σ = Stefan-Boltzmannin vakio ja T = maan keskilämpötila. Kun maahan tulva teho $P_{in} = A_y \times S_{in} = \pi \times r^2 \times S \times (1 - \alpha)$ merkitään yhtä suureksi kuin lähtevä teho (P_{out}), voidaan yhtälöstä ratkaista maan pintalämpötila (T):

$$P_{in} = P_{out}$$

$$\pi \times r^2 \times S \times (1 - \alpha) = 4 \times \pi \times r^2 \times \sigma \times T^4$$

$$T^4 = (\pi \times r^2 \times S \times (1 - \alpha)) / (4 \times \pi \times r^2 \times \sigma)$$

$$(3.2.1) \quad T = (S/4 \times (1 - \alpha) / \sigma)^{1/4}$$

$$= (1366/4 \text{ Wm}^{-2} \times (1.0 - 0.306) / 5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4})^{1/4}$$

$$= (237,0 \text{ Wm}^{-2} / 5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4})^{1/4}$$

$$= 254,27 \text{ °K} = 254.27 - 273,15 \text{ °C} =$$

$$= -18,9 \text{ °C}$$

Maan lämpötila ei kuitenkaan ole näin saatu -18,9 °C vaan noin +16 °C. Erotus aiheutuu maan ilmakehästä, joka estää lämmön karkaamasta esteettömästi. Ilmakehä toimii kuin kasvihuone, joka pysyy olemassa olevaa ympäristöä lämpimänä auringon säteilyn vaikutuksesta.

Vastaavalla tavalla voidaan laskea muiden planeettojen lämpötilat, kun tiedetään niiden etäisyydet auringosta. Tulokseksi saadaan seuraavat lukemat (Taulu 3.2.1). Taulusta havaitaan, että erityisesti Venuksen mitattu lämpötila poikkeaa suuresti (504 °C) lasketusta lämpötilasta. Siihen on syynä sen ilmakehä, joka muodostuu lähes pelkästään hiilidioksidista. Merkuriuksella ei ole puolestaan lainkaan ilmakehää ja sillä ei ole myöskään kasvihuoneilmiötä. Laskettu ja mitattu lämpötila poikkeavat toisistaan vähiten.

Kuitenkin vain maan lämpötila on elämän synnylle suopeaa. Merkurius ja Venus ovat liian kuumia asuttavaksi. Marsin mitattu lämpötila on keskimäärin 58 astetta, joten se vastaa saunan lämpötilaa. Siellä voisi elää pohjoisilla leveysasteilla, jossa voisi olla kylmempää.

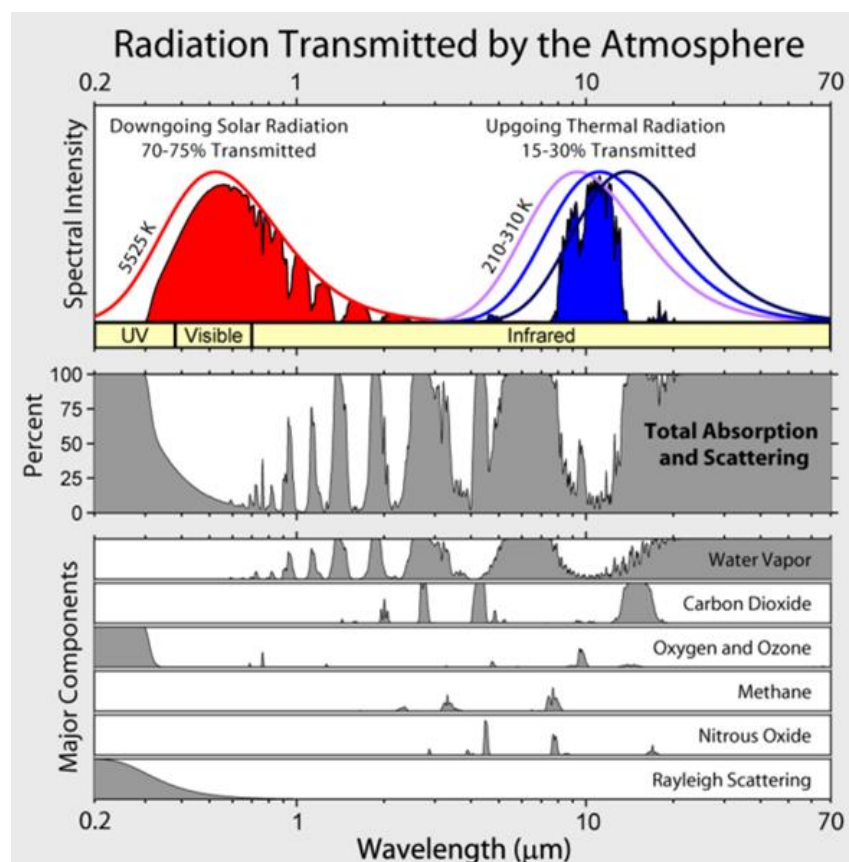
Taulu 3.2.1 Planeettojen lämpötiloja.

Planeetta		Merkurius	Venus	Maa	Mars
Säteilyteho	W/m ²	2290	662	341.5	145
Albedo		0.10	0.75	0.306	0.25
Lämpötila					
- Laskettu	oC	163	-42	-18.9	-64
- Mitattu	oC	167	462	16	58
- Erotus	oC	4	504	34.9	122

Näistä laskelmista pitää muistuttaa, että planeettojen etäisyydet auringosta vaihtelevat jonkin verran, koska radat eivät ole jatkuvasti samanlaisia. Parhaillaan maan rata auringon ympäri on muuttumassa soikeammasta yhä lähemmäksi ympyrää, jolloin etäisyys on pienenemässä.

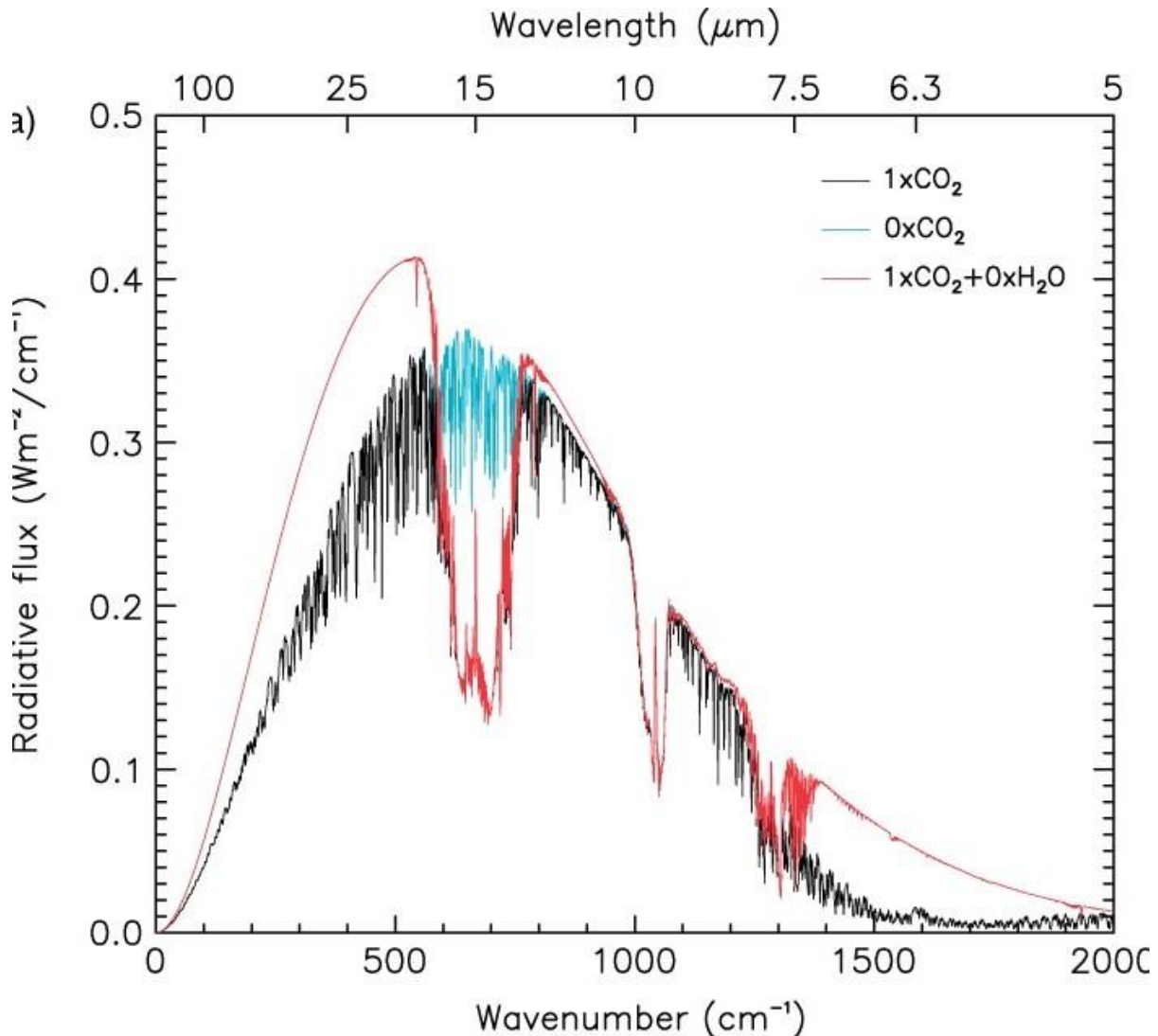
Myöskään auringon säteily ei ole vakio vaan vaihtelee jatkuvasti, koska mm. auringonpilkkujen määrä vaihtelee noin 11 vuoden jaksoissa. Laskelmat ovat suuntaa antavia ja auttavat ymmärtämään, mikä on kasvihuoneilmiö.

Maasta poistuva säteily on puolestaan pääasiassa infrapunasäteilyä (4–40 µm aallonpituus), jonka määrän vaikuttaa ilmakehässä olevat kaasut (Kuva 3.2.1). Ne absorboivat hyvin tehokkaasti infrapunasäteilyä alle 8 µm ja yli 15 µm aallonpituuksilla.



Kuva 3.2.1 Maasta poistuvan infrapunasäteilyn aallonpituusalueet.

Intrapunasäteilyn mielenkiitoisin aallonpituus on 15 μm , jonka kohdalla ilmassa oleva hiilidioksidi on estänyt säteilyn karkaamisen avaruuteen (Kuva 3.2.2). Jos CO_2 -pitoisuus olisi nolla (sininen käyrä), säteilystä karkaisi avaruuteen noin $0,35 \text{ W/m}^2/\text{cm}$. Kun CO_2 -pitoisuus on nykytasolla (musta käyrä), infrapunasäteilystä pääsee avaruuteen vain noin $0,15 \text{ W/m}^2/\text{cm}$. Erotus on $0,2 \text{ W/m}^2/\text{cm}$, joka pystyy selittämään, miksi CO_2 -pitoisuuden kasvu lämmittää ilmastoa.



Kuva 3.2.2 Infrapunasäteilyn tehon muutos, kun CO_2 -pitoisuus muuttuu nollasta nykyiseen noin 400 ppm (Lähde: *The greenhouse gas effect and carbon dioxide*, Weney Zhong and Joanne D. Haigh, Royal Meteorological Society).

3.3 Auringon säteilyn vaikutus ilmakehän lämpötilaan

Havaittujen auringonpilkkujen lukumäärä tunnetaan melko hyvin vuodesta 1700 lähtien. Tätä tietoa voidaan käyttää arvioimaan ilman lämpötilaa siitä asti.

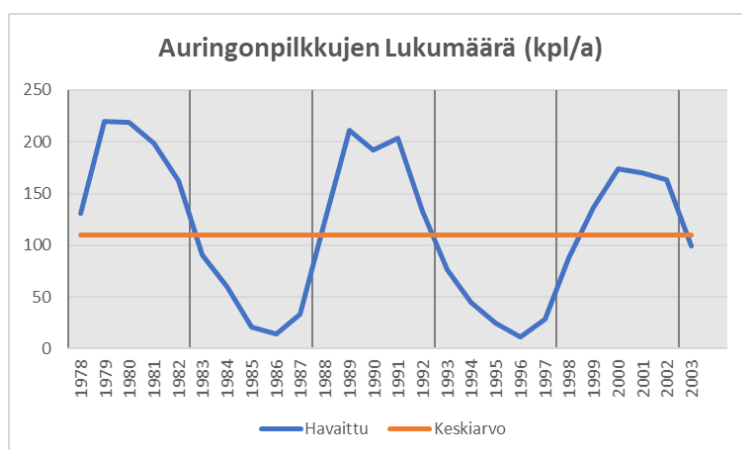
Vuosina 1978–2003 tunnetaan sekä auringonpilkkujen määrä (Kuva 3.3.1) että säteilyn määrä (Kuva 3.3.2). Havaitaan, että havaittu säteilyn määrä ja auringonpilkkujen määrä seuraavat noin 11 vuoden syklissä toisiaan samanaikaisesti.

Kun säteilyteho ja auringonpilkkujen määrä laitetaan samaan XY-kaavioon, havaitaan, että näiden välillä on selvä yhteys (Kuva 3.3.3).

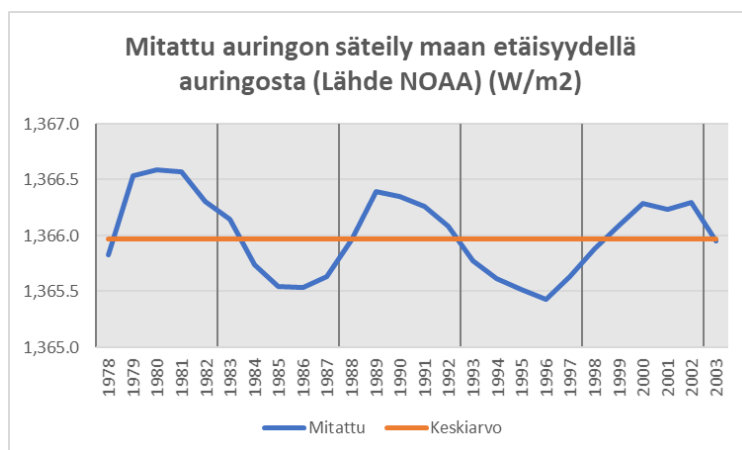
Säteilyn ominaisteho (S) noudattaa kaavaa:

$$(3.3.1) \quad S = 0,0049 \times S_p + 1365.436 \text{ W/m}^2$$

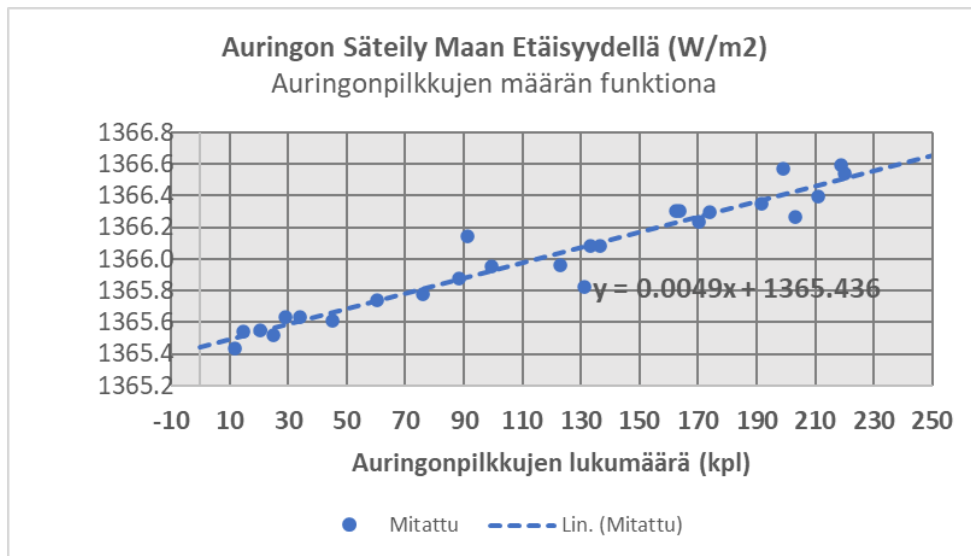
Missä A_p = auringonpilkkujen lukumäärä.



Kuva 3.3.1 Auringonpilkkujen määrä vuosina 1978–2003.



Kuva 3.3.2 Satelliiteilla mitattu säteilyn määrä maan etäisyydellä auringosta (W/m²).

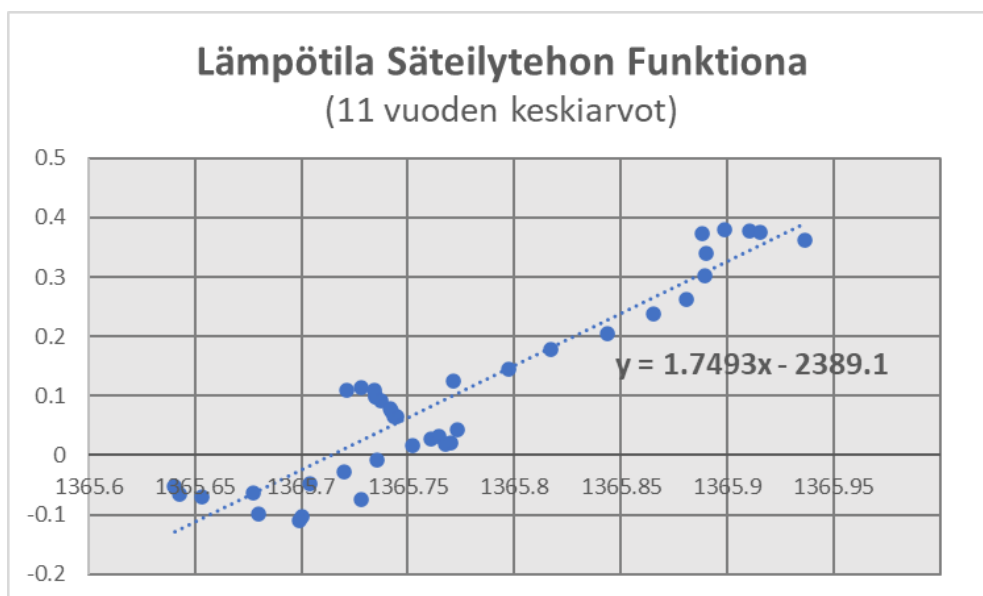


Kuva 3.3.3 Auringon säteilyteho (W/m²) auringonpilkkujen määrän funktiona.

Säteilyteho vaikutus lämpötilaan voidaan puolestaan havaita, kun samaan XY-kaavioon sijoitetaan todettu lämpötila ja säteilyteho (Kuva 3.3.4). Lämpötilalle saadaan kaava:

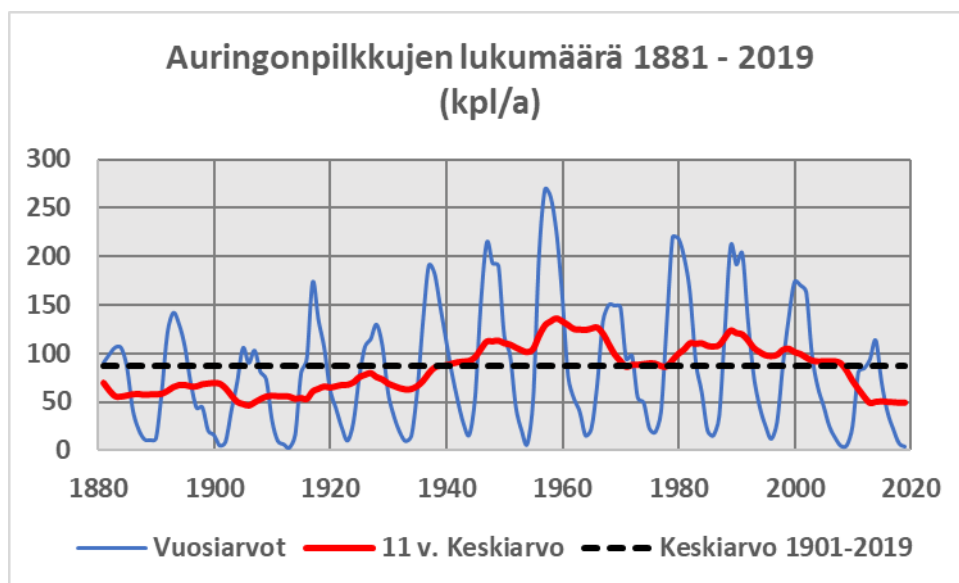
(3.3.2) $dT = 1,7493 \times S - 2389,1$

Missä **$S =$ säteilyteho (W/m²)**

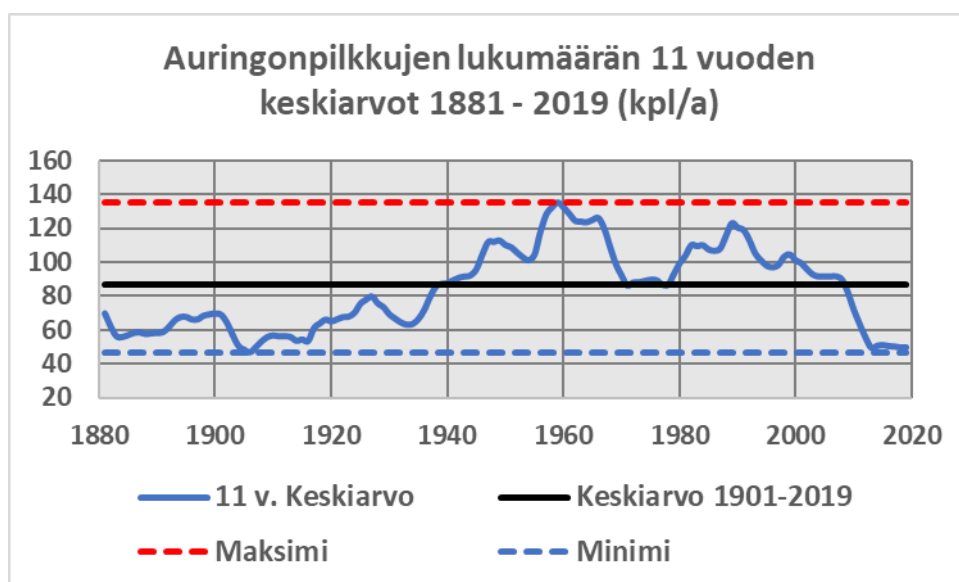


Kuva 3.3.4 Auringon säteilyn vaikutus lämpötilaan. (1901–1950).

Lämpötilan nousu voidaan johtaa myös suoraan auringonpilkkujen määrän kehityksestä (Kuva 3.3.5). Siitä huomataan auringonpilkkujen määrän nousevan vuosina 1901–1960 jatkuvasti ja laskevan vuodesta 1960 alkaen seuraavat 60 vuotta. Vuosien 1901–2019 keskiarvo 11-vuoden keskiarvolle on 87 pilkkua vuodessa. Minimiarvo on ollut 47, joka saavutettiin vuonna 1906. Maksimiarvo 136 saavutettiin vuonna 1959 (Kuva 3.3.6).

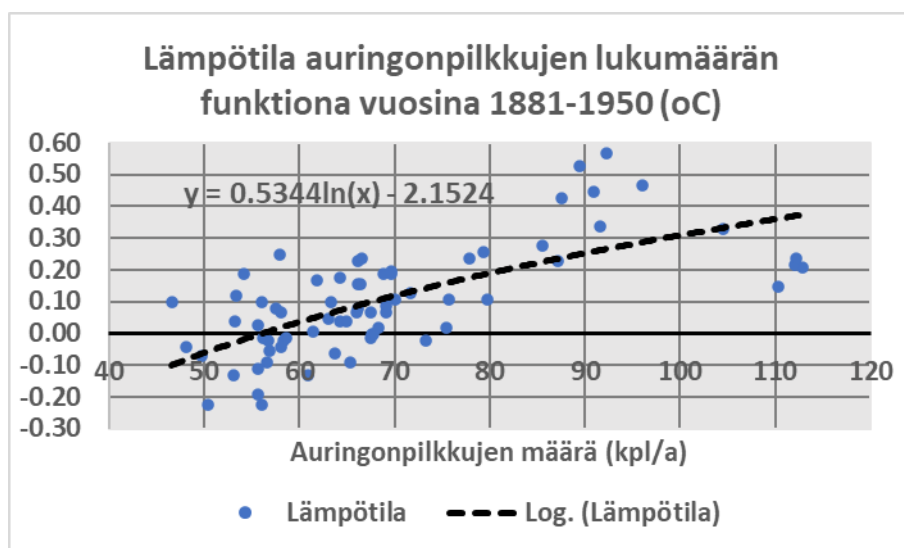


Kuva 3.3.5 Auringonpilkkujen määrä vuosina 1881–2019.



Kuva 3.3.6 Auringonpilkkujen lukumäärän 11 vuoden keskiarvot (kpl/a).

Kun auringonpilkkujen lukumäärä (11-v. keskiarvo) ja havaittu lämpötilan nousu (vuosiarvot vuosiin 1901–1930 verrattuna) vuosina 1901–1950 esitetään samassa XY-kaaviossa, saadaan mallin auringonpilkkujen vaikutukselle lämpötilaan (Kuva 3.3.7).



Kuva 3.3.7 Lämpötila auringonpilkkujen lukumäärän funktiona vuosina 1891–1960.

Kuvan mukaan saadaan lämpötilan kaavaksi auringonpilkkujen lukumäärän funktiona:

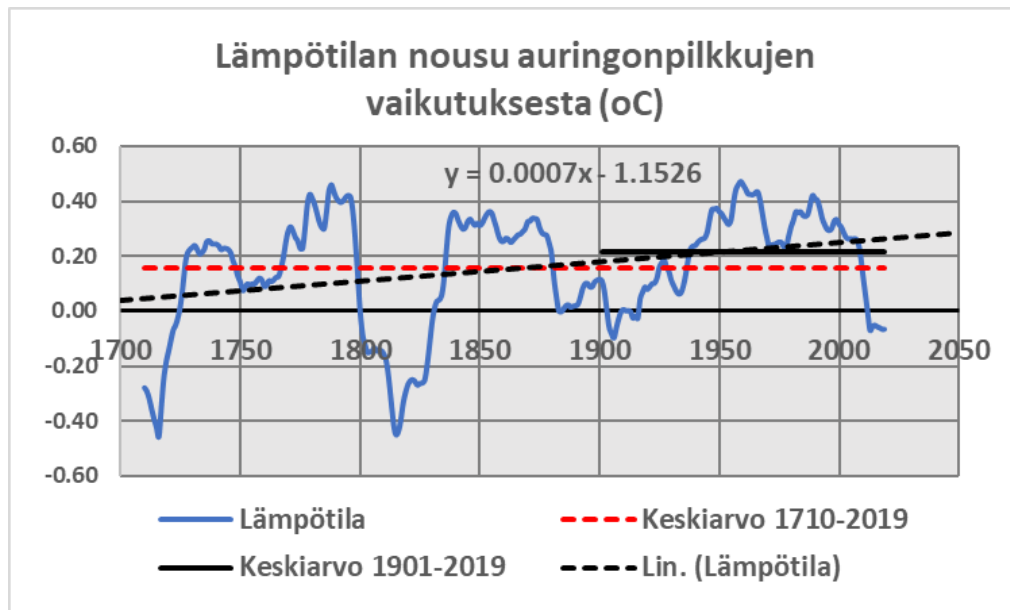
(3.3.3) $dT = 0,5344 \times \ln (Sp) - 2,152$

Missä Sp = auringonpilkkujen määrän 11 vuoden keskiarvo

Tämän kaavan avulla voidaan arvioida auringonpilkkujen lukumäärän vaikutusta lämpötilaan vuodesta 1700 alkaen (Kuva 3.3.8). Kuvasta havaitaan, että auringon säteily on vaikuttanut lämpötilatrendiin verrattuna vuosina 1950–2000 noin 0,2 astetta nostavasti ja 1880–1930 noin 0,2 astetta laskevasti.

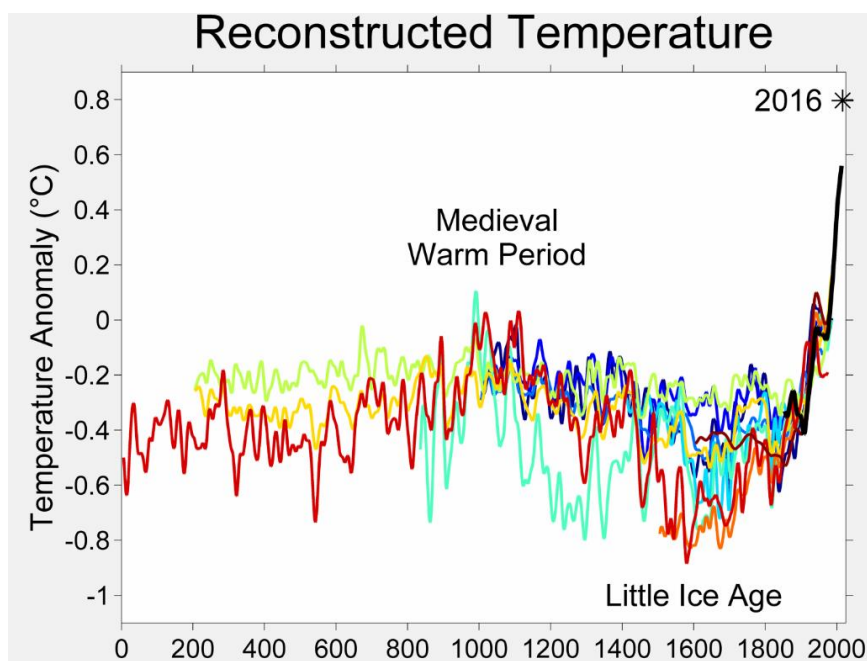
Kylmiä kausia on ollut sadan vuoden välein 1700-, 1800- ja 1900-lukujen alussa. Jos lämpötilan nousua halutaan verrata vuosien 1901–1930 keskiarvoon, pitää huomata, että silloin vuosisadan alussa lämpötila oli keskimäärin noin 0,16 astetta alempi kuin vuosina 1901–2019 keskimäärin.

Pitkäaikainen auringon vaikutuksen trendi on ollut 0,0007 astetta vuodessa eli noin 0,21 asteen nousu noin 300 vuodessa. Sen lisäksi on ollut vaihteita, jolloin ilma on ollut 0.7 astetta kylmempää kuin 1900-luvulla.

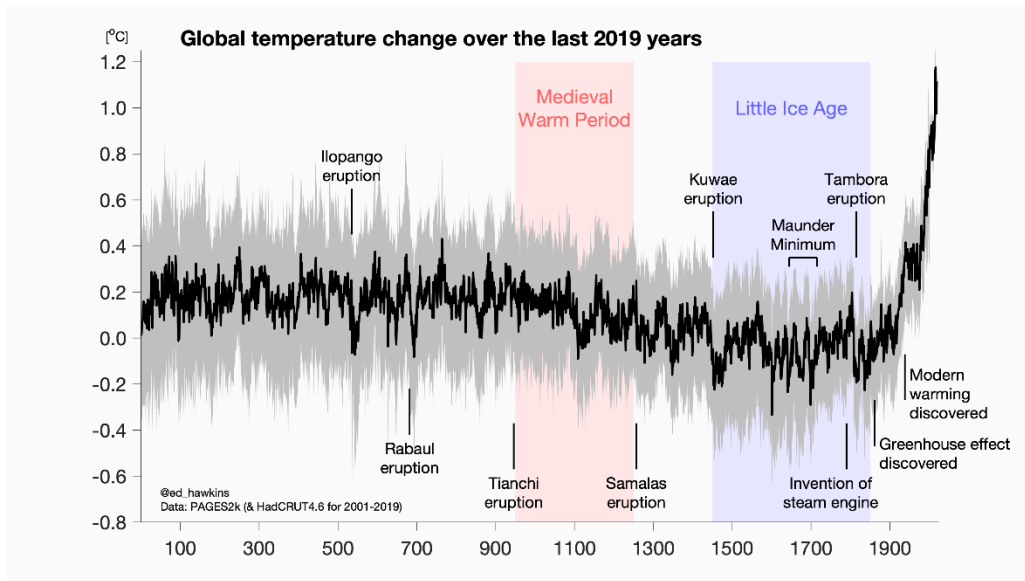


Kuva 3.3.8 Auringon säteilyn vaikutus lämpötilaan 1710–2019.

Saattaa olla, että auringonpilkkujen määrä vaihtelee myös noin 1000 vuoden jaksolla, koska lämpötila on kohonnut nyt noin 400–500 vuotta (Kuva 3.3.9 ja 3.3.10). Vastaavasti tiedetään historiallista dokumenteista, että auringon lämpötila laski edelliset 400–500 vuotta, kun esimerkiksi Grönlannin asukkaat poistuivat alueelta vuoden 1000 jälkeen.

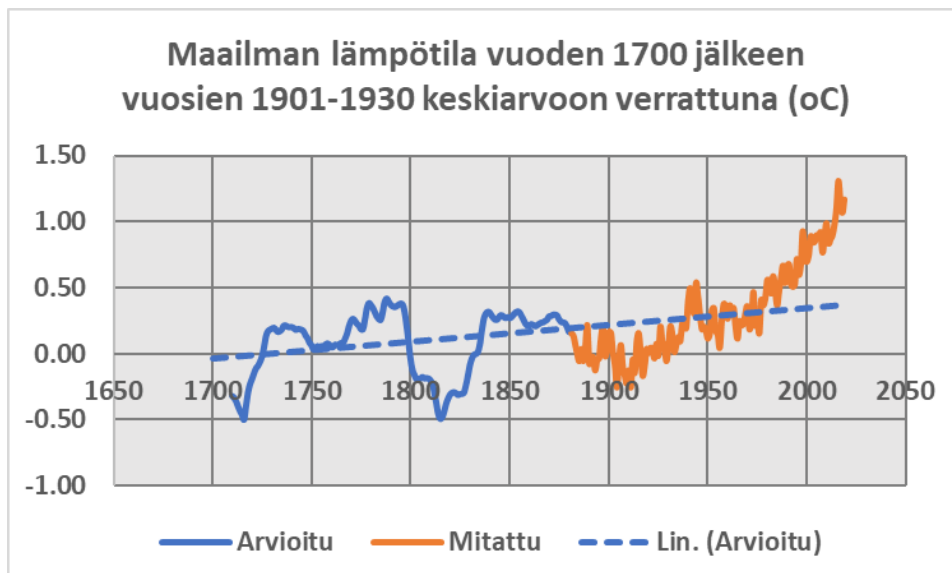


Kuva 3.3.9 Pitkäaikainen lämpötilan vaihtelu (Lähde: CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=466264>).

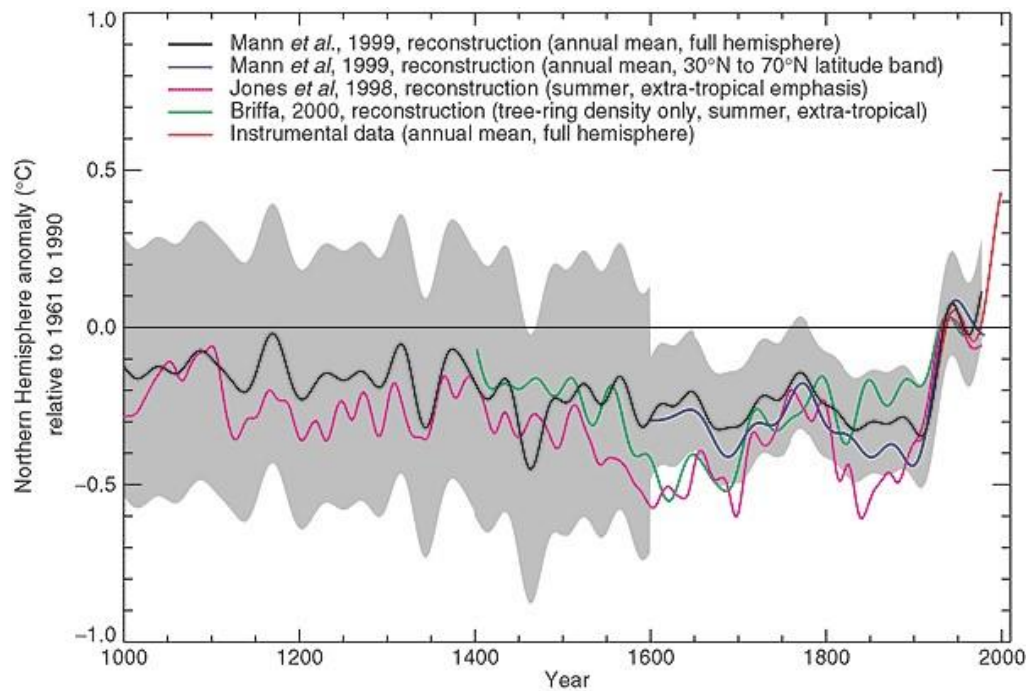


Kuva 3.3.10 Lämpötila viimeisten 2019 vuoden aikana (Lähde: <https://www.climate-lab-book.ac.uk/2020/2019-years/>)

Kun auringonpilkkujen avulla arvioitu lämpötila ja mitattu (NOAA) lämpötila yhdistetään samaan kaavioon, saadaan arvio vuosien 1700–2019 lämpötilalle (Kuva 3.3.11). Se muistuttaa kylläkin lätkämailaa, mutta lämpötila on noussut vuodesta 1700 vuoteen 1880 noin 0,2 astetta auringonpilkkujen ansiosta. Mannin tekemä ja väärennetyksi todetussa lätkämailakuviossa puolestaan lämpötila laski vielä vuosina 1700–1850 (Kuva 3.3.12, harmaat viivat).

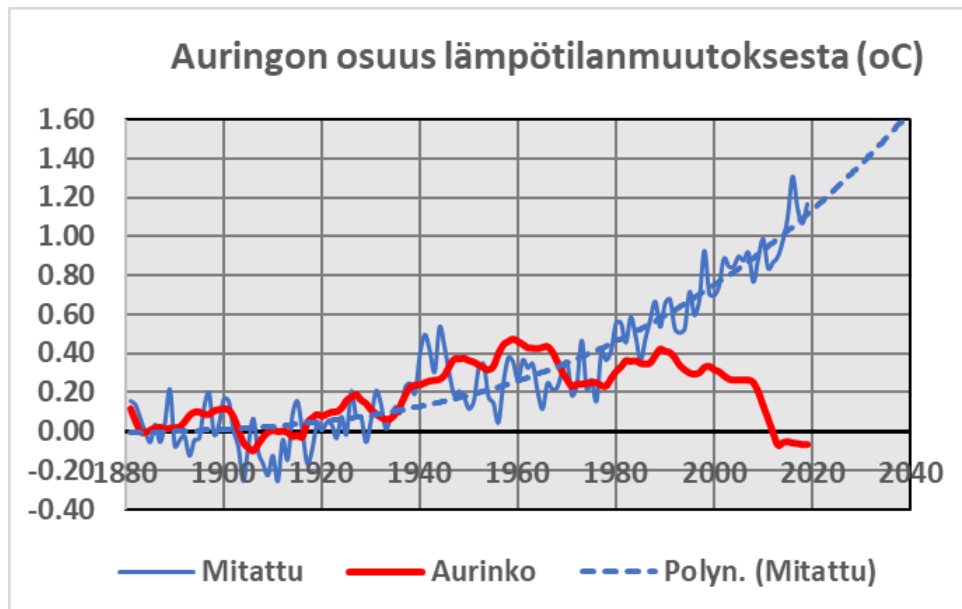


Kuva 3.3.11 Auringonpilkkujen avulla arvioitu lämpötila vuodesta 1700 alkaen (°C)



Kuva 3.3.12 Mann *et. al.* tekemä lätkämaila ilmaston lämpenemisestä (Lähde: IPCC).

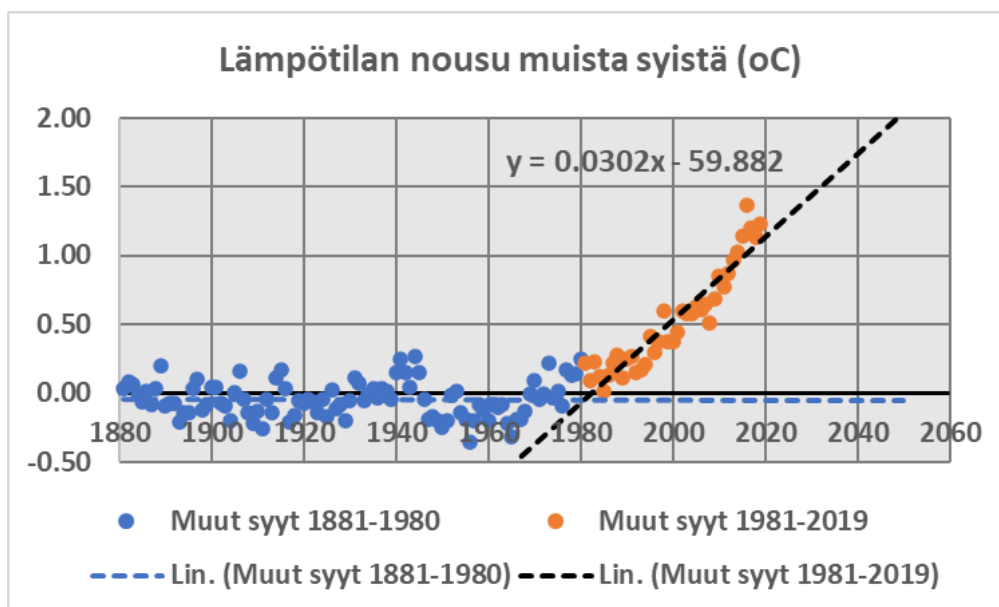
Kun auringon säteilyn vaikutus lämpötilaan esitetään samassa kuvassa mitatun lämpötilan kanssa (Kuva 3.3.13), voidaan havaita, että auringon säteilyn vaikutus lämpötilaan ja mitattu lämpötila ovat hyvin lähellä toisiaan aina vuoteen 1970 asti. Se tarkoittaa, että auringon säteily selitti lämpötilan nousun pääasiassa siihen asti.



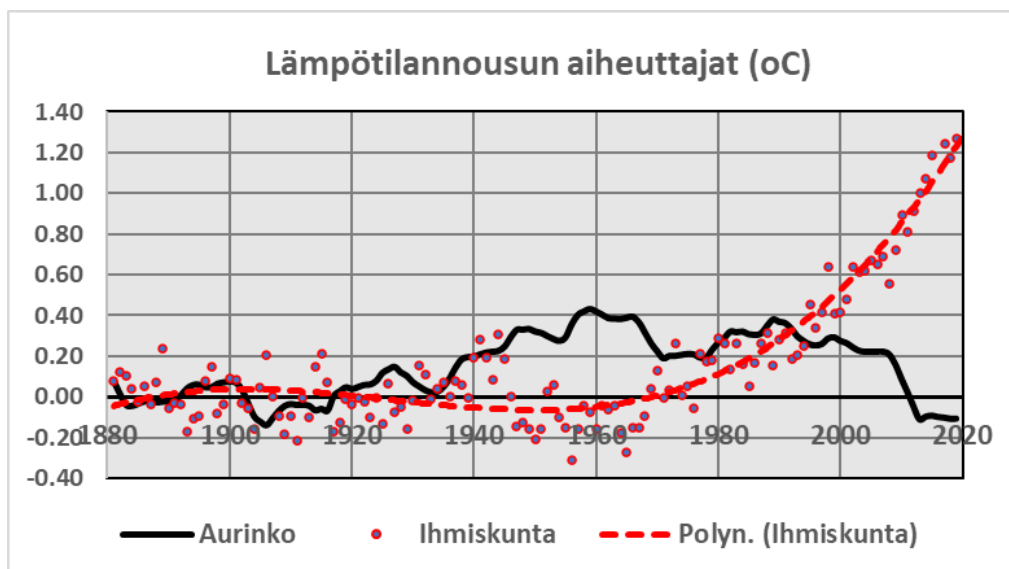
Kuva 3.3.13 Auringon säteilyn vaikutus lämpötilaan ja mitattu lämpötila vuoden 1880 jälkeen.

Vuoden 1980 jälkeen lämpötila on noussut myös muista syistä kuin auringon vaikutuksesta (Kuva 3.3.14). Muiden syiden vaikutus lämpenemiseen on ollut 0,03 astetta vuodessa eli 3 astetta sadassa vuodessa.

Auringon osuus lämpenemisestä oli suurinta aina vuoteen 1990 asti, jonka jälkeen ihmiskunnan osuus nousi ratkaisevaksi (Kuva 3.3.15).

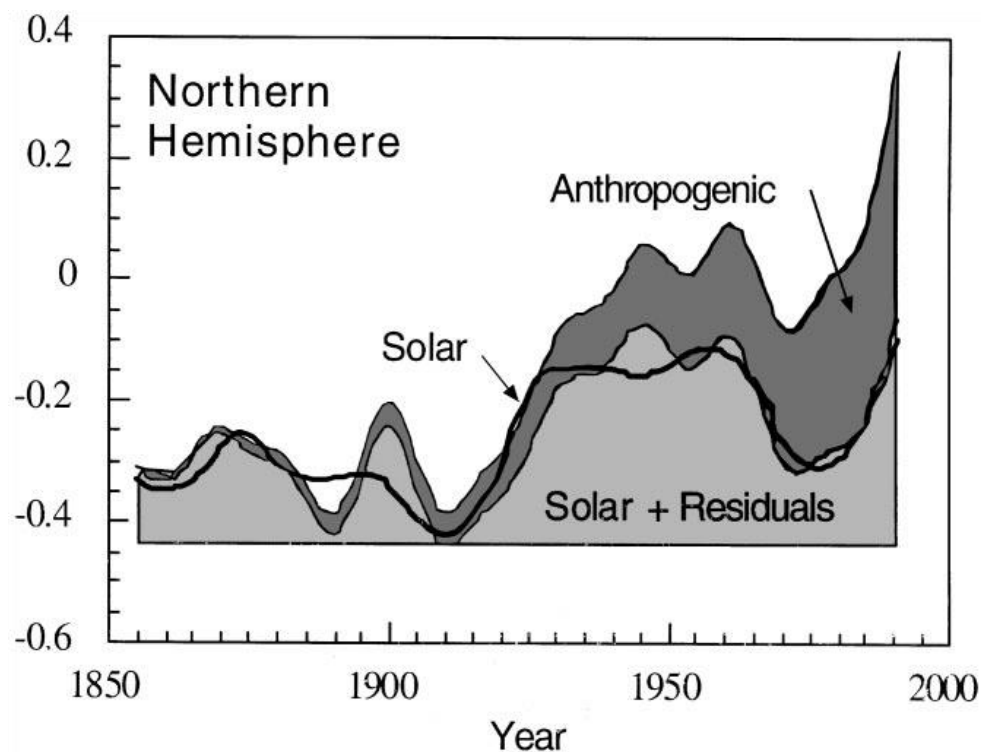


Kuva 3.3.14 Muiden seikkojen kuin auringon vaikutus lämpötilaan vuoden 1880 jälkeen.



Kuva 3.3.15 Auringon ja ihmiskunnan osuus lämpenemisestä (°C).

Auringon osuus lämpötilan nousuun ei ole uusi asia. Samanlaisen laskelman esittivät J. Beer et. Al vuonna 2000 ilmestyneessä artikkelissaan (*The role of the sun in climate forcing, Quaternary Science Reviews 19. 2000 400–403*). Siitä on poimittu Kuva 3.3.16, josta voidaan havaita sama asia, jonka mukaan aurinko aiheutti aina vuoteen 1980 asti merkittävimmän osan ilmaston lämpenemisestä. Sen jälkeen suurin aiheuttaja on ollut ihmiskunta (anthropogenic),

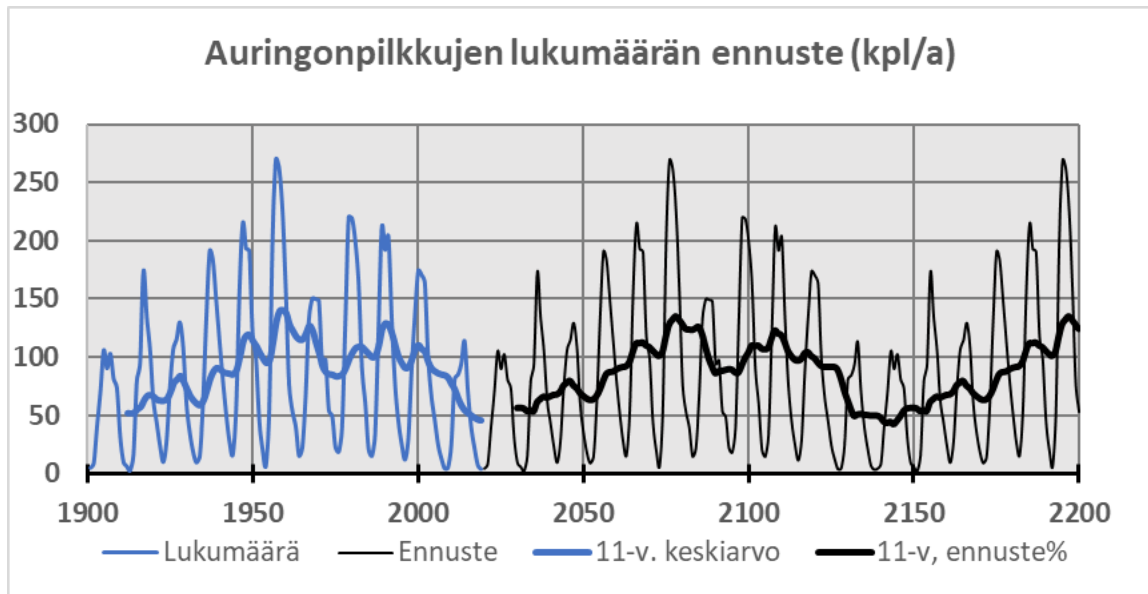


Kuva 3.3.16 Ilmaston lämpenemisen syyt pohjoisella pallonpuoliskolla (J. Beer et. Al. 2000).

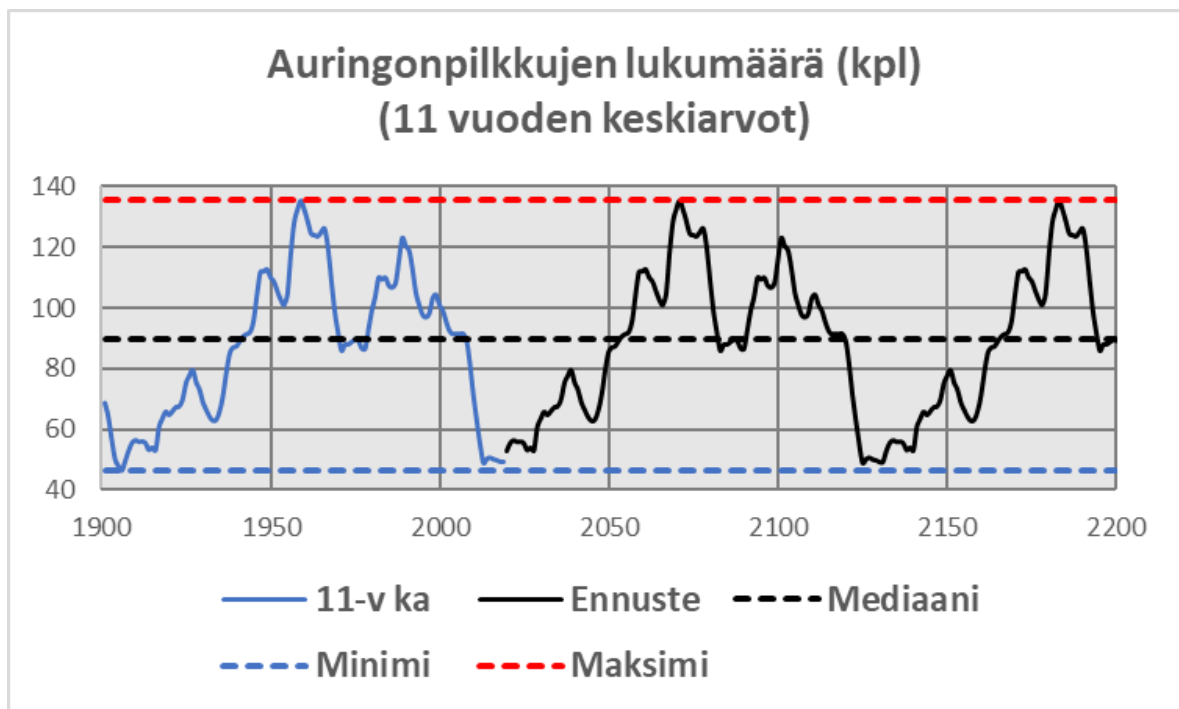
3.4 Auringon vaikutuksen ennustaminen

On melko vaikeaa ennustaa auringon säteilyn ja auringonpilkkujen määrän vaihtelua tulevaisuudessa. Auringonpilkkujen keskiarvo vuosina 1901–2019 on 87, kun arvot lasketaan 11 vuoden keskiarvoista.

Jos oletetaan, että pilkkujen määrä noudattaa viimeisten 119 vuosien jaksoa, saadaan pilkkujen ennuste (Kuva 3.4.1). Sen mukaan auringonpilkkujen määrä kasvaa 50 vuotta aina vuoteen 2070 asti ja vähenee siitä jälleen 60 vuotta vuoteen 2140 asti. Vastaavasti 11 vuoden pilkkujen keskiarvo nousee nykyisestä arvosta 50 arvoon 136 vuoteen 2071 mennessä ja putoaa minimiarvoon 47 vuoteen 2125 mennessä (Kuva 3.4.2).



Kuva 3.4.1 Auringonpilkkujen lukumäärän ennuste.



Kuva 3.4.2 Auringonpilkkujen lukumäärän 11 vuoden keskiarvojen ennuste (kpl/a).

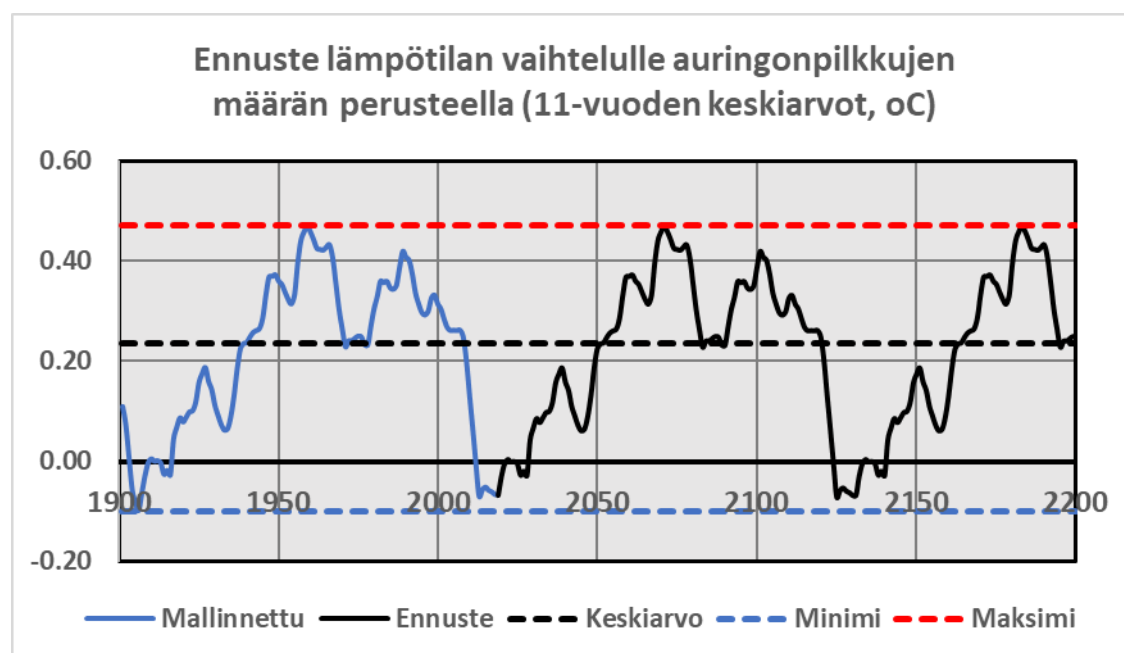
Auringonpilkkujen lukumäärän keskiarvo on 1900–2019 on ollut 87, jota vastaava lämpötila saadaan seuraavasta kaavasta (Kaava 3.3.3):

$$(3.4.1) \quad dT = 0,5344 \times \ln(Sp) - 2,152$$

$$= 0,5344 \times \ln 87 - 2,152 = 0,235 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Auringonpilkkujen 11 vuoden keskiarvon minimi on 47, jota vastaava lämpötila **dT_{min} on -0,094 °C**. Maksimimäärää (136) vastaavat lämpötila **dT_{max} on +0,473 °C**. Vuosina 1901 – 1930 auringonpilkkuja oli keskimäärin 62 kappaletta, jota vastaava lämpötila oli kaavan (3.4.1) mukaan + **0,053 °C**.

Tulevaisuuden lämpötilan kehityssennuste voidaan tehdä auringonpilkkujen 11 vuoden lukumäärän keskiarvojen ennusteen mukaisesti, jolloin saadaan Kuvan 3.4.3 mukainen ennuste. Laskelmien mukaan lämpötila on vuosina 1901–2019 auringonpilkkujen vaikutuksesta ollut keskimäärin 0,235 astetta korkeampi kuin vuosina 1901–1930. Maksimiarvio on ollut 0,44 astetta korkeampi kuin vuosina 1901–1930. Minimiarvio lämpötila on ollut puolestaan 0,12 astetta alempi kuin vuosien 1901–1930 keskimääräinen lämpötila.



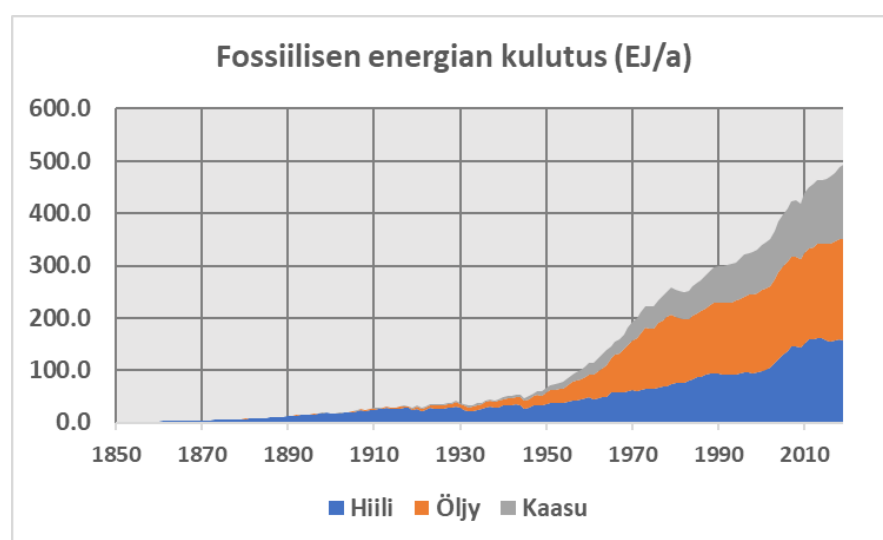
Kuva 3.4.3 Lämpötilan vaihtelu auringonpilkkujen määrän vaikutuksesta.

Kun tulevaisuuden lämpötiloja ennustetaan vuosiin 1901–1930 verrattuna, lähtötaso auringonpilkkujen vuoksi 0,235 astetta alempi kuin keskimäärin vuosina 1901–2019. Tämän vuoksi laskettuihin ennusteisiin tulee tehdä 0,235 asteen lisäys. Vastaavasti lämpötilan maksimiarvot saadaan, kun laskettuihin ennusteisiin tehdään 0,47 asteen lisäys.

4. HIILIDIOKSIDIN VAIKUTUS ILMASTON LÄMPENEMISEEN

4.1 Energiasektorin CO₂-päästöt

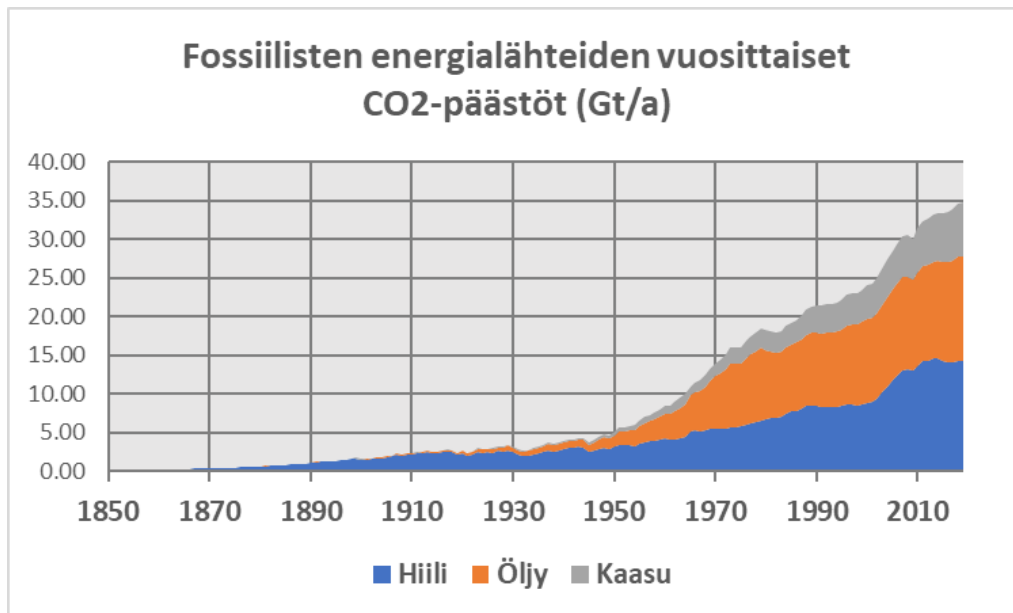
Hiilidioksidia (CO₂) muodostuu, kun fossiilisia polttoaineita poltetaan ja samalla hiiliatomi (C) yhtyvät happiatomien (O₂) kanssa. Hiilen poltto alkoi jo 1850-luvulla, kun höyrykoneet tulivat tehtaisiin ja sahaille. Öljyn käyttö alkoi autoteollisuuden myötä 1900-luvun alussa. Maakaasun laajamittainen käyttö alkoi 1950-luvulla. Maailman primäärienergian käyttö vuonna 2019 noin 584 EJ, josta 193 EJ oli öljyä (33 %), 158 EJ (27 %) kivihiiltä ja 141 EJ (24 %) maakaasua. Yhdessä nämä kolme energialähdettä ovat kattaneet noin 492 EJ (84 %) käyttämästämme energiasta (Kuva 4.1.1) (EJ = 1000 PJ, Suomen energiankulutus = 1,5 EJ/a).



Kuva 4.1.1 Fossiilisten energialähteiden kulutus (EJ/a).

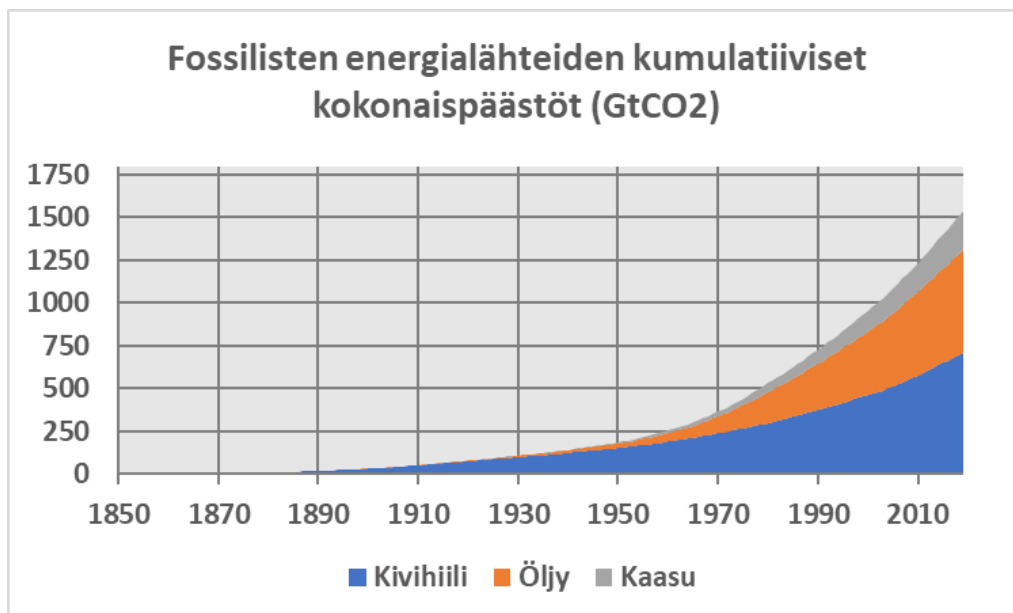
Poltettu hiilimäärä aiheuttaa CO₂-päästöjä BP:n tilastojen mukaan noin 90 g/MJ (kivihiili 94,6 ja ruskohiili 101), öljytonni 70 g/MJ (benssiini 69 ja dieselöljy 74) ja kaasu 50 g/MJ (56,1), jossa Pariisin sopimuksen luvut ovat suluisia (*saattavat olla laskettuna polttoaineiden matalammista lämpöarvoista, LHV*). Kun näillä luvuilla kerrotaan vuosittain kulutettu energiamäärä, saadaan vuotuiset CO₂-päästöt (Kuva 4.1.2). Vuonna 2019 päästöt olivat noin 34 GtCO₂/a.

Päästöjen määrä alkoi kasvaa nopeasti sodan jälkeen 1950-luvulla ja nousi noin 5 gigatonnista 18 gigatonniin vuoteen 1980 mennessä. Nousunopeus oli 13 gigatonnia 30 vuodessa eli keskimäärin 0,4 gigatonnia vuodessa. Vuodesta 1980 päästöt kasvoivat vuoteen 2000 mennessä noin 24 miljoonaan tonniin eli 6 Mt 20 vuodessa eli kasvuksi 0,3 Gt vuodessa. Kasvun hidastuminen puoleen entisestä aiheutui öljyn hinnan rajusta noususta 1970-luvulla ja siitä aiheutuneesta maailmanlaajuisesta lamasta.



Kuva 4.1.2 Fossiilisten polttoaineiden aiheuttamat CO₂-päästöt.

2000-luvun aikana päästöt ovat kasvaneet 34 gigatonniin ja nousunopeus on ollut 11 gigatonnia 19 vuodessa eli 0,6 gigatonnia vuodessa. Tästä 10 gigatonnin noususta noin viisi gigatonnia aiheutui pääasiassa hiilen käytön massiivisesta lisääntymisestä Kiinan sähköntuotannossa, 2,7 öljyn ja 2,7 maakaasun käytön kasvusta. Kumulatiiviset CO₂-päästöt ovat kasvaneet vuoteen 2019 mennessä jo määrään 1540 Gt (Kuva 4.1.3). Niistä kivihiilen osuus on ollut 710 Gt eli 46 % ja öljyn osuus 600 Gt eli 39 %.



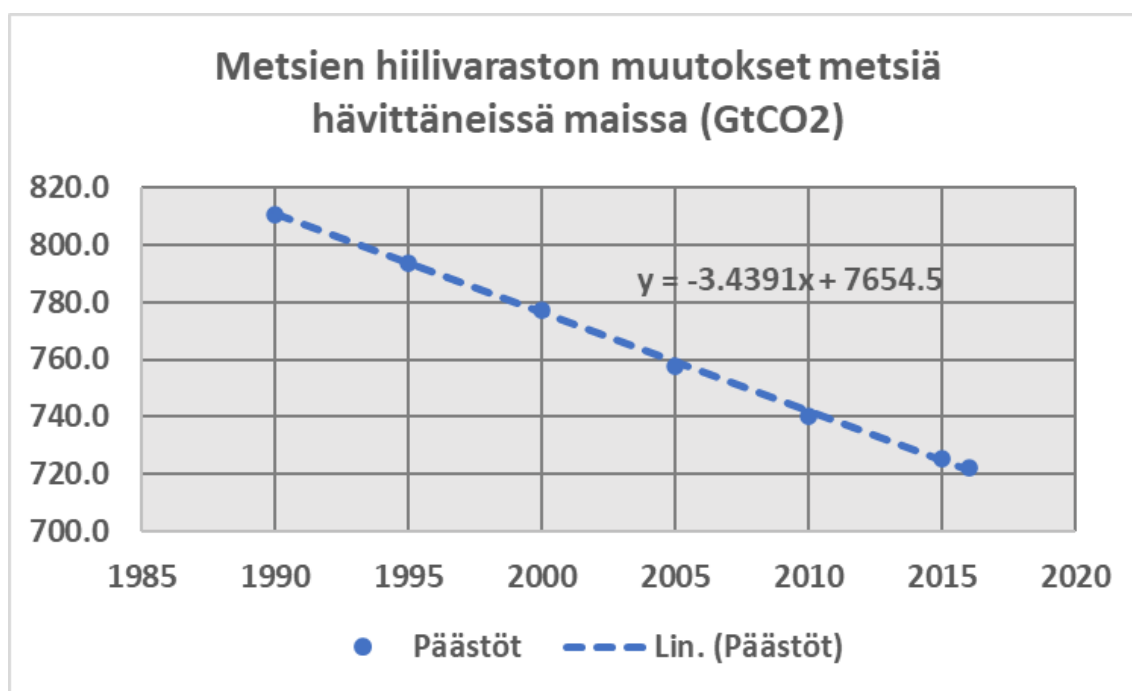
Kuva 4.1.3 Fossiilisten polttoaineiden aiheuttamat kumulatiiviset kokonaispäästöt (GtCO₂).

4.2 Metsien hiilivarastot

Muiden kuin fossiilisten polttoaineiden päästöjen arviointi on huomattavasti vaikeampaa. Niistä tärkeimmät ovat metsät ja sementtiteollisuus. Nämä alat eivät ole samalla tavalla globaalisten toimijoiden käsissä kuin energia-ala.

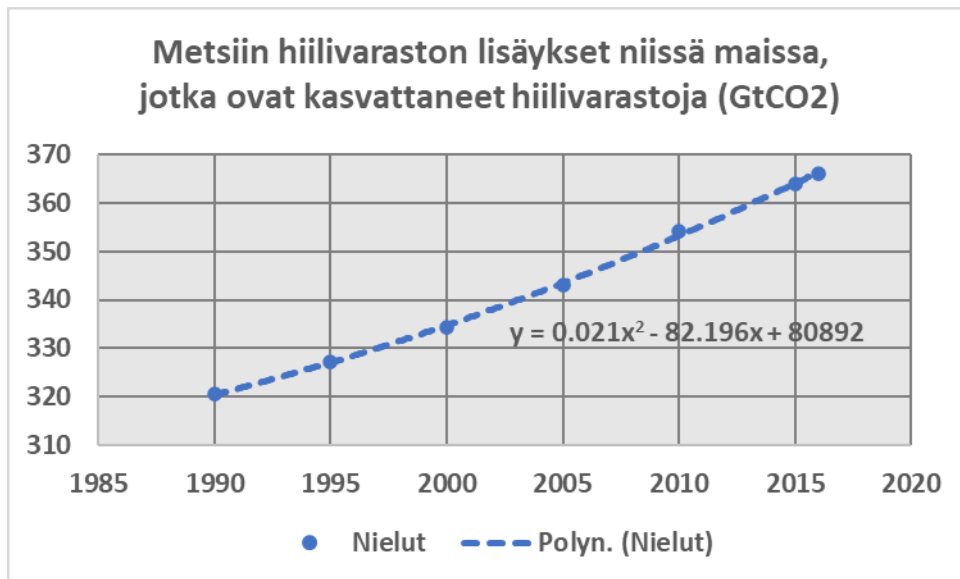
Metsien aiheuttamat CO₂-päästöt voidaan laskea tutkimalla elävien puiden hiilimassan muutosta vuosittain. Sitä on selvittänyt kansainvälinen maatalousjärjestö FAO viiden vuoden välein vuodesta 1990 alkaen.

Suurimmat metsien hiilinielun vähenemiset vuosina 1990–2015 ovat tapahtuneet 118 maassa (Liite1), jotka ovat aiheuttaneet keskimäärin noin 3,44 gigatonnin CO₂-päästön vuosittain (Kuva 4.2.1). Eniten metsien hiilinielujaan ovat hävittäneet Indonesia (728 MtCO₂/a), Brasilia (715 MtCO₂/a), Nigeria (174 MtCO₂/a), Tansania (170 MtCO₂/a) ja Kongo (135 MtCO₂/a).

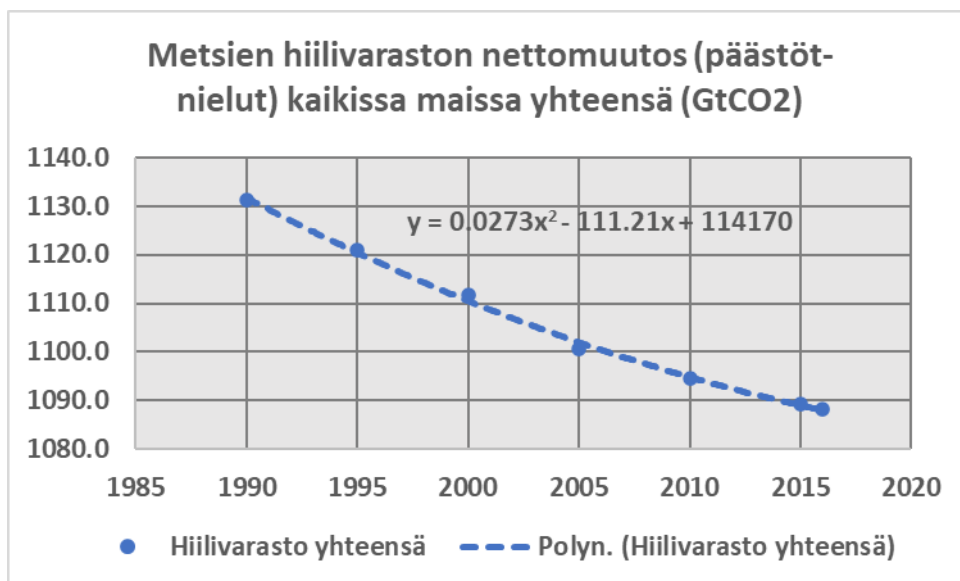


Kuva 4.2.1 Metsien CO₂-päästöjä aiheuttaneiden maiden hiilivarastojen muutos (GtCO₂).

Vastaavasti 115 maata (Liite 2) on lisännyt metsiensä CO₂-määrää. Niiden CO₂-määrä on kasvanut keskimäärin 1,79 gigatonnia vuodessa (Kuva 4.2.2). Eniten hiilivarastojaan ovat kasvattaneet USA (414 MtCO₂/a), Kiina 339 MtCO₂/a), Venäjä (75 MtCO₂/a), Japani (69 MtCO₂/a) ja Ranska (60 MtCO₂/a). Suomi löytyy sijalta 21 Ruotsin ja Norjan jälkeen. Yhteensä ovat metsien hiilivaraston nettomäärä vähentynyt vuodesta 2005 vuoteen 2015 noin 10 gigatonnia eli 1 GtCO₂/a (Kuva 4.2.3).

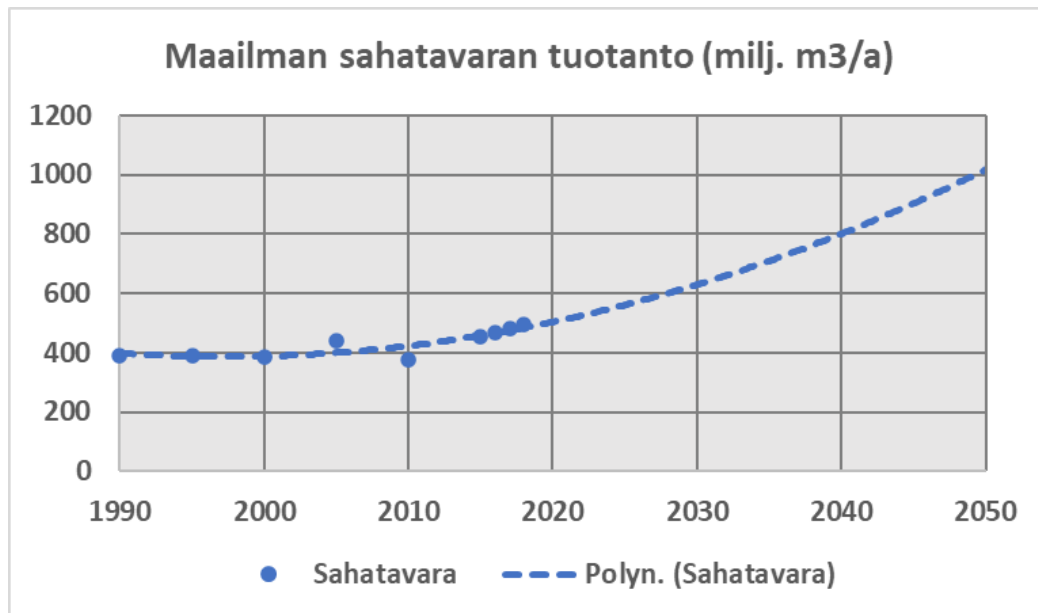


Kuva 4.2.2 Metsien hiilivaraston lisäykset niissä maissa, jotka ovat kasvattaneet hiilivarastojaan (GtCO₂).



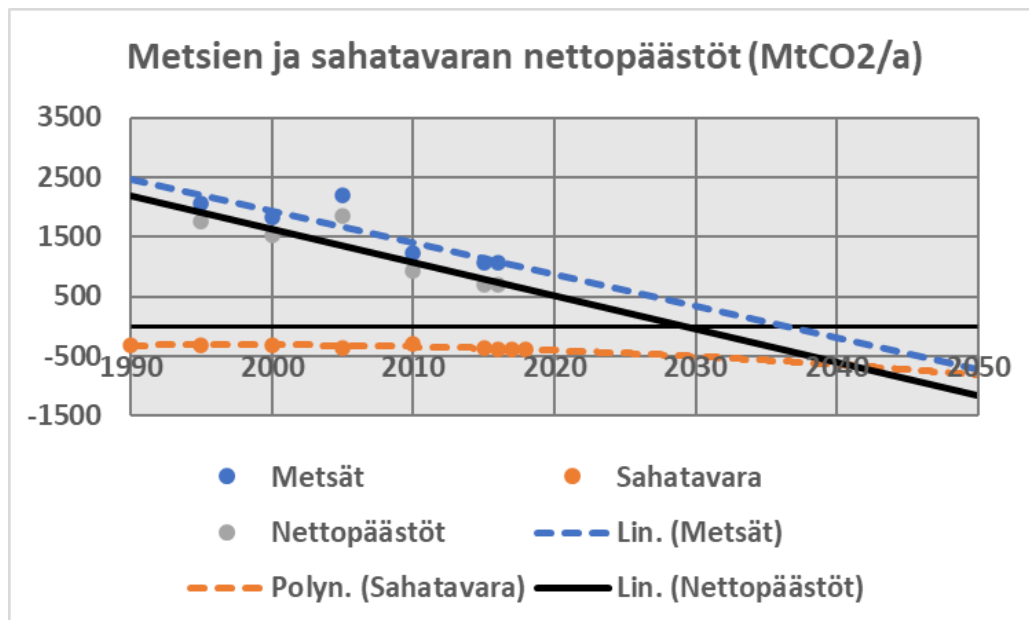
Kuva 4.2.3 Kaikkien elävien metsien hiilivaraston muutos (GtCO₂).

Metsien käyttö sahataran tuotantoon on lisääntynyt vuoden 1950 jälkeen nopeasti. Vuonna 1990 sahataraa tuotettiin 400 miljoonaa kuutiota, mutta vuonna 2018 jo 500 miljoonaa kuutiota (Kuva 4.2.4). Polynomisen trendin mukaan tuotanto nousisi noin 1000 miljoonaan kuution vuonna 2050.



Kuva 4.2.4 Sahatavaran tuotanto maailmassa (milj. m³ vuodessa, FAO).

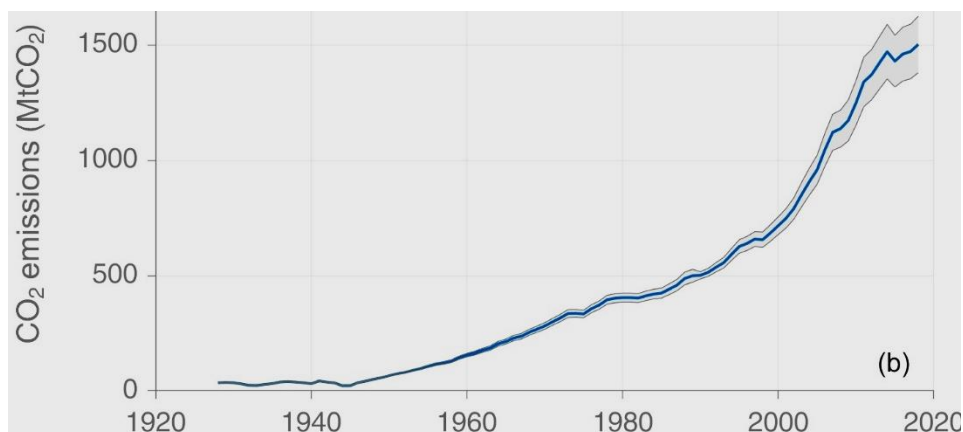
Kun sahatavaran hiilinielut vähennetään metsien nettopäästöistä, saadaan niiden yhteisvaikutus (Kuvan 4.3.5). Kuvan mukaan metsien ja sahateollisuuden aiheuttamat nettopäästöt (musta yhtenäinen viiva) ovat vähentyvät vuodesta 1990 lähtien noin kahdesta gigatonnista lähelle nollaa vuonna 2030.



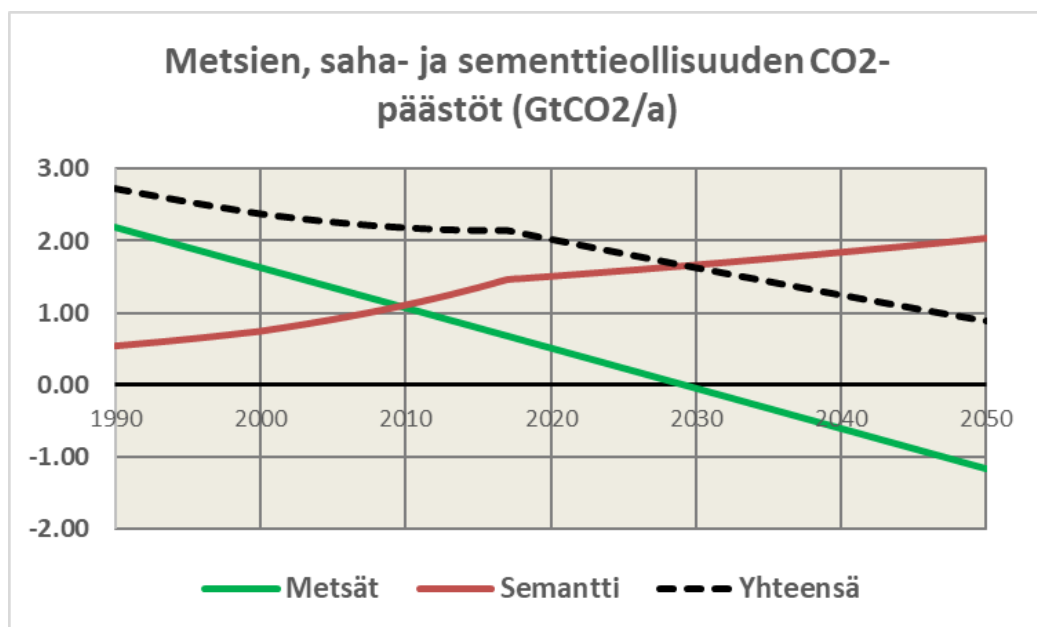
Kuva 4.3.5 Metsien ja sahateollisuuden nettopäästöt (MtCO₂/a).

4.3 Sementtiteollisuuden päästöt

Sementin valmistuksessa syntyy myös päästöjä. Niiden määrä on kasvanut koko ajan, koska talot rakennetaan enemmän betonirunkoisina. Vuonna 2018 päästöt olivat noin 1,5 gigatonnia (Kuva 4.3.1). Kasvua vuoden 2000 jälkeen oli noin 750 miljoonaa tonnia CO₂ (100 %). Kun sementtiteollisuuden, metsien ja sahateollisuuden hiilinielut lasketaan yhteen, niiden päästöt ovat tänään noin 2 GtCO₂/a (Kuva 4.3.2). Päästöt laskevat tasolle 1 GtCO₂/a vuoteen 2050 mennessä.



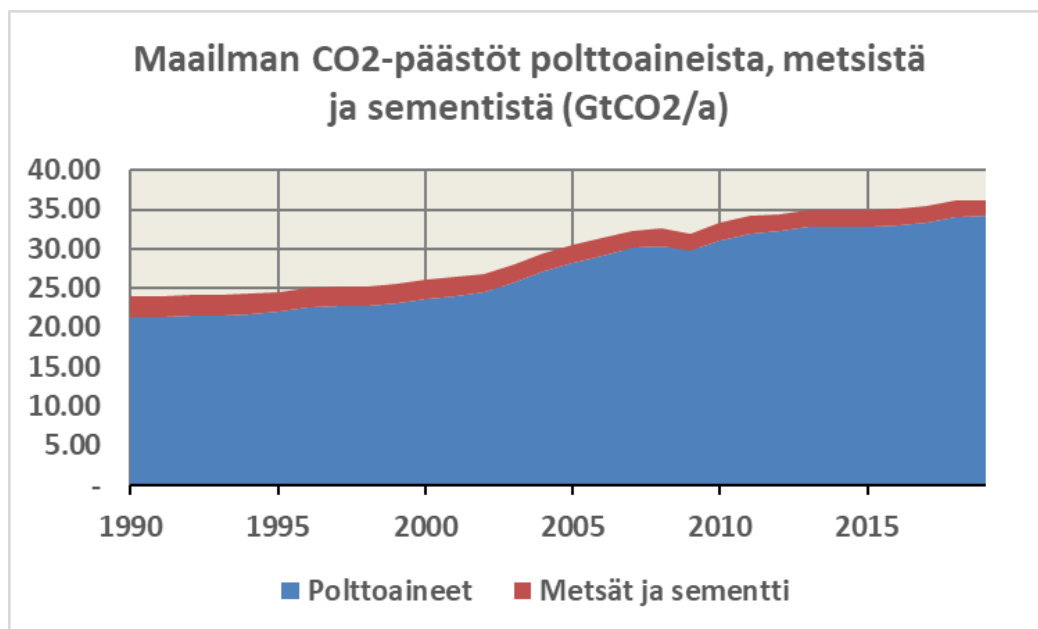
Kuva 4.3.1 Sementtiteollisuuden CO₂-päästöt (Lähde: Global CO₂ emissions from Cement Industry 1928–2018. Robbie M. Andrew, Earth system science data).



Kuva 4.3.6 Metsien, saha- ja sementtiteollisuuden CO₂-päästöt (GtCO₂/a).

4.4 Maailman CO₂-päästöt ja ilmakehän CO₂-pitoisuus

Kun polttoaineiden, metsien ja sementtiteollisuuden CO₂-päästöt lasketaan yhteen, saadaan melko hyvä arvio maailman kaikista CO₂-päästöistä. Niiden yhteismäärä oli vuonna 2019 noin 36 gigatonnia (Kuva 4.4.1).

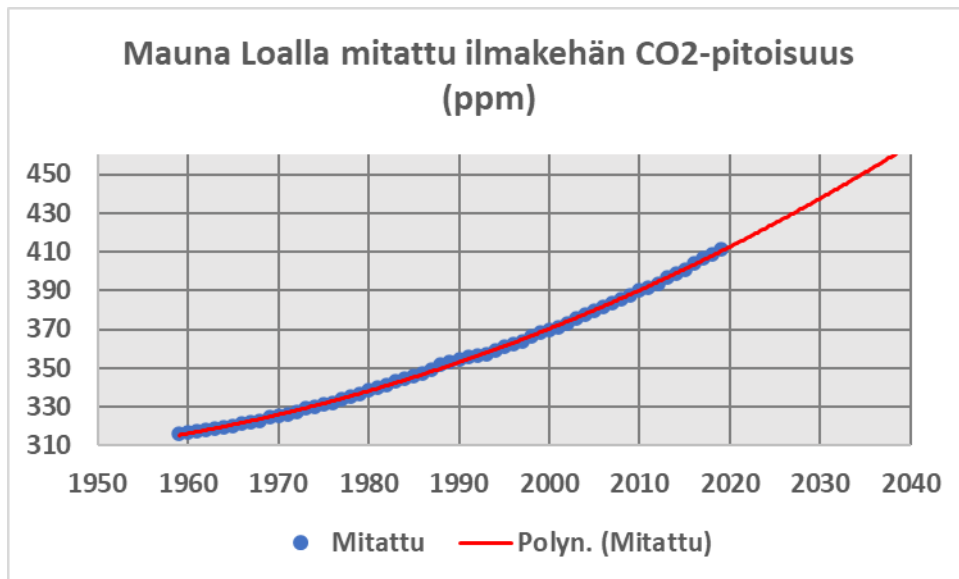


Kuva 4.4.1 Maailman CO₂-päästöt (GtCO₂/a)

Tässä on oletettu, että metsien CO₂-päästöt ovat pysyneet samassa tasossa koko ajan vuodesta 1959 lähtien aina vuoteen 1990 asti, jolloin ne alkoivat pienentyä. Vastaavasti on oletettu, että sementin valmistuksen CO₂-päästöt tulivat merkittäväksi vasta vuodesta 1940 lähtien. Metsien ja sementtiteollisuuden yhteismäärä on säilynyt koko ajan lähes samana hieman kahden gigatonnin yläpuolella.

Ilmakehässä olevan hiilidioksidin pitoisuutta on mitattu vuodesta 1958 alkaen Mauna Loan tulivuorella Havaijilla. Mittaukset aloitti yhdysvaltalainen tiedemies **Charles Keeling** (1928–2006), joka sai ensimmäisenä päivänä mittaustulokseksi helposti muistettavan luvun 314 ppm (miljoonasosa). Ensimmäisen kokonaisen vuoden (1959) keskiarvoksi hän sai arvon 316,0 ppm.

Siitä asti Mauna Loalla on mitattu ilmakehän CO₂-pitoisuutta ja vuoden 2019 arvo oli jo 411,4 ppm (Kuva 4.4.2). Jos CO₂-päästöjen kehitys jatkuu samanlaisena kuin tähän asti, polynomisen trendin mukaan ilmakehän CO₂-pitoisuus ylittää 430 ppm vuonna 2027 ja kriittisenä pidetyn arvon 450 ppm vuonna 2035.



Kuva 4.4.2 Ilmakehän CO₂-pitoisuus Mauna Loan mittausasemalla (ppm).

Ilmakehässä olevan CO₂:n massa M_{CO_2} voidaan puolestaan laskea suoraan ilmakehän CO₂-pitoisuuden avulla seuraavasti:

$$(4.4.1) \quad M_{CO_2} = m_{CO_2}/m_{air} \times M_{air} \times C_{CO_2} = 3217 \text{ GtCO}_2$$

Jossa m_{CO_2} = CO₂:n moolimassa = 44,0095

m_{air} = ilman moolimassa = 28,97

M_{air} = ilmakehän massa = $5,148 \times 10^{+18}$ tonnia

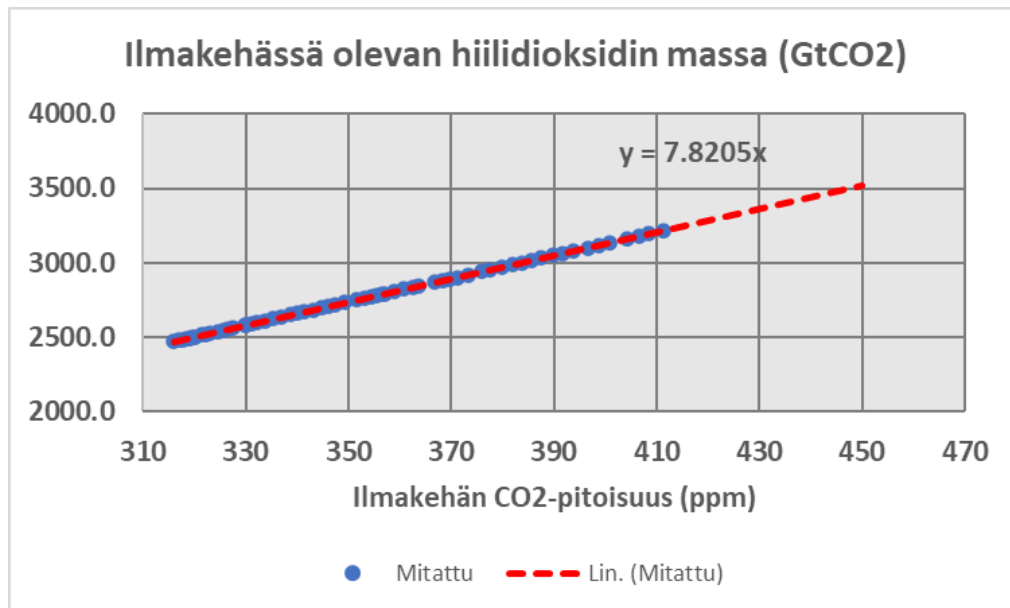
C_{CO_2} = Ilmakehän CO₂-pitoisuus = 411,4 ppm (2019)

Hiilidioksidin massalle (M_{CO_2}) ilmassa saadaan näin malli:

$$(4.4.2) \quad M_{CO_2} = 7,8205 \times \text{CO}_2\text{-pitoisuus}$$

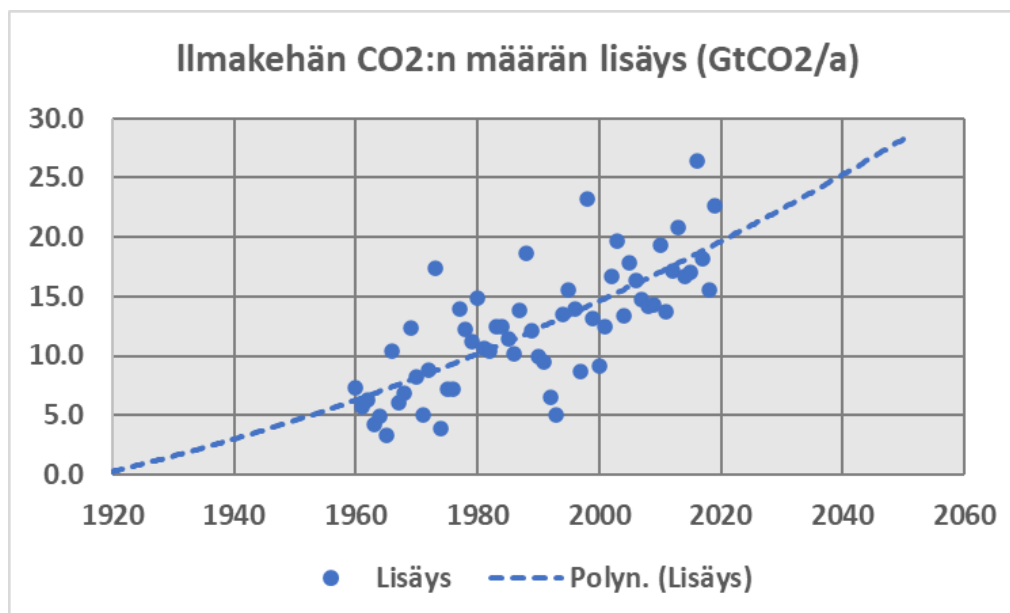
$$(4.4.3) \quad C_{CO_2} = M_{CO_2}/7,8205$$

Tulokseksi saadaan, että vuonna 2019 ilman pitoisuuden ollessa 411,4 ppm ilmassa oli 3217 tonnia hiilidioksidia. Kun pitoisuus nousee 450 ppm tasolle, ilmakehässä on hiilidioksidia vastaavasti noin 3500 Gt (Kuva 4.4.3).



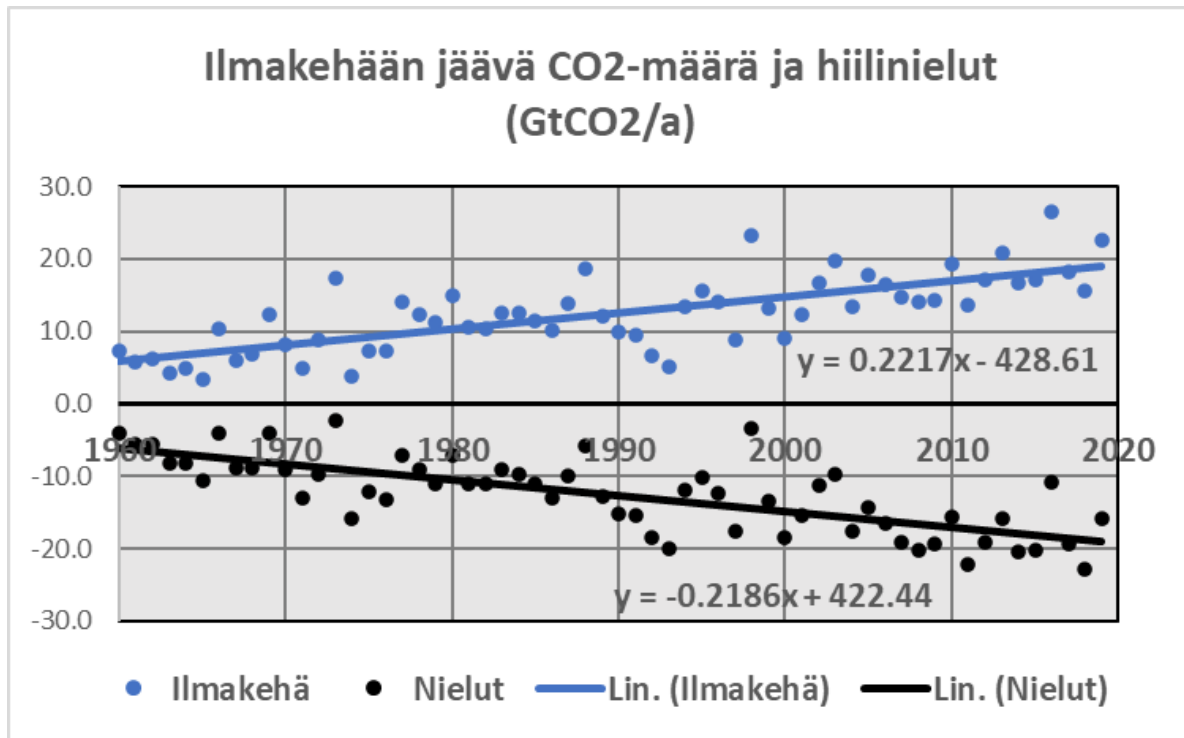
Kuva 4.4.3 Ilmakehän hiilidioksidin massa CO₂-pitoisuuden funktiona.

Kun ilmakehän CO₂-pitoisuus tunnetaan vuosittain, niin sen tiedon avulla voidaan laskea, kuinka paljon kunakin vuonna ilmakehän hiilidioksidin määrä on kasvanut (Kuva 4.4.4). Kuvasta nähdään, että kasvu oli 1960 noin 7 Gt vuodessa ja vuonna 2020 noin 20 Gt vuodessa. Polynominen trendi kertoo, että ilmakehän CO₂-pitoisuuden kasvu olisi alkanut nollasta vuonna 1920. Vastaavasti polynomisen trendin mukaan ilmakehään jäävä hiilidioksidin määrä nousee arvoon 25 Gt/a vuoteen 2040 mennessä.



Kuva 4.4.4 Ilmakehän hiilidioksidin massan kasvu vuosittain (GtCO₂/a).

Kun päästöistä (Kuva 4.4.1) vähennetään ilmakehään jäävä (Kuva 4.4.4) hiilidioksidimäärä, voidaan arvioida nielujen suuruus (Kuva 4.4.5). Kuvasta voidaan havaita, että ilmakehään jäävät hiilidioksidimäärä kasvu (kulmakerroin 0,2217 Gt/a) on ollut hieman nopeampaa kuin nielujen kasvu (kulmakerroin 0,2186 Gt/a). Käytännössä molemmat ovat kasvaneet yhtä nopeasti.



Kuva 4.4.5 Ilmakehään jäävä hiilidioksidimäärä ja hiilinielut (GtCO₂/a).

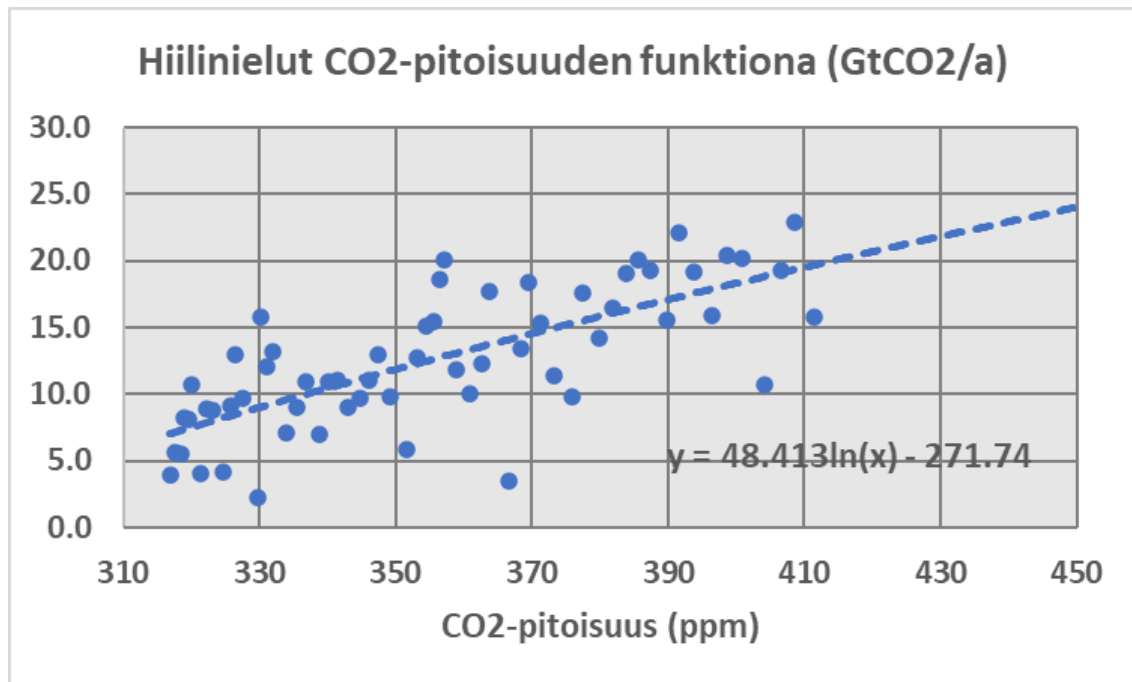
Kun hiilinielujen määrä esitetään CO₂-pitoisuuden funktiona (Kuva 4.3.6), saadaan nielujen laskemiseksi seuraava malli:

(4.4.4) $Nielu = 48,4 \times \ln(C) - 271,7$

Missä

$\ln$ = luonnollinen logaritmi

C = ilmakehän CO₂-pitoisuus



Kuva 4.4.6 Hiilinielujen määrä CO₂-pitoisuuden funktiona (GtCO₂/a).

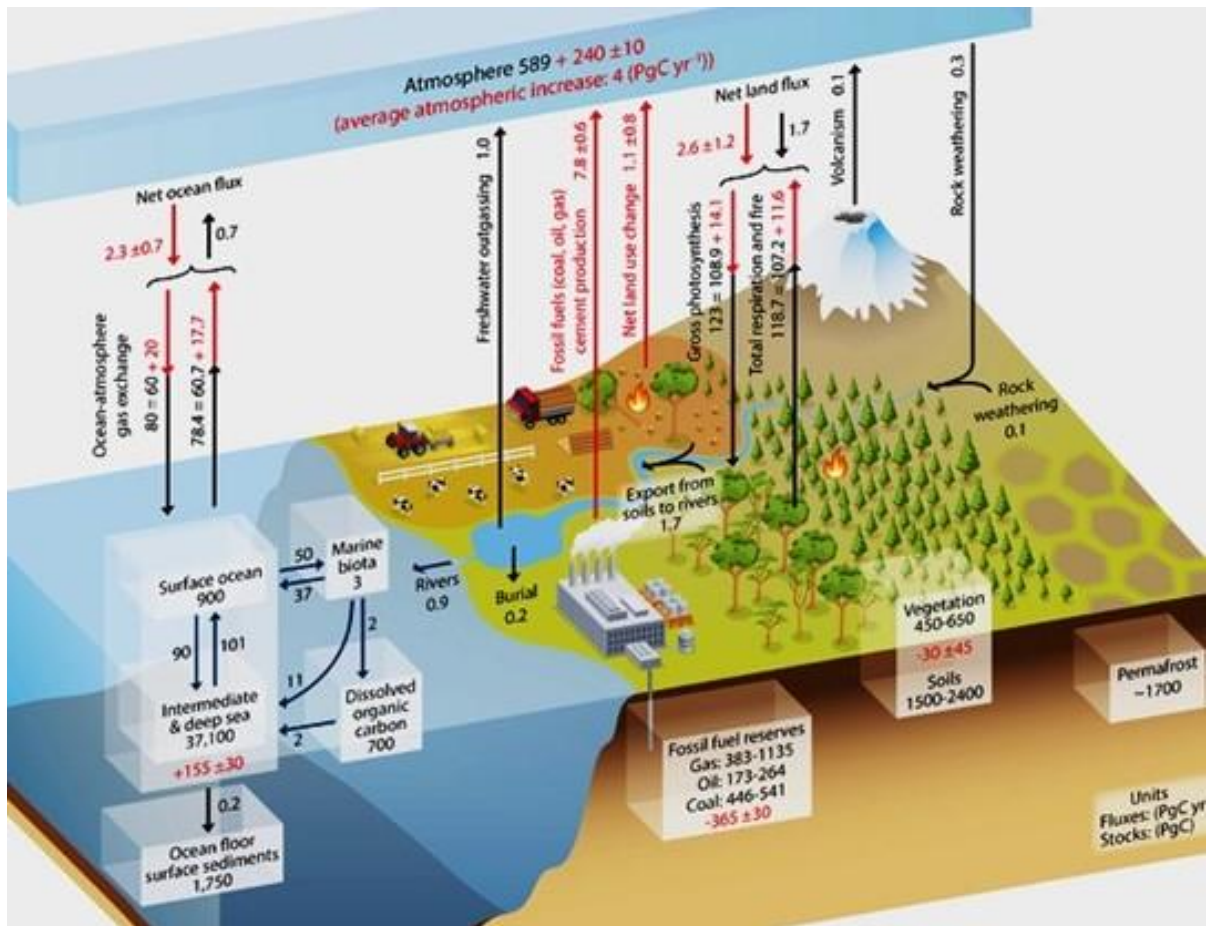
Kaavan 4.4.4 mukaan, kun CO₂-pitoisuus on 450 ppm, nielut ovat 24,0 GtCO₂. Tätä mallia voidaan käyttää, kun ilmakehän CO₂-pitoisuutta ennustetaan seuraavan algoritmin mukaisesti:

1. Lasketaan skenaarion mukaisen CO₂-päästöt tarkasteluvuotena dMP(i)
2. Lasketaan kaavan 4.4.4. avulla hiilinielujen suuruus dMN(i)=48,4 x ln(C)+271,7
3. Lasketaan ilmakehään jäävä CO₂-määrä dMI(i)= dMP(i)– dMN(i)
4. Lasketaan ilmakehän kertynyt CO₂:n massa MI(i+1) = MI(i)+dM(i)
5. Lasketaan ilmakehän CO₂-pitoisuus C = MI(i+1) / 7,8205 (Kaava 4.4.3)

Maailman hiilitase on esitetty IPCC:n vuoden 2018 raportin (WG1 AR5) mukaan kuvassa 4.4.7, jossa punaiset luvut kertovat ihmiskunnan osuuden. Sen mukaan fossiilisten polttoaineiden ja sementtiteollisuuden päästöt ovat noin 7,8 gigatonnia hiiltä (29 GtCO₂) ja maankäytön päästöt 1,1 GtC (4,0 GtCO₂) eli yhteensä 8,9 GtC (33 GtCO₂) vuodessa.

Ilmakehään päästöistä jää vuosittain 4 GtC (14,6 GtCO₂) eli noin 44 % ihmisten aiheuttamista päästöistä. Meriin päästöstä jaa 2,3 GtC (8,4 GtCO₂) ja muualla luontoon loput eli 2,6 Gt (9,5 GtCO₂).

Vuoteen 2010 mennessä fossiilisia polttoaineita on poltettu (punaiset osat) 365 GtC (1336 GtCO₂) ja metsiä hävitetty 30 GtC (110 GtCO₂) eli yhtensä 395 GtC (1446 GtCO₂). Tästä määrästä ilmakehään on jäänyt 240 GtC (878 GtCO₂) eli 60 %. Meriin on absorboitunut 155 GtC (558 GtCO₂) eli 40 % päästöistä. Merten hiilimäärä on kasvanut kuitenkin vain 0,4 %.



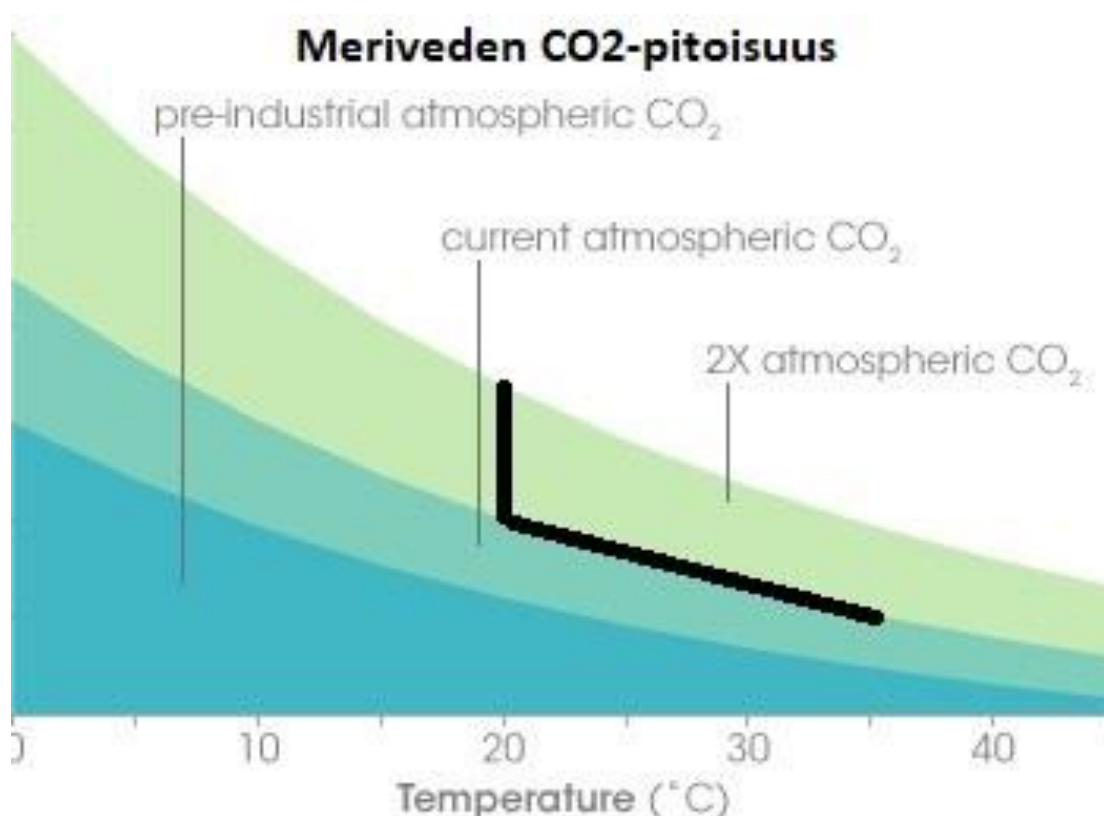
Kuva 4.4.7 Maailman hiilitase WG1 AR5-raportin mukaan (IPCC 2013).

Fossiilisten polttoaineiden päästöt saavuttivat 1235 Gt kuvan 4.1.3 mukaan vuonna 2010. Sementtiteollisuuden päästöt ovat olleet siihen mennessä noin 30 Gt, joten tässä kirjassa kerrotut päästöt ovat noin 1265 GtCO₂, joka on melko lähellä (94 %) IPCC:n arvioimaa 1336 GtCO₂. Myös metsien aiheuttamien CO₂-päästöjen määrä 100 GtCO₂ on hyvin lähellä IPCC:n arviota 110 GtCO₂.

Fossiilisten polttoaineiden ja sementin yhteismäärä oli vuoteen 2010 mennessä IPCC:n arviossa 1436 Gt ja tämän kirjan arviossa 1340 Gt. Määrät täsmäävät keskenään erittäin hyvin. Vahinko vaan, että IPCC ei ole esittänyt samanlaista hiilitasetta sen myöhemmissä laskelmissa.

Ilmakehään on IPCC:n mukaan jäänyt 878 Gt ja meriin absorboitunut 558 Gt eli yhteensä 1446 Gt. Tämän kirjan mukaan ilmakehään on vuoteen 2010 mennessä jäänyt 663 Gt ja meriin absorboitunut 701 Gt eli yhteensä 1364 Gt. Ero IPCC:n arvioon on 6 %.

Merien CO₂-pitoisuus kasvaa myös Nasan mittausten perusteella sitä enemmän, mitä suurempi on ilmakehän CO₂-pitoisuus (Kuva 4.4.8). Jos kuvaa tarkastelee 20 asteen kohdalta, havaitaan, että CO₂-pitoisuuden nousu kaksinkertaiseksi nostaa merien CO₂-pitoisuutta noin 50 %. Meriveden lämpötilan nousu kahdella asteella ei vaikuta merien CO₂-pitoisuuteen juuri lainkaan. Jos meriveden lämpötila nousee 15 astetta, niin sillä olisi sama vaikutus



Kuva 4.4.8 Meriveden CO₂-pitoisuus lämpötilan ja ilmakehän CO₂-pitoisuuden funktiona (Nasa: *The Ocean's carbon balance*. By Holly Riebeek).

4.5 Hiilidioksidin vaikutus lämpötilaan (SC-malli)

Ilmaston lämpenemisen syyt jaettiin kahteen, joista auringon (S=Sun) osuus tutkittiin ensin. Kuvasta 3.3.14 havaitaan, että auringon säteily selitti lämpenemisen melko hyvin vuoteen 1980 asti. Sen jälkeen lämpötila on noussut nopeasti muista syistä, joista yksi on ilmakehän CO₂-pitoisuuden nousu. Tämän oletuksen pohjalta voidaan kehittää kahden muuttujan auringonpilkkujen (S=sun) ja CO₂-pitoisuuden (C) perusteella lämpötilan nousulle SC-malli seuraavasti.

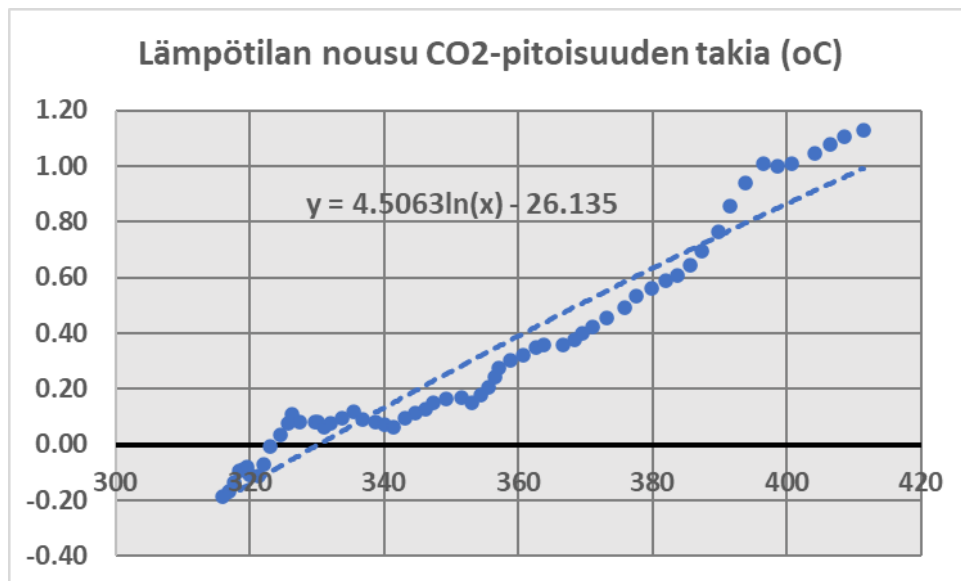
Kun muista syistä aiheutunut lämpötilan nousu ja ilmakehän CO₂-pitoisuus esitetään XY-kaaviossa, huomataan, että noin 320 ppm pitoisuuden jälkeen lämpötilan nousu on tapahtunut logaritmisen SC-mallin mukaisesti, jolloin huomioidaan vain auringonpilkut (S) ja CO₂-pitoisuus (C) (Kuva 4.5.1).

SC-malliksi saadaan:

$$dT = 4,506 \times \ln (C) - 26,135$$

$$(4.5.1) \quad dT = 4,506 \times \ln (C/330,2)$$

Missä C = ilmakehän CO₂-pitoisuus

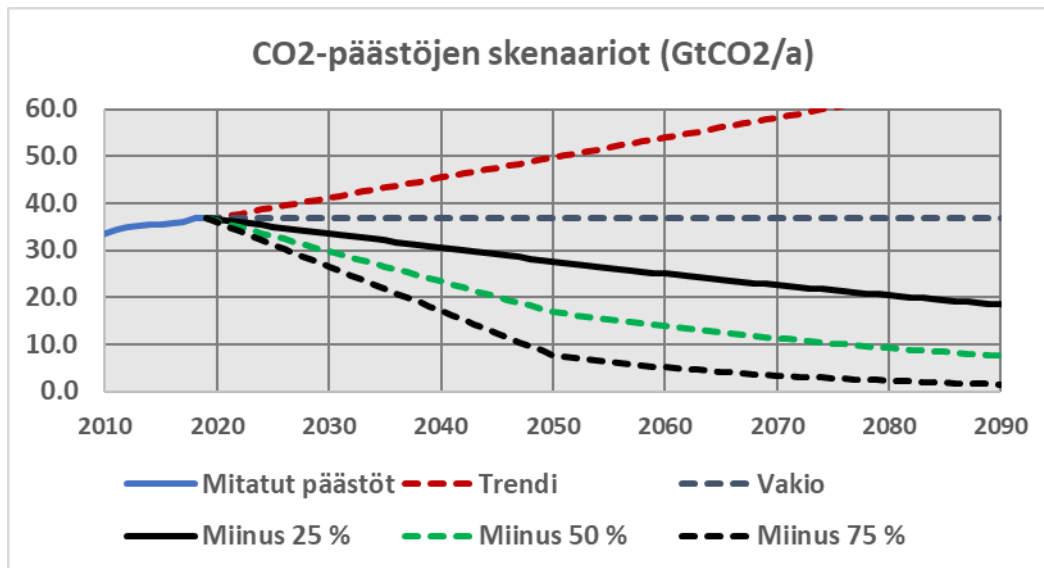


Kuva 4.5.1 Ilmaston lämpeneminen muiden syiden kuin auringon vuoksi CO₂-pitoisuuden funktiona.

4.6 CO₂-päästöjen skenaariot ja lämpötilan nousu

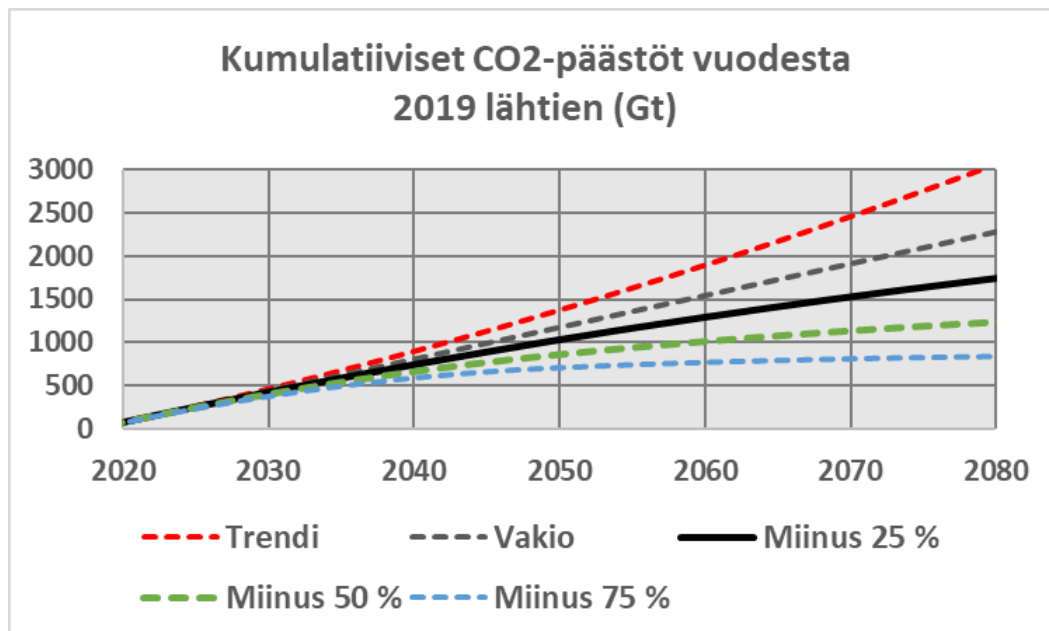
Ilmakehän CO₂-pitoisuus määräytyy sitä, miten päästöt kehittyvät tulevaisuudessa. Seuraavassa on esitetty viisi skenaariota

- 1) Trendi. Päästöt kasvavat lineaarisesti kuten nytkin
- 2) Vakio. Päästöt pysyvät vakioina nykytasolla
- 3) Miinus 25 %. Päästöt vähenevät 25 % vuoteen 2050 mennessä ja sen jälkeen 1 %/a
- 4) Miinus 50 %. Päästöt vähenevät 50 % vuoteen 2050 mennessä ja sen jälkeen 2 %/a
- 5) Miinus 75 %. Päästöt vähenevät 75 % vuoteen 2050 mennessä ja sen jälkeen 4 %/a



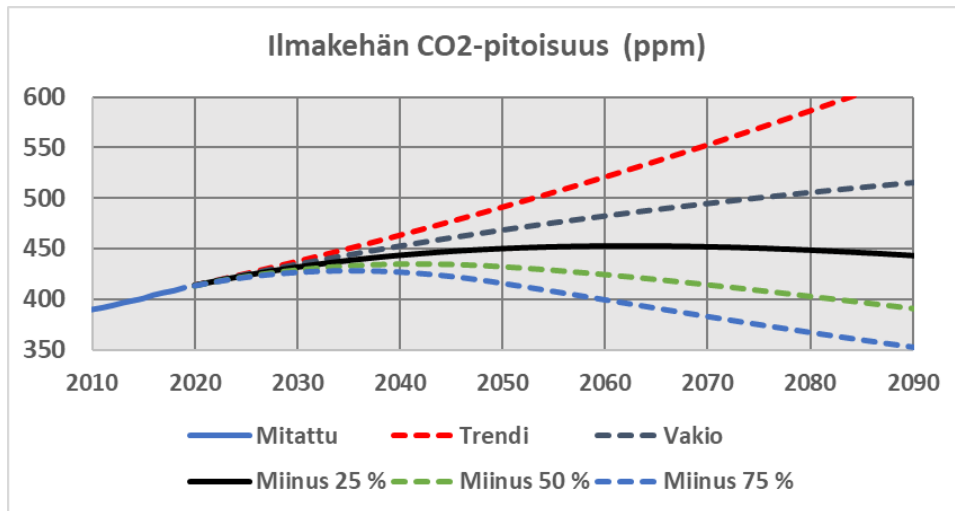
Kuva 4.6.1 Päästöjen skenaariot (GtCO_2/a).

Kumulatiiviset CO_2 -päästöt eri skenaarioissa vuoden 2020 jälkeen ovat kuvan 4.6.2 mukaisia. Kumulatiiviset päästöt ylittävät 1000 Gt vuonna 2045, jos päästöt säilyvät vakiona ja nykytasolla, Miinus 25 % -skenaariossa 1000 gigatonnia ylittyy vuonna 2050. Miinus 50 %- skenaariossa 1000 gigatonnia ylittyy vasta vuonna 2060. Jo tässä voidaan todeta, että mitään absoluuttista kiintiötä ei tarvita, jos ilmaston lämpeneminen halutaan rajoittaa kahteen asteeseen. Tärkeämpi raja on ilmakehän CO_2 -pitoisuus.



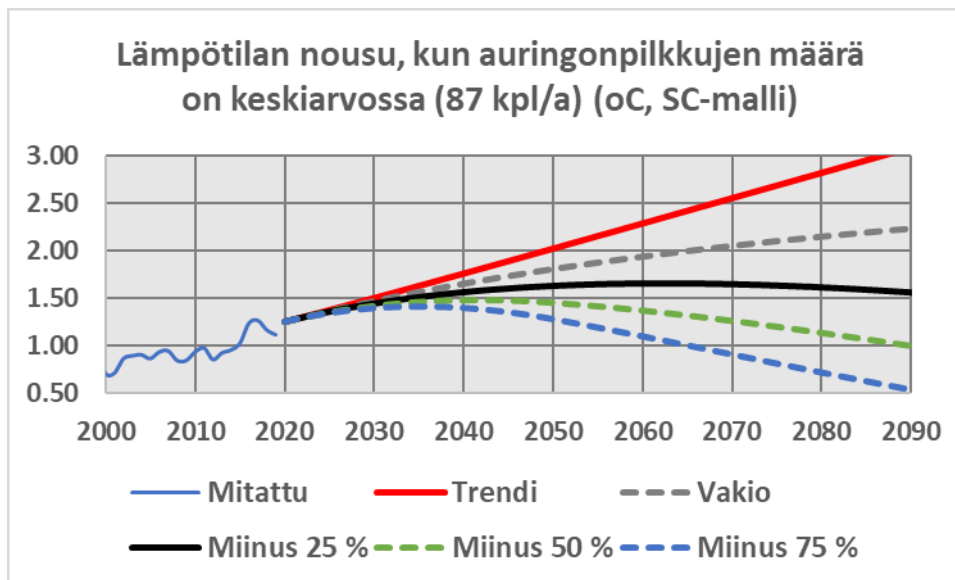
Kuva 4.6.2 Kumulatiiviset CO_2 -päästöt vuoden 2019 jälkeen (GtCO_2).

Ilmaan jäävä CO₂:n massa saadaan vähentämällä päästöistä hiilinielut olettaen, että hiilinielut kasvavat kaavan (4.4.4) $Nielu = 48,4 \times \ln(C) - 271,7$ mukaisesti ilmakehän CO₂-pitoisuuden funktiona. Ilmakehän CO₂ massa kasvaa $MCO2(i+1) = MCO2(i) + MP(i) - Nielu(i)$. Ilmakehän CO₂-pitoisuus voidaan puolestaan laskea (kaavalla 4.4.3) $C_{CO2} = M_{CO2}/7,8205$. Näin voidaan simuloida ilmakehän CO₂-pitoisuuden kehittyminen tulevaisuudessa (Kuva 4.6.3).



Kuva 4.6.3 Ilmakehän CO₂-pitoisuus eri skenaarioissa. (ppm).

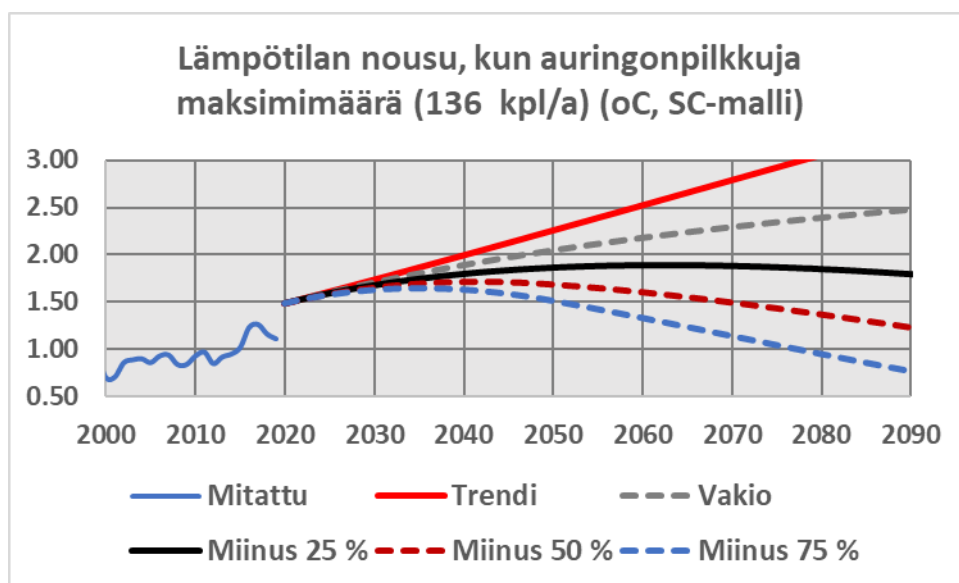
Lämpötilan nousu voidaan puolestaan laskea ilmakehään CO₂-pitoisuudesta SC-mallin kaavalla (4.5.1) $dT = 4,506 \times \ln(C/330,2)$. Todennäköiset arviot lämpötilan nousulle, kun auringonpilkkujen määrä on keskiarvossa (87) on esitetty kuvassa 4.6.4.



Kuva 4.6.4 Ilmakehän lämpötila eri skenaarioissa auringonpilkkuja on mediaanimäärä (87 kpl/a) (SC-malli, °C).

Kuvan mukaan auringonpilkkujen ollessa keskitasossa kahden asteen lämpötilan nousu ylittyy vuonna 2065, jos päästöt jatkuvat nykytasolla (Vakio). Tavoiteltu 1,5 asteen lämpötilan nousu ylittyy vuonna 2030 nykypäästöillä. Miinus 25 % -skenaariossa 1,5 asteen raja ylittyy vuonna 2035. Miinus 50 % -skenaariossa lämpeneminen jää alle 1,5 asteen.

Kun auringonpilkkujen määrä on maksimiarvossa (136), lämpötilan nousu jää alle kahden asteen, jos päästöjä vähennetään vähintään Miinus 25 % -skenaariion mukaisesti (Kuva 4.6.5). Vakiopäästöillä kaksi astetta ylittyy vuonna 2050.



Kuva 4.6.5 Ilmakehän lämpötila eri skenaarioissa auringonpilkkuja on mediaanimäärä (136 kpl/a) (°C, SC-malli).

Yhteenveto

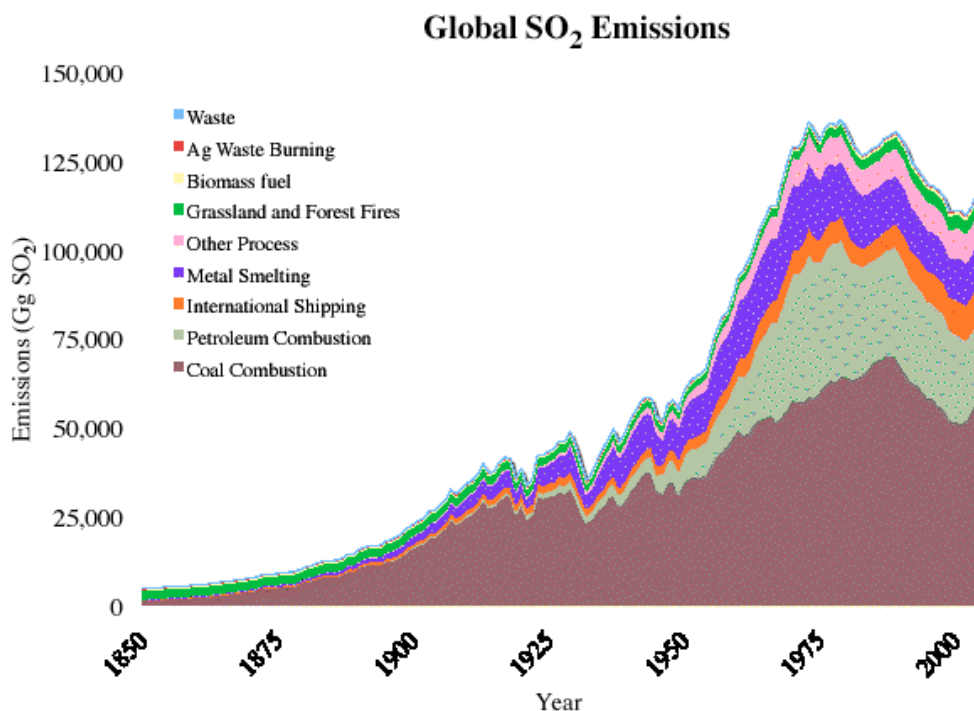
Jos lämpötilan nousua simuloidaan ottamalla malliin vain auringon (S) ja hiilidioksidin (C) vaikutus, lämpötila nousee SC-mallin mukaan melko hitaasti. Lämpötilan nousu ylittää kaksi astetta vuonna 2050, jos päästöt jatkuvat nykytasolla. Jos päästöjä vähennetään Miinus 25 %-skenaariion mukaan lämpötilan nousu jää alle kahden asteen vuosien 1901–1930 keskiarvoon verrattuna.

Todellisuudessa lämpötilan nousu on nopeampaa, koska hiilidioksidipäästöjen vähetessä myös rikkidioksidipäästöt vähenevät. Sekä kivihiilessä että öljyssä on rikkiä. Rikkidioksidipäästöjen väheneminen vaikuttaa myös ilmakehän lämpötilaa nostavasti. Näin tällä pelkästään auringon säteilyä ja CO₂-päästöjä simuloiva SC-malli on puutteellinen. Malliin tarvitaan vielä kolmas muuttuja aerosolit, joita voidaan mitata rikkipäästöjen (S) avulla. Näin saadaan kolmen muuttujan SCA-malli. Sitä kuvataan seuraavassa luvussa.

5. KOLMEN MUUTTUJAN SCA2-MALLI

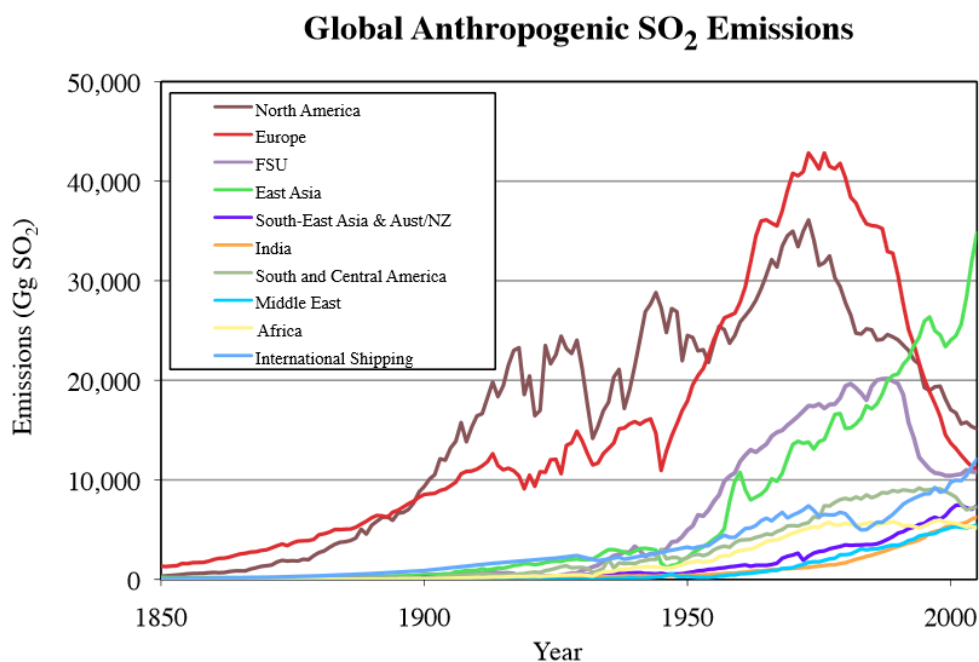
5.1 Aerosolit ja SO₂-päästöt

Auringon (S) ja hiilidioksidin (C) lisäksi tarvitsemme ilmastomalliin vielä kolmannen muuttujan, aerosolit (A). Aerosolien osalta tunnetaan vuoden 1900 jälkeen vain rikkidioksidipäästöt (SO₂), koska niiden määrää on voitu arvioida käytettyjen polttoaineiden perusteella. Kivihiili on ollut tähän asti suurin SO₂-päästöjen lähde (Kuva 5.1.1). Vuoden 1950 jälkeen myös öljyn käyttö aiheutti merkittävät SO₂-päästöt. Raskasta polttoöljyä käytetään edelleen voimalaitoksissa ja laivoissa ilman SO₂-puhdistusta.



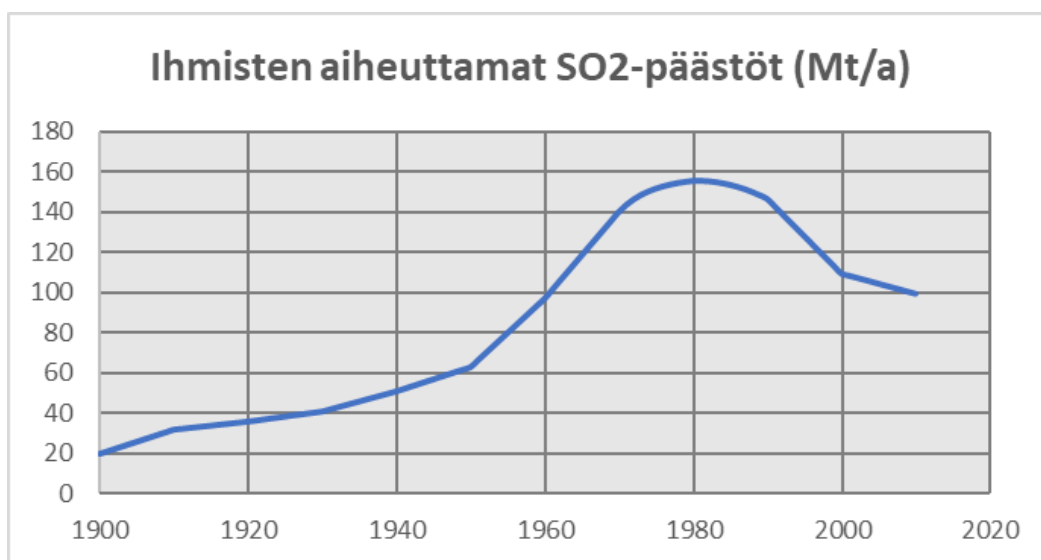
Kuva 5.1.1 Ihmisen aiheuttamat rikkidioksidipäästöt (Lähde: *Anthropogenic sulfur dioxide emissions: 1850–2005. Atmos. Chem. Phys.*, 11, 1101–1116, 2011).

Saman lähteen mukaan on arvioitu myös SO₂-päästöjen lähteitä maittain (Kuva 5.1.2). Vuoteen 1990 asti suurimmat päästöjen aiheuttajat olivat Eurooppa ja Pohjois-Amerikka. Vuoden 1990 jälkeen suurimmat SO₂-päästöt ovat tulleet Kiinasta (East Asia), joka on lisännyt kivihiilen käyttöä voimalaitoksissaan merkittävästi.



Kuva 5.1.2 Ihmisten aiheuttamat SO₂-emissiot maittain (Lähde: Anthropogenic sulfur dioxide emissions: 1850–2005. Atmos. Chem. Phys., 11, 1101–1116, 2011).

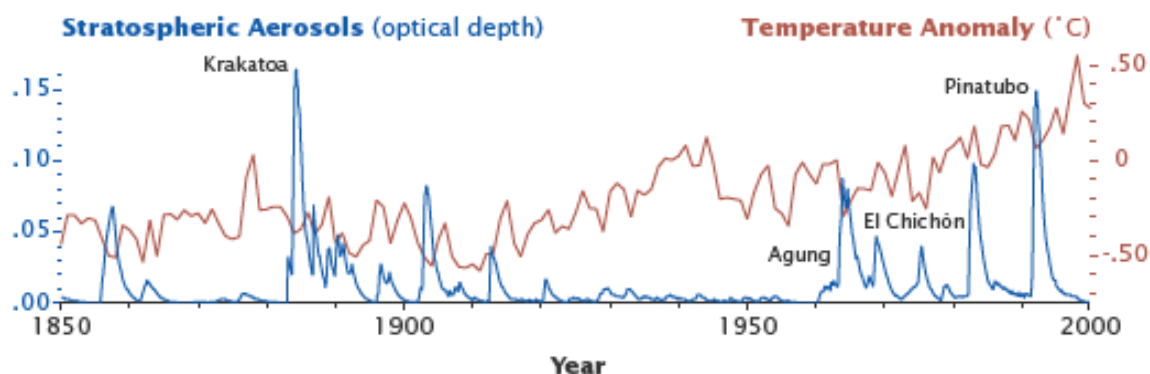
Kuvasta 5.1.1 johdettu rikkidioksidipäästöjen kehitys on esitetty taulukkomallin lukuihin perustuen kuvassa 5.1.3. Näitä lukuja on käytetty seuraavassa, kun niiden viilentävää vaikutusta on arvioitu.



Kuva 5.1.3 Rikkidioksidipäästöjen kehitys edellisen kuvan perusteella (MtSO₂/a).

5.2 Kolmen muuttujan SCA2-malli

On jo kauan tiedetty, että tulivuorten purkaukset viilentävät ilmastoa muutamaksi vuodeksi. Vuonna 1883 tapahtunut Krakatoan tulivuoren purkaus vaikutti ilmastoon viilentävästi monta vuotta (Kuva 5.2.1). Samoin teki viimeisin suuri Pinatubo-tulivuoren purkaus vuonna 1991.



Kuva 5.2.1 Aerosolien vaikutus optiseen näkyvyyteen (Lähde: Nasa).

Aerosolien takia auringon valo heijastuu takaisin avaruuteen. Voidaan ajatella, että maahan tulevan säteily (S_{in}) kaavassa albedo (α , heijastuskerroin) kasvaa.

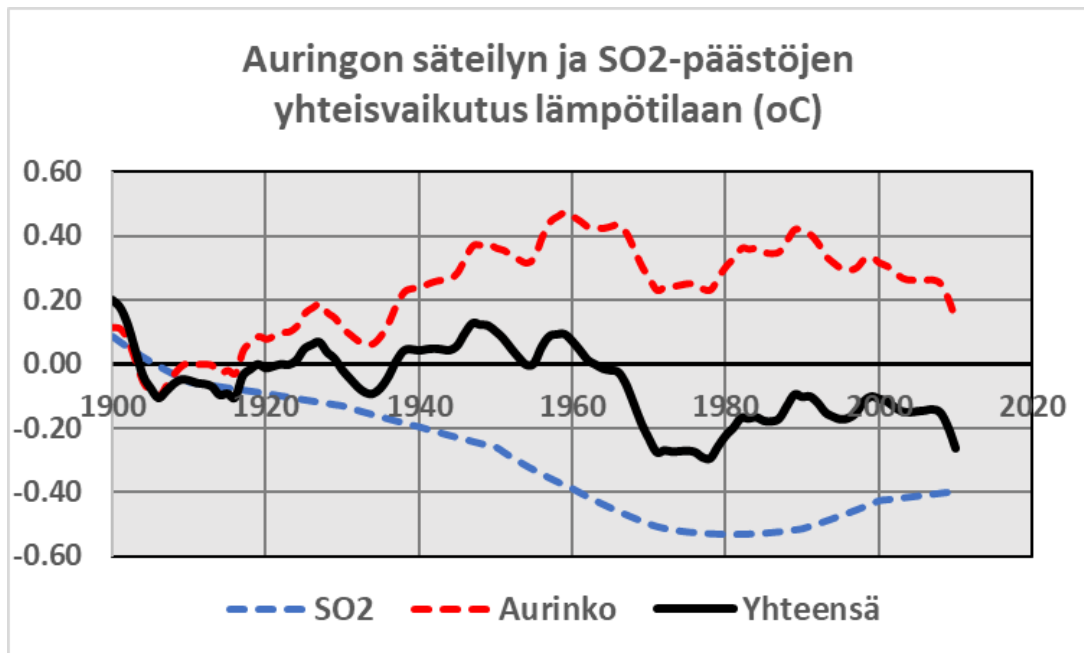
$$S_{in} = S_{ka} \times (1 - \alpha)$$

Albedo on normaalisti noin 0,306, mutta aerosolien vaikutuksesta se kasvaa ja maahan tulee pienempi määrä auringon säteilytehoa.

Rikkidioksidipäästöjen (S_e) vaikutus lämpötilaan (dT) voidaan mallintaa kaavaksi (Lähde: *Fundamentals of Global Warming*, Asko Vuorinen 2019. www.ekoenergo.fi):

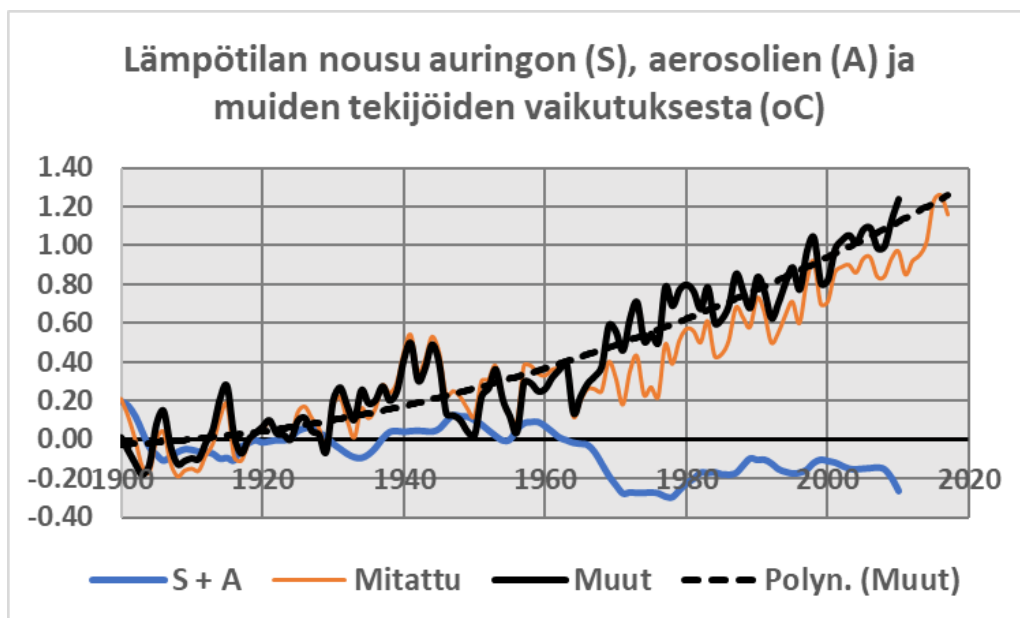
$$(5.2.1) \quad dT = 0,30 \times \ln (S_e/26.5)$$

Kaavan avulla voidaan laskea, mikä on ollut SO_2 -päästöjen vaikutus lämpötilaan. Kun siihen yhdistetään myös auringon säteilyn vaihtelu, saadaan näiden yhteisvaikutus (Kuva 5.2.2). Kuvan mukaan havaitaan, että näin korjattu lämpötila pysyi lähes vakiona aina vuoteen 1960 asti, jonka jälkeen korjattu lämpötila alkoi laskea siten, että vuonna 2010 oltiin jo noin 0,27 astetta miinuspuolella.



Kuva 5.2.2 Ilmakehän lämpötilan muutos rikkidioksidin (SO₂) ja auringon säteilyn vaikutuksesta (°C).

Kun auringon ja aerosolien yhteisvaikutus (S+A) esitetään yhdessä mitattujen lämpötilojen kanssa, saadaan niiden erotuksena muiden tekijöiden eli CO₂:n vaikutus (Kuva 5.2.3).

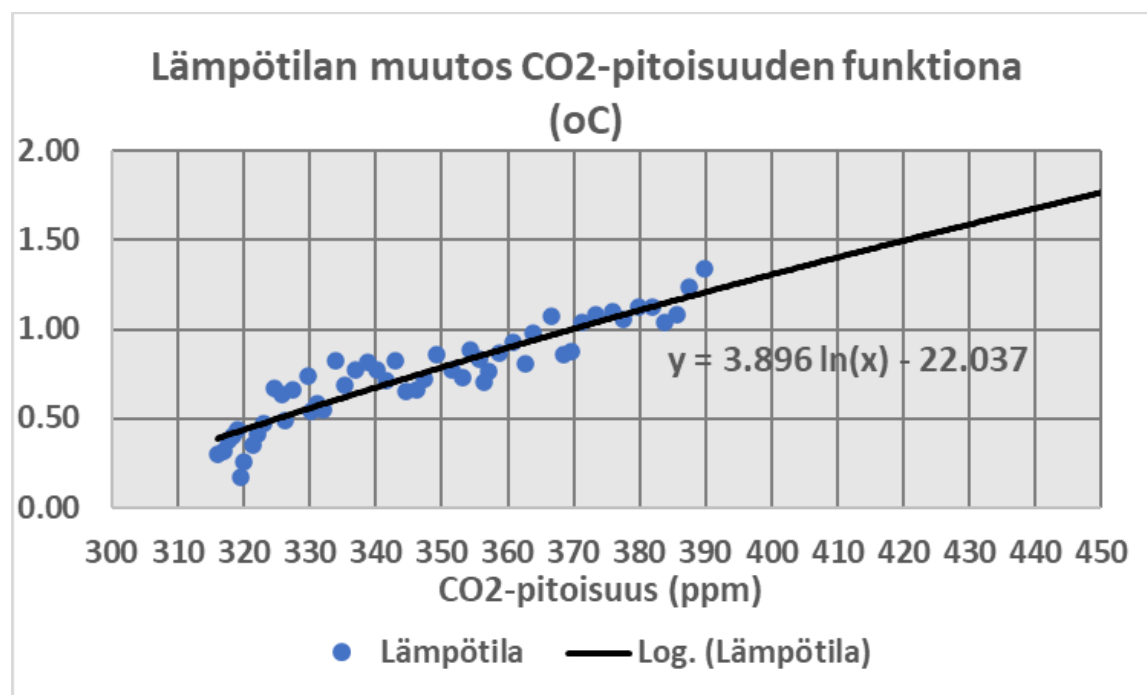


Kuva 5.2.3 Lämpötilan nousu auringon (S), aerosolien (A) ja muiden tekijöiden vaikutuksesta.

Muiden tekijöiden vaikutus voidaan esittää XY-akselistossa yhdessä CO₂-pitoisuuden kanssa (Kuva 5.2.4). Havaitaan, että silloin lämpötilan nousu noudattaa Arrheniuksen kaavaa:

$$dT = 3,90 \times \ln(C) - 22,04$$

(5.2.2)
$$dT = 3,90 \times \ln(C/286,1)$$



Kuva 5.2.4 Muista syistä aiheutunut lämpötilanmuutos CO₂-pitoisuuden funktiona.

Kun kaava (5.2.2) yhdistetään rikki-pitoisuuden kaavaan (5.2.1) ja auringonpilkkujen vaikutuksen kaavaan (3.3.3) ($dT = 0,534 \times \ln(Sp) - 2,152$), saadaan näiden kolmen tekijän yhteisvaikutuksesta **SCA2-malli**:

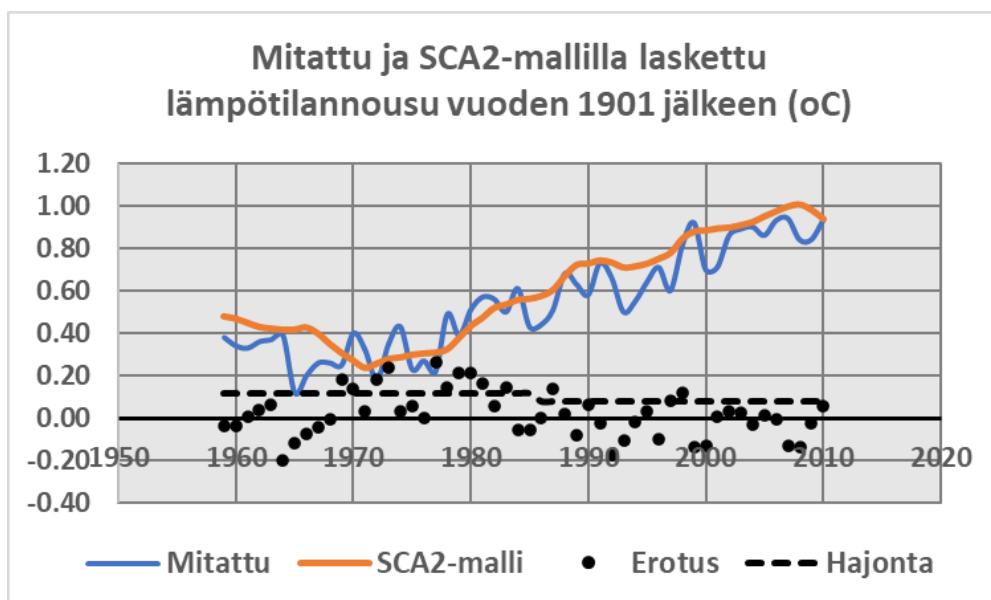
(5.2.3)
$$dT = 0,5344 \times \ln(Sp) + 3,896 \times \ln(C/286,1) - 0,30 \times \ln(S_e/26,5) - 2,152$$

Missä **Sp** = auringonpilkkujen lukumäärän 11 v keskiarvo (Sunspots)

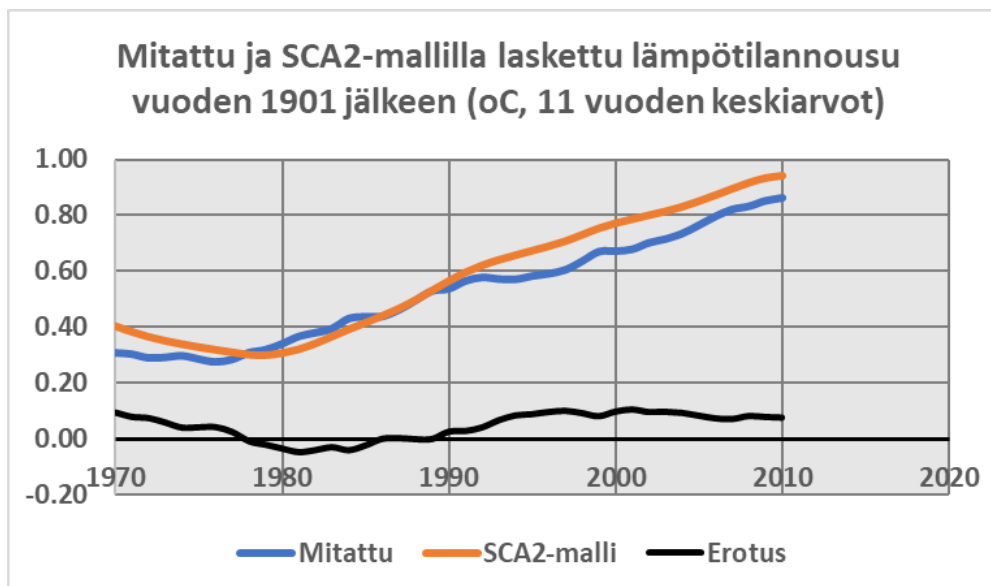
Se = SO₂-päästöt (Gt/a)

C = ilmakehän CO₂-pitoisuus (ppm)

Mallin mukaan saadaan toteutuneelle lämpötilan nousulle arvio (Kuva 5.2.5). Keskihajonta SCA2-mallin avulla lasketun ja mitatun nousun välillä on 0,11 astetta koko alueella, mutta vain 0,082 astetta vuosina 1987–2010. Lämpötilojen 11 vuoden keskiarvot poikkeavat toisistaan vuosina 1970–2010 vain 0,050 astetta (Kuva 5.2.6). Olisi mielenkiintoista tietää, mistä löytyisi yhtä tarkka malli.



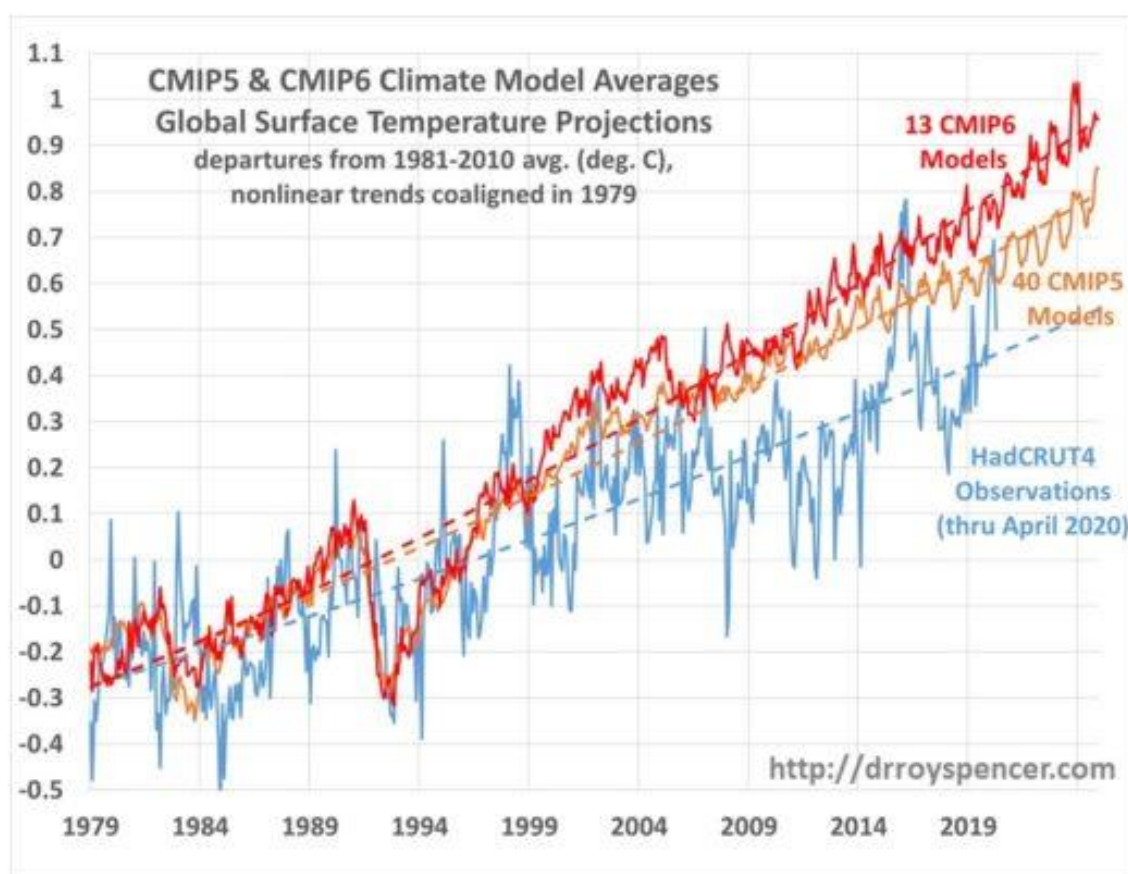
Kuva 5.2.5 Lämpötilannousu mallinnettuna tekijöiden auringonpilkut (S), CO₂-pitoisuus (C) ja aerosolit (A) perusteella ja mitattu lämpötilamuutos (lämpötilan vuosiarvot, °C).



Kuva 5.2.6 Lämpötilannousu mallinnettuna tekijöiden auringonpilkut (S), CO₂-pitoisuus (C) ja aerosolit (A) perusteella ja mitattu lämpötilamuutos (lämpötilan 11-v. keskiarvot, °C).

SCA2-mallin tarkkuutta voidaan verratta SCA1- mallin tarkkuuteen, joka on esitetty kirjassani *“Fundamentals of Global Warming”*, 2019. SCA1- mallin tarkkuus oli 0,071 astetta 11 vuoden keskiarvoista laskettuna. SCA2- mallin tarkkuus on 0,050 astetta 11 vuoden keskiarvoista laskettuna. SCA2- mallin erona SCA1- malliin on auringon vaikutuksen arviointi auringonpilkuista logaritmisen mallin mukaan, kun SCA1- malli laski niiden vaikutuksen lineaarisen mallin mukaisesti.

SCA2- mallin ennustetarkkuutta voidaan verrata IPCC:n kehittämään **CMIP6- malliin**, jonka avulla IPCC aikoo tehdä seuraavan ennusteensa (ARP6) maaliskuussa 2021. Nykyisen CMIP6-mallin ennustama lämpötilannousu vuoden 1979 jälkeen on 1,2 astetta, mutta todellinen nousu on ollut vain 0,8 astetta. CMIP6-mallin virhe on luokkaa 0,4 astetta eli lämpeneminen ollut noin 33 % hitaampaa, kuin ennustettiin CMIP6-mallilla. Malli on vielä kehitysvaiheessa.



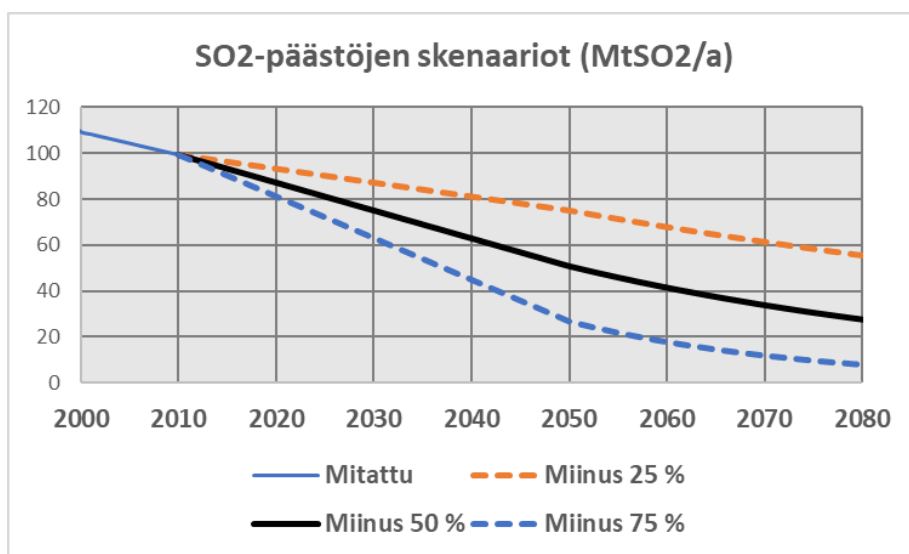
Kuva 5.2.7 CMIP5- ja 6-mallilla tehdyt ennusteet.

5.3 SO₂-päästöjen skenaariot

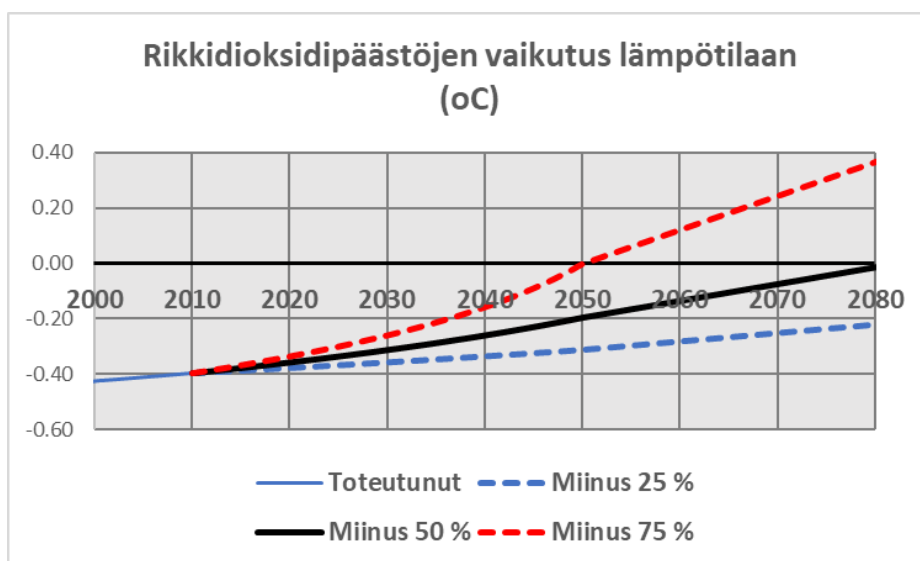
SO₂-päästöjen kehityksestä on tehty ennusteet siten, että vuotuinen vähennys on 25 %, 50 % tai 75 % vuodesta 2010 alkaen vuoteen 2050 mennessä ja sen jälkeen 1, 2 tai 4 % vuodessa vastaavasti (Kuva 5.3.1).

Ennusteiden mukaan vuoden 1950 päästötaso (60 Mt/a) saavutettaisiin miinus 25 %-vähennysskenaariossa vuonna 2070, miinus 50 % -skenaariossa vuonna 2042 ja miinus 75 %-skenaariossa vuonna 2032.

Kun päästöskenaarioille lasketaan lämpötilan ennusteet käyttäen kaavaa (5.2.1), saadaan tulokseksi kuvan 5.3.2 mukaiset ennusteet.



Kuva 5.3.1 SO₂-päästöjen kehitys (MtSO₂/a)



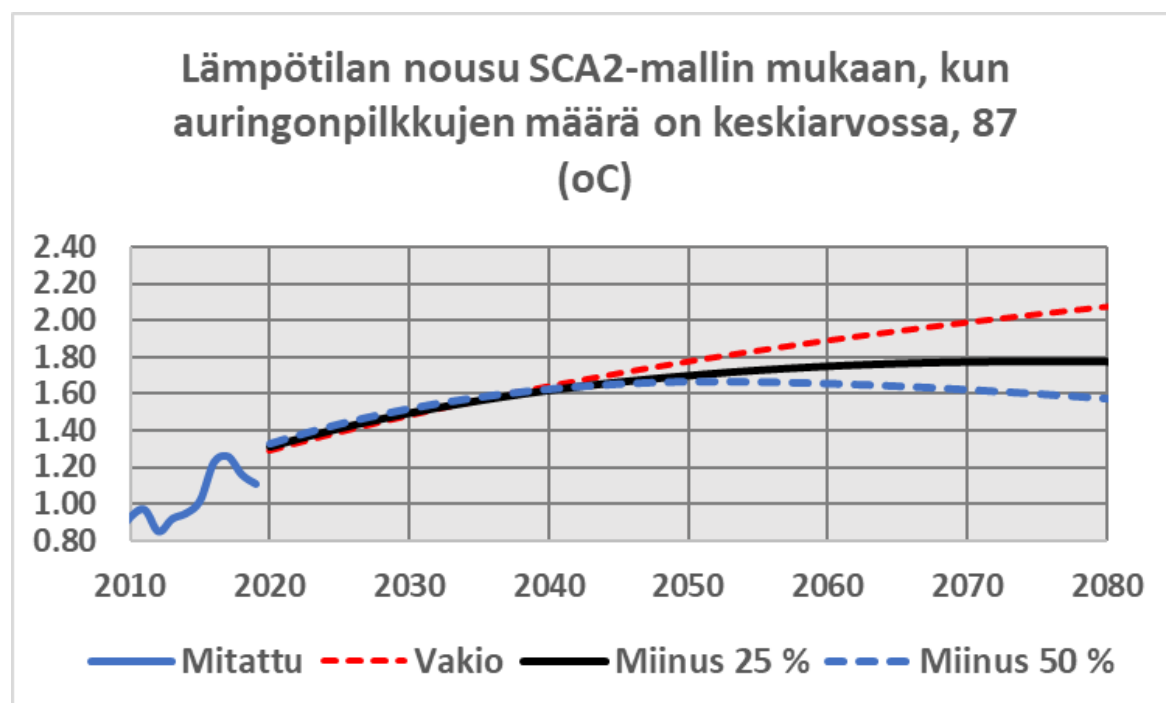
Kuva 5.3.2 Rikkidioksidin vaikutus lämpötilaan (°C).

Kuvan 5.3.2 mukaan Miinus 25 %- skenaarion mukaan lämpötilaa vain 0,09 astetta vuoteen 2050 mennessä. Miinus 50 %- skenaariossa lämpötila nousee 0,20 astetta (0,06/vuosi) vuoteen 2050 mennessä. Miinus 75 %- skenaariossa lämpötila nousee noin 0,40 astetta vuoteen 2050 mennessä.

5.4 Skenaariot käyttäen kolmen muuttujan SCA2-mallia

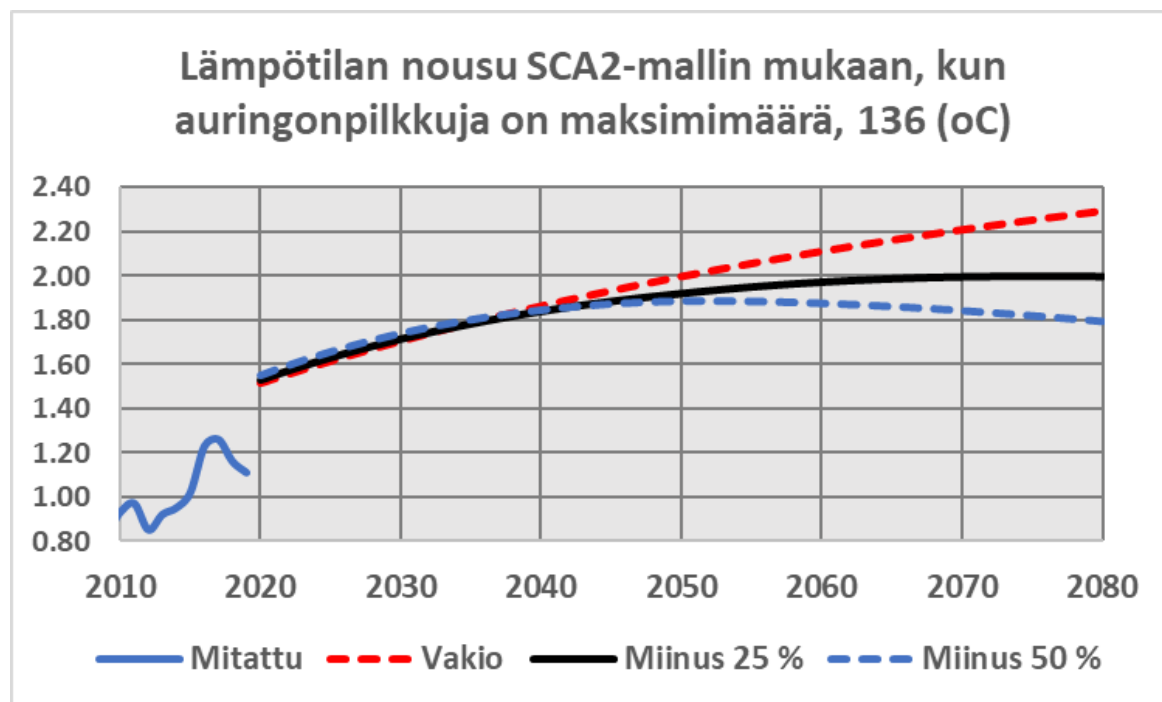
Kun yhdistetään aerosolien ($A=SO_2$) ja hiilidioksidin ($C=CO_2$) päästöjen skenaariot ja lasketaan niiden aiheuttama lämpötilanmuutos, saadaan **SCA2-mallin** (Kaava 5.2.3) mukaan todennäköisellä auringon säteilyn (S) määrällä (auringonpilkkuja 87) kuvan 5.4.1 mukaiset skenaariot.

Kuvasta 5.4.1 nähdään, että auringon säteilyssä keskimääräisellä tasolla lämpötilan nousu vuoteen 2040 mennessä noin 1,64 astetta kaikissa skenaarioissa. CO_2 -päästöjen ja SO_2 -päästöjen väheneminen kumoavat toistensa vaikutuksen tällä aikavälillä, jos kummatkin laskevat yhtä nopeasti. Lämpötila nousu ylittää 1,5 astetta kaikissa vaihtoehdoissa. Lämpötila nousee yli kaksi astetta vain, jos päästöt jatkuvat nykytasolla vuoteen 2070 asti.



Kuva 5.4.1 Lämpötilan nousu SCA2-malli mukaan, kun auringonpilkkuja määrä on sama kuin 11 vuoden keskiarvossa (87 kpl).

Jos auringonpilkkujen määrä on maksimissa (136), lämpötilan nousun lähtötaso on jo 1,5 astetta (Kuva 5.4.2). Kahden asteen raja-arvo ylittyy vuonna 2070, jos päästöjä vähennetään Miinus 25 %- skenaarion mukaisesti. Jos päästöjä vähennetään 50 %-skenaarion mukaisesti kahden asteen raja ei ylitä. Lämpötilan nousu on maksimissaan 1,9 astetta vuonna 2051.



Kuva 5.4.1 Lämpötilan nousu SCA2-mallin mukaan (kaava 5.2.3), kun auringonpilkkuja on 11 vuoden keskiarvoista laskettu maksimimäärä (136).

Miinus 50 %- skenaario tarkoittaa, että CO₂-päästöjä pitää vähentää nykyisestä 36,9 GtCO₂ arvoon 18 Gt vuoteen 2050 mennessä. Jos väkiluku on silloin 9,7 miljardia, jolloin päästöt ovat 1,9 tCO₂/asukas (Taulu 5.4.1). Asukasta kohti laskettu ominaispäästö laskee vastaavasti 60 %.

Taulu 5.4.1 CO₂-päästöjen vähentämistavoitteet.

CO ₂ -päästöjen vähennys Miinus 50 % tavoitteen mukaan		2019	2030	2040	2050
Hiilidioksidi	Gt/a	36	31	27	18
Vähennys	%	0%	-13%	-26%	-50%
Väestömäärä	mrd	7.7	8.5	9.2	9.7
Ominaispäästö	t/asukas	4.7	3.7	2.9	1.9
Vähennys	%	0%	-22%	-38%	-60%

Yhteenveto

Kehitetty **SCA2 -malli** (S= Sunspots, Auringonpilkut, C= CO₂-pitoisuus, A = Aerosolit, SO₂-päästöt) ilmaston lämpenemisen ennustamiselle on pystynyt laskemaan ilmaston lämpenemisen viimeiset 40 vuotta keskihajonnalla 0,050 astetta. Malli on tarkempi ennustamaan lämpötilanmuutosta kuin IPCC:n käyttämä **CMIP6**-malli.

SCA2-mallin mukaan:

Jos auringonpilkkujen määrä on maksimissaan, ilmaston lämpeneminen jää kahden asteen alapuolelle, jos CO₂-päästäjä ja SO₂-päästöjä vähennetään nykytasolta (36 GtCO₂) 50 % vuoteen 2050 mennessä.

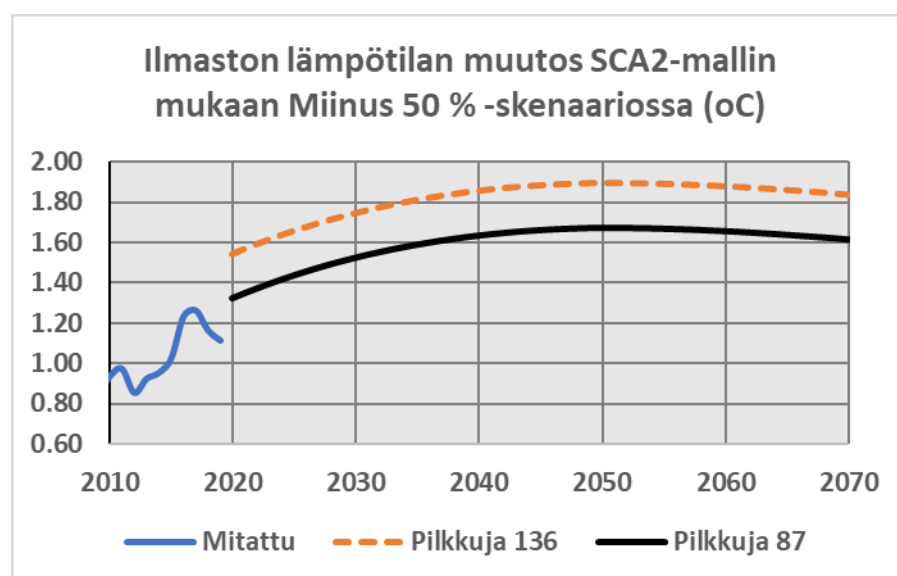
Seuraavat 10 vuotta ovat ratkaisevat ilmaston lämpenemisen kannalta. Sen vuoksi tavoitteet tulee asettaa vuodelle 2030. Silloin mailman CO₂-päästöt saavat olla korkeintaan 31 GtCO₂ eli 16 % pienemmät kuin tänään.

Jokaisen maan tulisi päästä vuonna 2050 tasolle 2,0 tCO₂/asukas. Silloin maailmassa on noin 9,7 miljardia ihmistä ja päästöjen tulee olla alle 19 miljardia tonnia hiilidioksidia.

6. TAVOITEOHJELMA MAAILMALLE

6.1 Tavoitteet

Luvussa 5 laskettiin tavoiteskenaario (Miinus 50 %), jossa hiilidioksidi (CO₂) ja rikkidioksidi (SO₂) päästöjä lasketaan 50 % vuoteen 2050 mennessä. Lämpötilan nousu jää silloin SCA2-mallin mukaan laskettuna alle kahden asteen, vaikka auringonpilkkujen määrä on maksimissa (136 kpl/vuosi) (Kuva 6.1.1). Lämpötilan nousu on maksimiarvossa + 1,9 °C vuonna 2050 vuosiin 1901–1930 verrattuna.

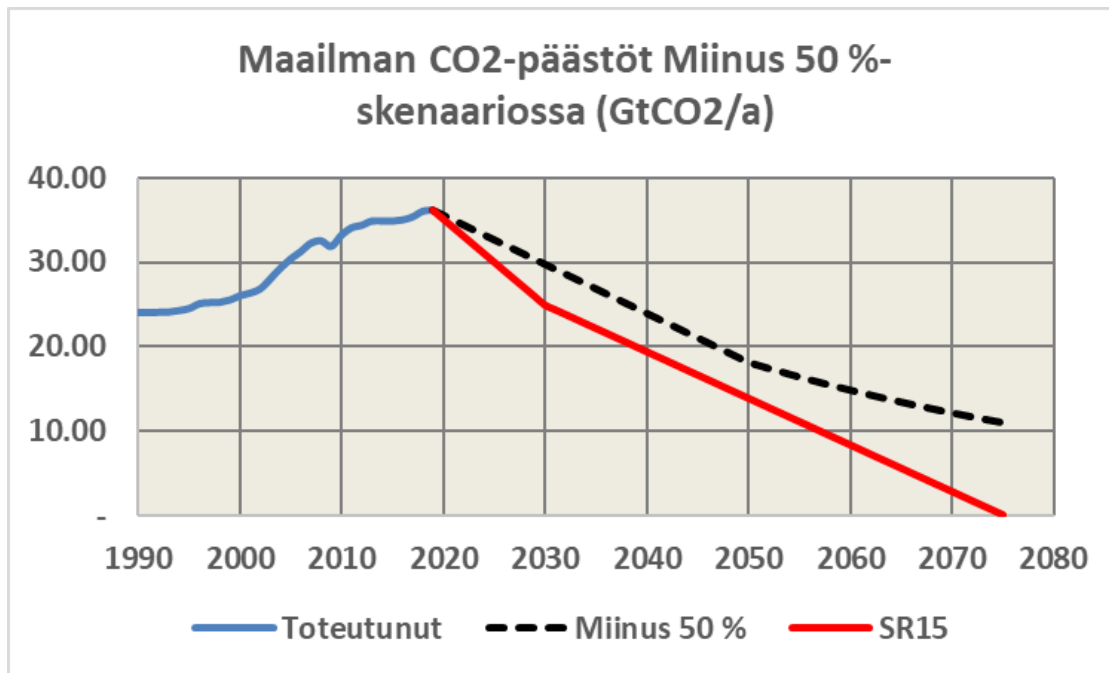


Kuva 6.1.1 Lämpötilan nousu, kun CO₂- ja SO₂-päästöjä vähennetään 50 % vuoteen 2050 mennessä.

Hiilidioksidipäästöjä vähennetään 50 % vuoteen 2050 mennessä, jolloin vuonna 2050 päästöt olisivat noin 18 gigatonnia vuodessa (Kuva 6.1.2). Jos asukkaita on silloin noin 9,7 miljoonaa, päästöt olisivat noin 1,9 tonnia per asukas. Vuoteen 2030 päästöjen tulee olla korkeintaan 31 GtCO₂/a eli noin 5 GtCO₂/a (14 %) vähemmän kuin vuonna 2019.

Kuvasta näkyy myös IPCC:n SR15-raportin mukaan kahden asteen lämpötilan nousun skenaario. Sen mukaan kahden asteen lämpötilan nousu voidaan estää, jos päästöjä leikataan 2010 tasolta 25 % vuoteen 2050 mennessä ja 100 % vuoteen 2075 mennessä.

SR15-raportin mukaan tarvittava 25 % vähennys tarkoittaa, että vuonna 2030 CO₂-päästöjen tulisi olla 25 Gt/a. Se on 11 Gt/a vähemmän kuin vuonna 2019. IPCC:n mukaan päästöjä tulisi vähentää vuoden 2019 tasolta 1 gigatonnia joka vuosi eli 31 % (3,5 %/a). Se tuskin on mahdollista, koska suurin päästäjä, Kiina, ei halua vähentää siihen mennessä päästöjä lainkaan.



Kuva 6.1.2 Hiilidioksidipäästöjen kehitys Miinus 50 % -skenaarion mukaisesti.

Rikkidioksidipäästäjä vähennetään myös 50 % vuoteen 2050 mennessä, jolloin päästöt olisivat noin 50 miljoonaa tonnia vuonna 2050. CO₂-päästöt ja rikkipäästöt kulkevat samaan tahtiin osin sen vuoksi, koska rikkidioksidi on peräisin lähinnä hiilestä ja raskaasta polttoöljystä. Molempien polttoaineiden rikkipäästöjä voidaan hillitä rakentamalla rikinpoistolaitoksia voimalaitoksiin ja laivoihin. Raskaan polttoöljyn rikkipäästöjä aiotaan pienentää myös kieltämällä runsasrikkisen öljyn käyttö laivoissa. Vaikuttaa siltä, että tämän vuoksi rikkipäästöt vähenevät tulevaisuudessa jopa nopeammin kuin hiilidioksidipäästöt. Se merkitsisi nopeampaa lämpötilan nousua, mitä tässä on aiemmin ennustettu.

6.2 Sähköntuotanto

Maailman sähköntuotanto on kasvanut vuoden 2010 arvosta 21.600 TWh arvoon 27.000 TWh (25 %) vuoteen 2019 mennessä (Taulu 6.2.1). Uusiutuvat lähteet ovat kattaneet 187 TWh/a vuosikasvusta 100 TWh/a eli noin 53 %. Maakaasun osuus 187 TWh:n kasvusta on ollut 49 TWh/a (26 %) ja kivihiiilen osuus 41 TWh/a (24 %) vuodessa. Kasvun osalta olemme siirtyneet uusiutuvan energian aikaan jo 2010-luvulla.

Taulu 6.2.1 Maailman sähköntuotannon lähteet (TWh/a).

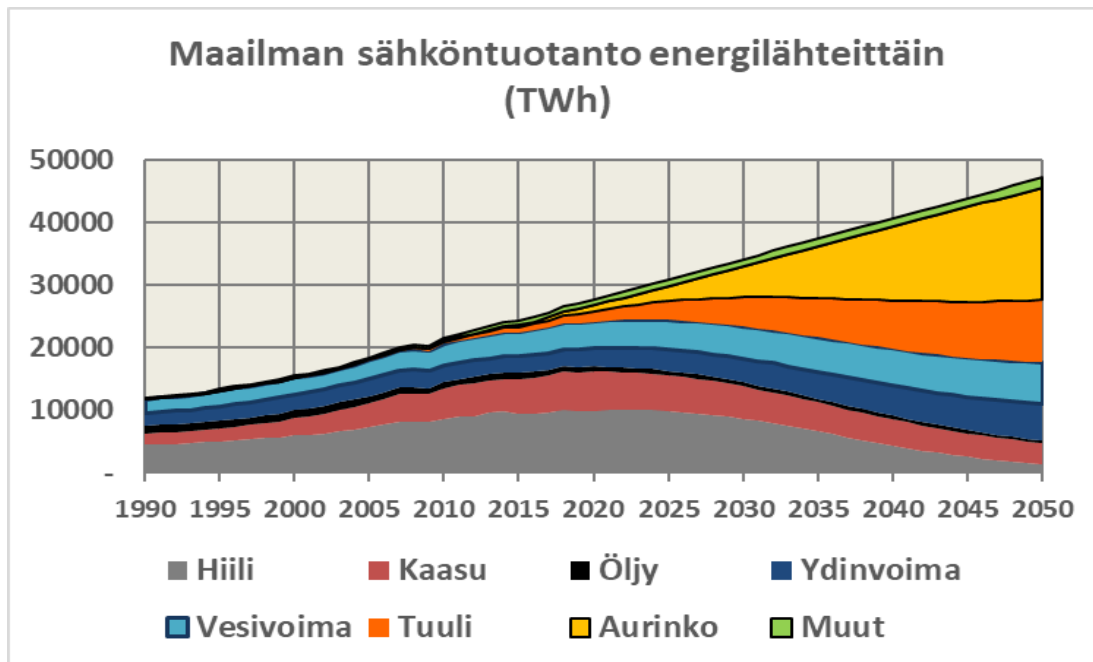
Maailman Sähköntuotanto Lähde	Tuotanto		Tuotanto			Osuudet		
	2010 TWh	2019 TWh	Muutos TWh	Muutos TWh/a	Muutos %	2010 %	2019 %	Muutos %-yks.
Hiili	8634	9824	1190	41.0	13.8%	40.0%	36.4%	-3.6%
Kaasu	4871	6298	1427	49.2	29.3%	22.6%	23.3%	0.7%
Öljy	944	825	-118	-4.1	-12.5%	4.4%	3.1%	-1.3%
Ydinvoima	2769	2796	27	0.9	1.0%	12.8%	10.4%	-2.5%
Vesivoima	3436	4222	786	27.1	22.9%	15.9%	15.6%	-0.3%
Tuuli	347	1430	1083	37.3	312.6%	1.6%	5.3%	3.7%
Aurinko	34	724	690	23.8	2047.7%	0.2%	2.7%	2.5%
Muut	536	885	349	12.0	65.1%	2.5%	3.3%	0.8%
Yhteensä	21570	27005	5435	187.4	25.2%	100.0%	100.0%	0.0%
Uusiutuvat	4352	7261	2909	100	66.8%	20.2%	26.9%	6.7%

Kasvu jatkuu edelleen tasaisena (Kuva 6.2.1 ja Taulu 6.2.2) ja vuonna 2050 sähköä tuotetaan 47.200 TWh, joten kasvua on 20.200 TWh. Kulutus asukasta kohti olisi vuonna 2050 noin 4900 kWh/asukas.

Kasvu katetaan pääasiassa tuuli- ja aurinkovoimalla, joiden osuus nousee vastaavasti 38 % ja 21 %:iin sähköntuotannosta vuonna 2050. Tuotantoa kasvattavat myös vesivoima ja ydinvoima, joiden osuudet ovat vuonna 2050 noin 14 % ja 12 % vastaavasti. Fossiilienergialla tuotetun sähkön osuus jää 11 %:iin sähköntuotannosta.

Taulu 6.2.2 Maailman sähköntuotannon muutokset 2019–2050.

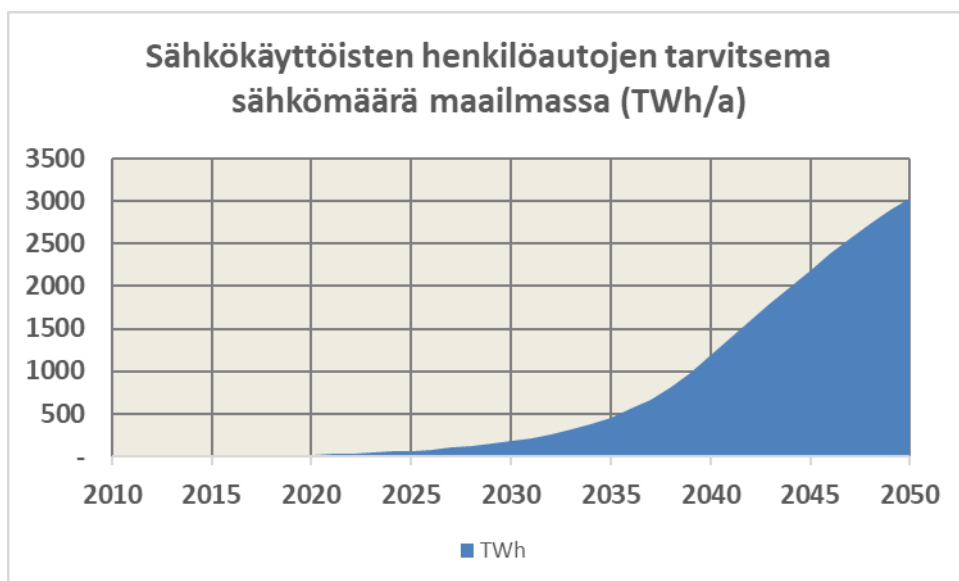
Maailma Lähde	Tuotanto		Tuotanto			Osuudet		
	2019 TWh	2050 TWh	Muutos TWh	Muutos/a TWh/a	Muutos-% %	2019 %	2050 %	Muutos %-yks.
Hiili	9824	1360	-8464	-273	-86.2%	36.4%	2.9%	-33.5%
Kaasu	6298	3435	-2862	-92	-45.5%	23.3%	7.3%	-16.0%
Öljy	825	441	-384	-12	-46.5%	3.1%	0.9%	-2.1%
Ydinvoima	2796	5759	2963	96	106.0%	10.4%	12.2%	1.9%
Vesivoima	4222	6702	2480	80	58.7%	15.6%	14.2%	-1.4%
Tuuli	1430	9913	8484	274	593.4%	5.3%	21.0%	15.7%
Aurinko	724	17991	17266	557	2384.6%	2.7%	38.2%	35.5%
Muut	885	1553	668	22	75.4%	3.3%	3.3%	0.0%
Yhteensä	27005	47155	20150	650	74.6%	100.0%	100.0%	0.0%
Uusiutuvat	7261	36159	28898	932	398.0%	26.9%	76.7%	49.8%



Kuva 6.2.1 Sähköntuotanto energilähteittäin maailmassa (TWh/a)

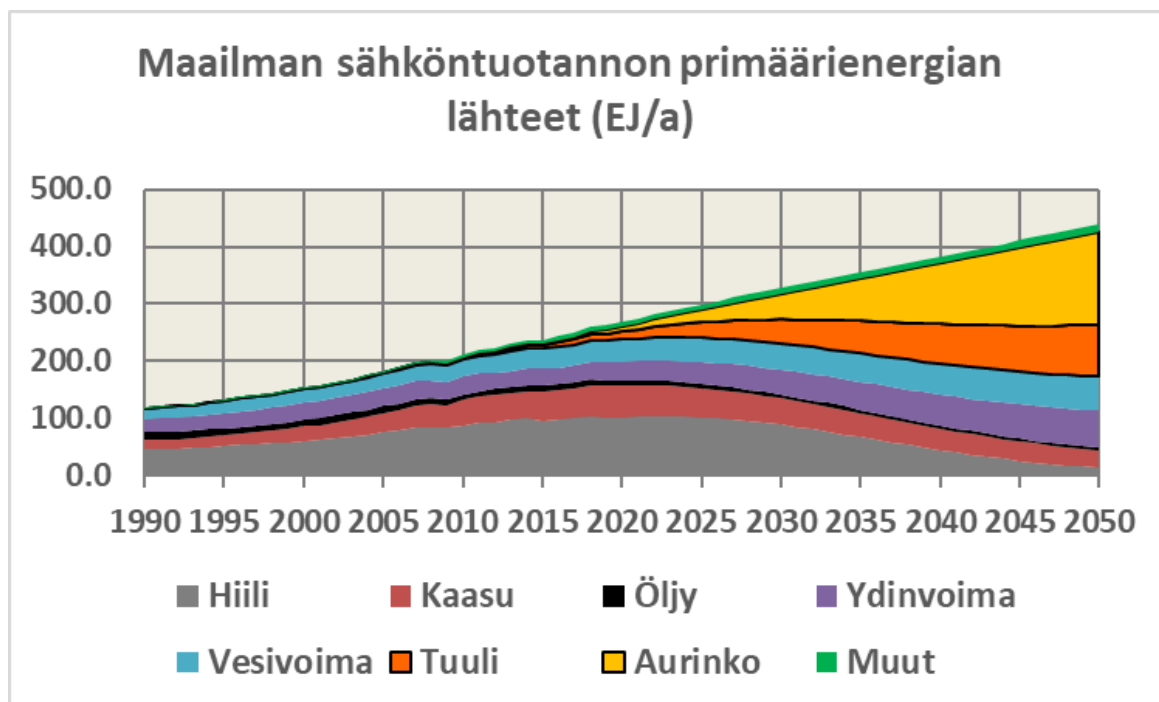
Sähköntuotannon kasvu vuosina 2020–2050 on aurinkovoimalla 560 TWh/a ja tuulivoimalla 270 TWh/a vuosittain. Verrattuna vuoden 2019 lisäykseen (140 ja 160 TWh/a) aurinkovoiman kasvu on nelinkertainen ja tuulivoiman kasvu kaksinkertainen. Ydinvoiman kasvu (96 TWh/a) tarkoittaa kymmentä uutta 1200 MW:n voimalaa vuosittain.

Sähkökäyttöisten henkilöautojen tarvitsema sähkömäärä tuo noin 10 % lisän sähkön nykyiseen kulutukseen (Kuva 6.2.2). Sähköntarve kasvaa vuoden 2035 jälkeen noin 170 TWh joka vuosi.



Kuva 6.2.2 Sähkökäyttöisten henkilöautojen tarvitsema sähkömäärä maailmassa (TWh/a).

Sähköntuotannon energialähteet kasvavat sähkönkulutuksen mukana ja saavuttavat 440 eksajoulea (EJ) vuonna 2050 (Kuva 6.2.3). Vesi-, tuuli- ja aurinkovoiman hyötysuhteeksi on oletettu 40 % kuten British Petroleumin (BP Energy Statistics) tilastoissa, jolloin on saatu vertailukelpoisiksi polttoaineisiin verrattuna. Kun esimerkiksi kivihiilestä tehdään sähköä, sähköntuotannon hyötysuhde on nykyaikaisissakin voimalaitoksissa noin 40 %.

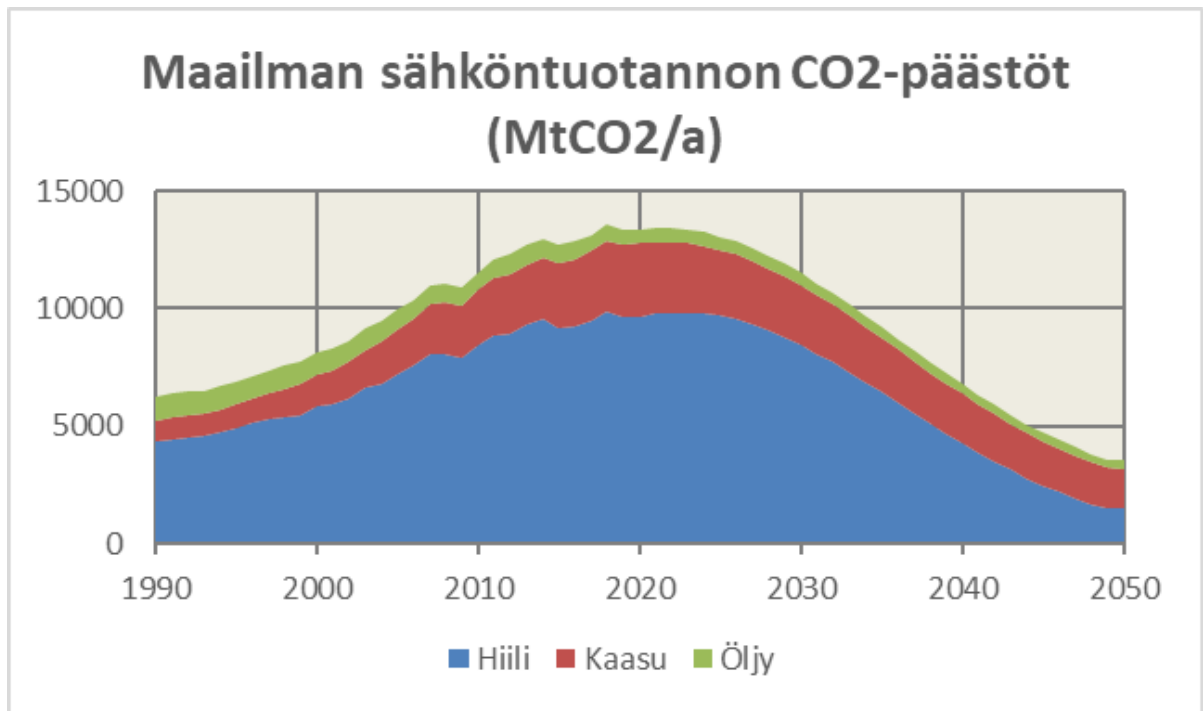


Kuva 6.2.3 Sähköntuotannon tarvitsemat primäärienergalähteet (EJ/a).

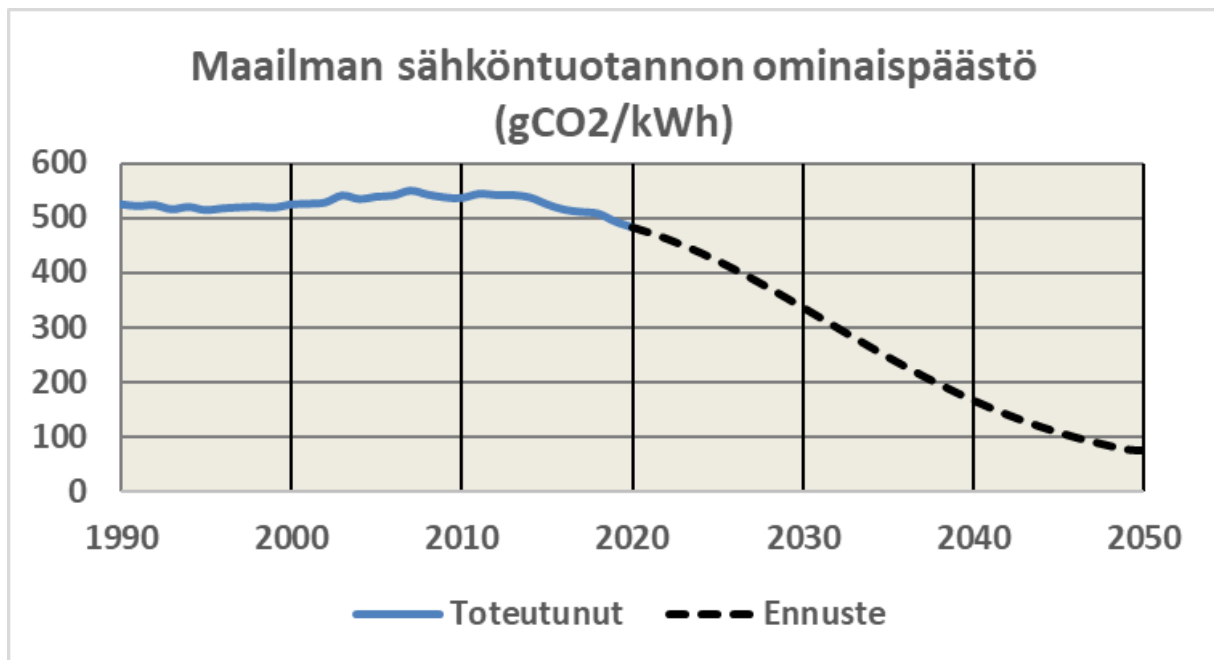
Sähköntuotannon CO₂-päästöt saavuttivat huppunsa vuonna 2018, jolloin ne olivat 13,5 gigatonnia vuodessa. Maailman polttoaineiden kokonaispäästöt olivat silloin 34 Gt/a, jolloin sähköntuotanto aiheutti noin 40 % polttoaineiden CO₂-päästöistä.

Vuonna 2050 sähköntuotannon CO₂-päästöt ovat noin 3,1 Gt/a eli 75 % pienemmät kuin vuonna 2018 (Kuva 6.2.4). Maakaasun aiheuttamat CO₂-päästöt ovat silloin noin 1,7 Gt/a ja kivihiilen päästöt noin 1,3 Gt/a. Maakaasua tarvitaan vuonna 2050 varsinkin uusiutuvan sähköntuotannon nopeiden tuotannonvaiheluiden tasapainotukseen.

Sähköntuotannon hiilidioksidin ominaispäästöt olivat 490 gCO₂/kWh vuonna 2019 ja ne laskevat arvoon 80 gCO₂/kWh vuonna 2050 (Kuva 6.2.5).



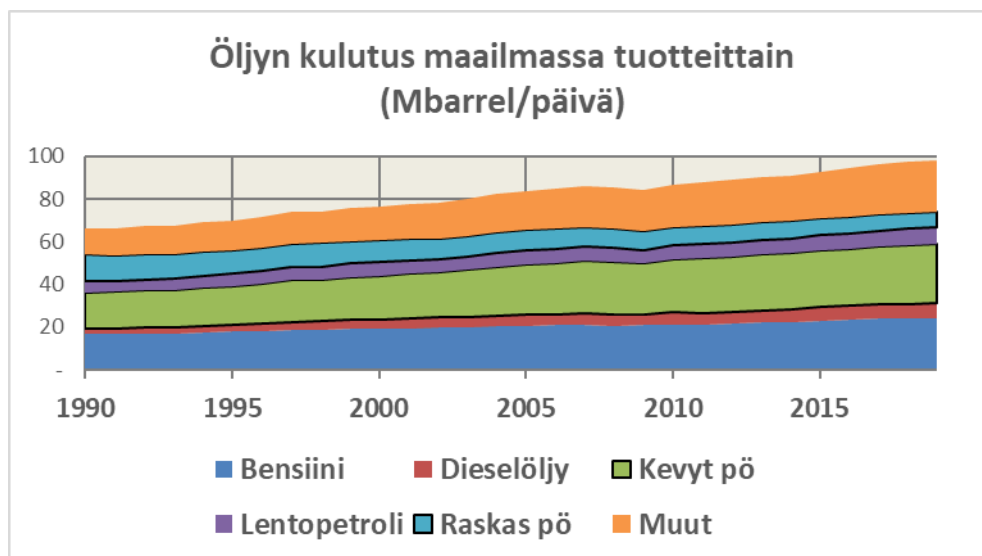
Kuva 6.2.4 Sähköntuotannon CO₂-päästöt maailmassa (MtCO₂/a).



Kuva 6.2.5 Sähköntuotannon ominaispäästöt maailmassa. (gCO₂/kWh)

6.3 Öljynkulutus

Öljynkulutus tuotteittain on kohonnut vuoden 1990 arvosta 66 miljoonaa tynnyriä päivässä arvoon 98 miljoonaa tynnyriä päivässä vuonna 2019 (Kuva 6.3.1). Kasvu on ollut tasaista 30 vuotta eli noin plus miljoona tynnyriä joka vuosi. Ainoastaan finanssikriisi vuonna 2009 aiheutti pienen notkahduksen öljynkulutuksessa.

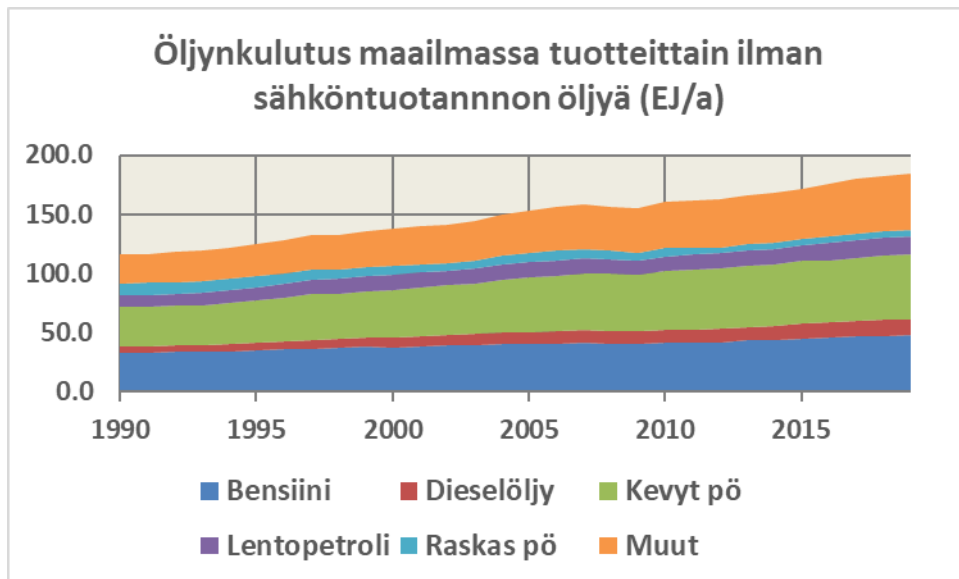


Kuva 6.3.1 Öljyn kulutus tuotteittain (miljoona barrelia/päivä).

Kun barrelit muutetaan eksajouleiksi ja raskaan polttoöljyn osuudesta vähennetään sähkön tuotantoon käytetty öljy, saadaan öljyn muulle kuin sähkön käytölle kuvan 6.3.2 mukainen kehitys. Kulutuksen kasvu on ollut vuoden 2010 jälkeen keskimääriin 2,4 eksajoulea vuodessa. Eniten ovat kasvaneet muut tuotteet (0,85 EJ/a) (Taulu 6.3.1). Toiseksi eniten on kasvanut benssiinin kulutus (0,64 EJ/a). Kevyen ja raskaan polttoöljyjen osuudet ovat pienentyneet.

Taulu 6.3.1 Öljytuotteiden kulutuksen kasvu 2010-luvulla (EJ/a).

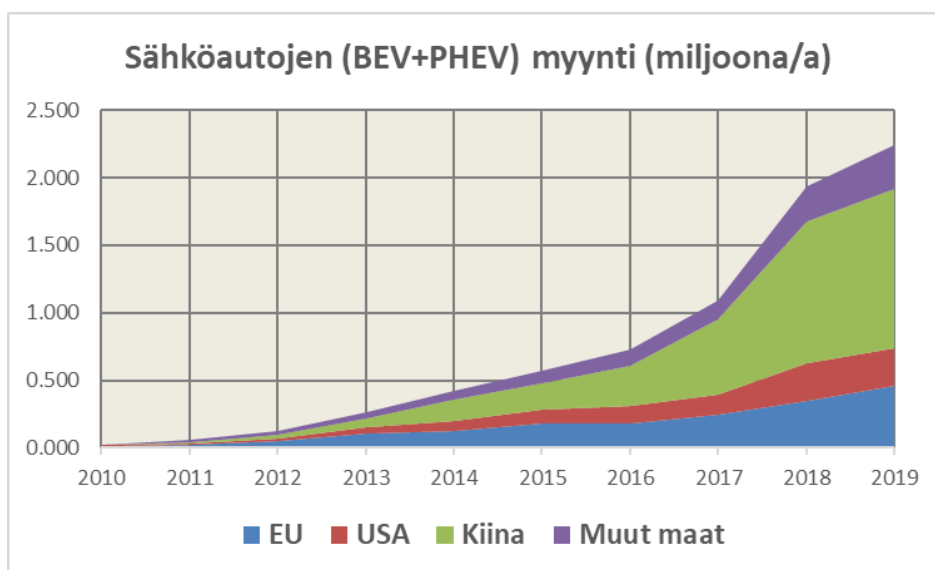
Öljynkulutus Tuote	Energiaäärä		Energiaäärä			Osuus		
	2010 EJ	2019 EJ	Kasvu EJ	Kasvu EJ/a	Kasvu %	2010 %	2019 %	Muutos %-yks.
Benssiini	41.41	47.78	6.36	0.64	15.4%	25.7%	25.9%	0.2%
Dieselöljy	11.31	13.31	2.00	0.20	17.6%	7.0%	7.2%	0.2%
Kevyt polttoöljy	49.28	54.91	5.63	0.56	11.4%	30.6%	29.8%	-0.9%
Lentopetroli	12.51	15.67	3.17	0.32	25.3%	7.8%	8.5%	0.7%
Raskas polttoöljy	7.27	5.25	-2.03	-0.20	-27.9%	4.5%	2.8%	-1.7%
Muut	39.10	47.62	8.51	0.85	21.8%	24.3%	25.8%	1.5%
Yhteensä	160.89	184.53	23.65	2.36	14.7%	100.0%	100.0%	



Kuva 6.3.2 Öljynkulutus tuotteittain ilman sähköntuotannon öljyä (EJ/a).

Sähköautojen myynti

Tulevaisuuden öljyn kulutukseen vaikuttaa voimakkaasti sähköautojen tulo markkinoille. Sähköautoja on kahdenlaisia: täyssähköautoja (BEV= Battery Electric Vehicles) ja ladattavia hybridejä (PHEV= Plug in Hybrid Electric Vehicles). Sähköautojen myynti on kasvanut kymmenessä vuodessa 2,1 miljoonaan autoon vuodessa (Kuva 6.3.3). Se on kuitenkin vasta 2,8 % autojen kokonaismyynnistä.



Kuva 6.3.3 Sähköautojen myyntimäärä maailmassa

Eniten sähköautoja on myyty Kiinassa, EU:ssa ja USA:ssa, mutta muualla niiden myynti on ollut vähäistä. Suurin markkinaosuus sähköautoilla on Norjassa, jossa niitä rekisteröitiin vuonna 2019 uusista autoista jo 55 %. Suomikin nousi kuuden edistyneimmän maan joukkoon (6,9 %), mutta on vielä Ruotsin jäljessä (Taulu 6.3.2).

Taulu 6.3.2 Sähköautojen markkinaosuuksia uusista autoista.

Maa	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Norja	6.1%	13.8%	22.4%	29.1%	39.2%	49.1%	55.9%
Islanti	0.9%	2.7%	2.9%	4.6%	14.1%	19.0%	22.6%
Hollanti	5.6%	3.9%	9.9%	6.7%	2.6%	6.5%	15.1%
Ruotsi	0.7%	1.5%	2.6%	3.5%	5.2%	8.2%	11.4%
Kalifornia	2.5%	3.2%	3.1%	3.6%	4.8%	7.8%	7.7%
Suomi	0.4%	0.6%	1.0%	1.2%	2.6%	4.7%	6.9%
EU	0.5%	0.7%	1.4%	1.4%	1.7%	2.5%	3.6%
Mediaani	1.7%	3.0%	3.0%	3.6%	4.8%	7.8%	11.4%

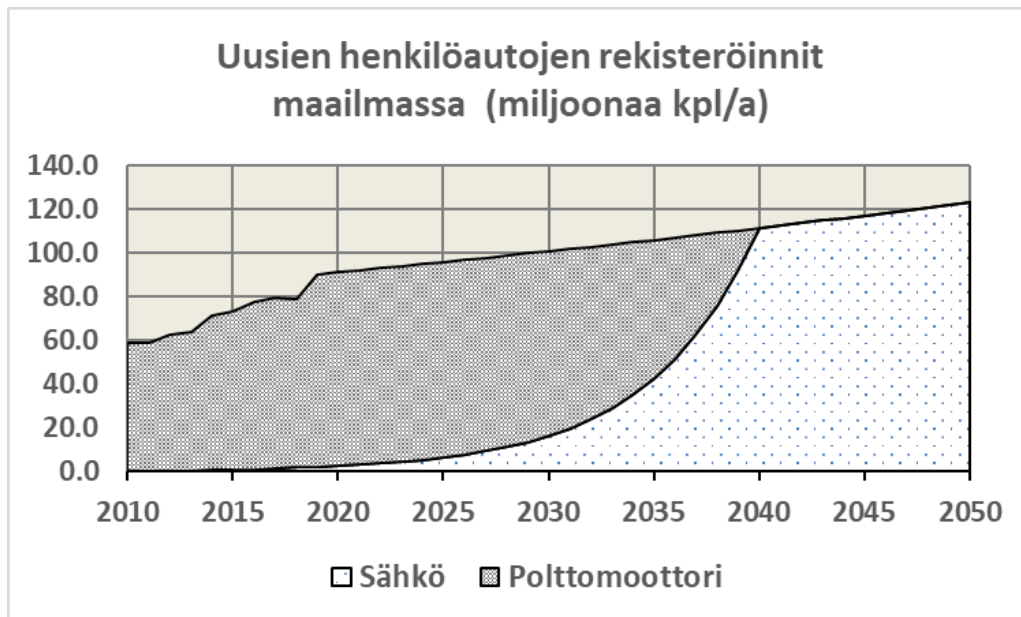
Sähköautojen markkinaosuudet muuttuvat nopeasti, kun esimerkiksi EU vaatii, että uusien autojen valmistajien keskimääräinen CO₂-päästö saa olla vuodesta 2020 alkaen enää 95 g/km, jolloin polttoainetta saa kuluja enää vain noin 4 litraa sadalla kilometrillä. Siihen ei enää päästä kuin pienillä polttomoottoriautoilla ja sähköautoilla. Näin jatkossa useimpien autojen tulee olla sähköautoja tai ladattavia hybridejä.

Maat ohjaavat myös verotuksella ihmisiä ostamaan vähäpäästöisiä autoja. Esimerkiksi Suomessa autoverojen osuus uusissa sähköautoissa lähellä nollaa. Näin uuden ladattavan hybridiauton voi saada samalla hinnalla kuin samanlaisen auton, mutta ilman latausmahdollisuutta.

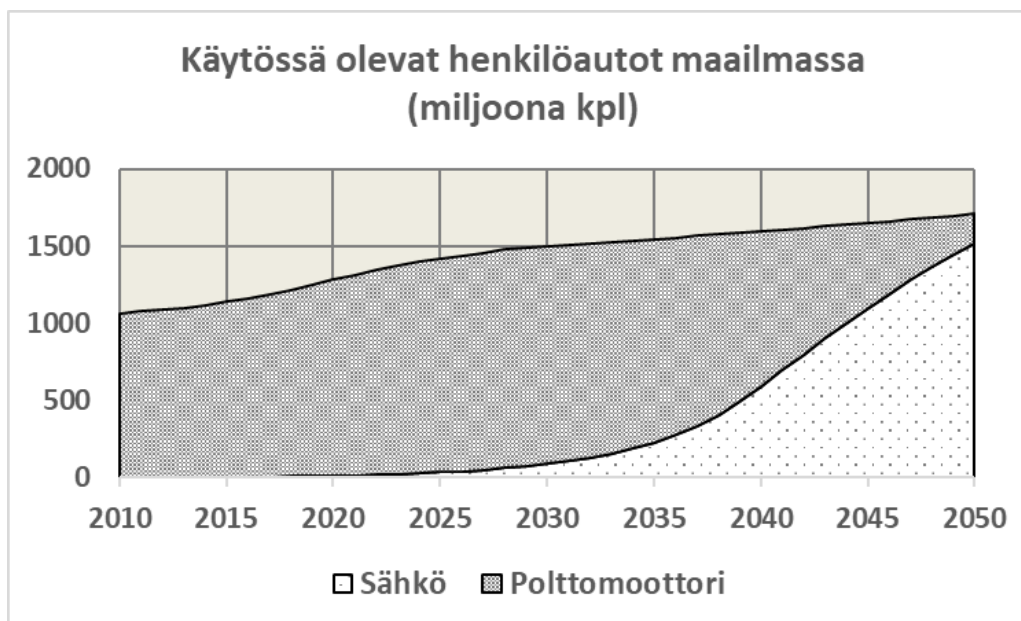
Kuvassa 6.3.4 on arvoitu henkilöautojen myyntimäärät tulevaisuudessa vuoteen 2050 asti. Kuvan mukaan markkinaosuus nousisi 50 % vuoteen 2036 mennessä. Sen jälkeen niiden osuus olisi jo 100 % vuonna 2040.

Kuvassa 6.3.5 on arvioitu rekisterissä olevien henkilöautojen määrän kehitystä vuoteen 2050 mennessä. Arvion mukaan vuonna 2050 sähköautoja olisi käytössä 1,5 miljardia kappaletta ja tavallisia polttomoottoriautoja noin 200 miljoonaa kappaletta.

Sähköautoista noin 70 % on tänään täyssähköautoja ja 30 % ladattavia hybridejä. Täyssähköautojen osuus kasvaa vähitellen 80 %:iin. Samalla sähköautojen keskimääräinen CO₂-päästö pienenee arvoon 25 gCO₂/km.

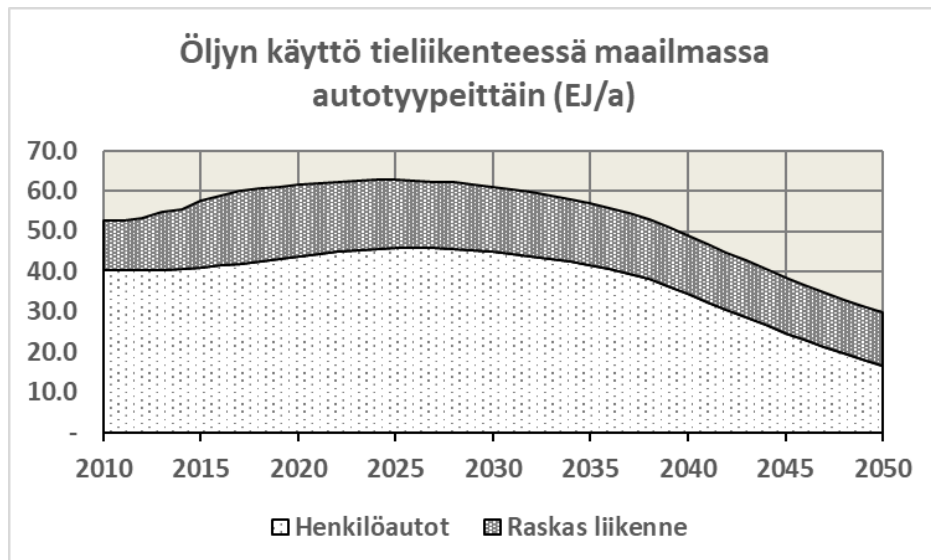


Kuva 6.3.4 Uusien henkilöautojen rekisteröinnit (miljoona kpl).



Kuva 6.3.5 Käytössä olevien henkilöautojen tyypit (miljoona kpl).

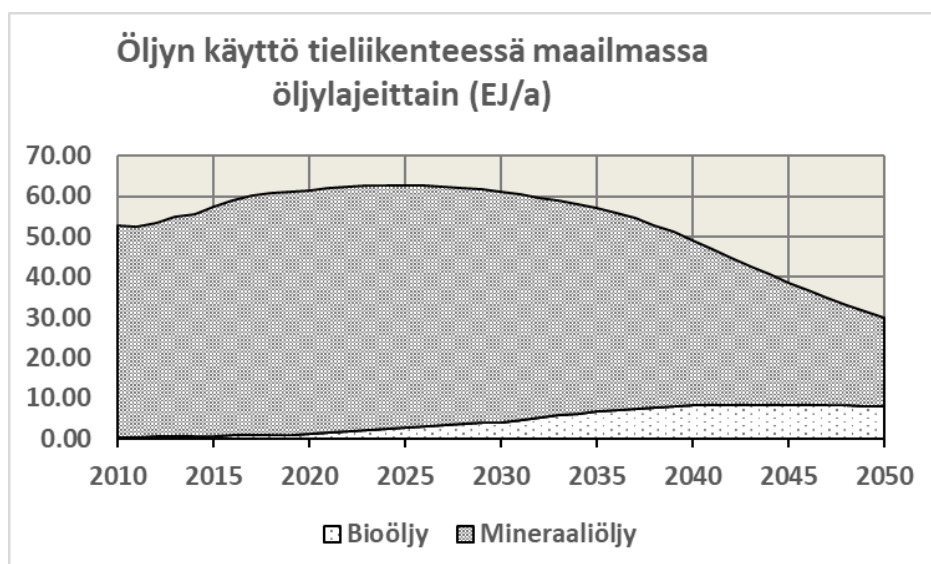
Sähköautoiluun siirtyminen tarkoittaa, että tieliikennepolttoaineiden kuluttama energiamäärä vähenee vuoteen 2050 mennessä noin 50 % (Kuva 6.3.6).



Kuva 6.3.6 Liikennepolttoaineiden käyttö autoliikenteessä (EJ/a).

Liikennepolttoaineiden käyttöön tulee myös bioöljy tai synteettinen öljy, jolla aitotaan pienentää öljyn päästöjä (Kuva 6.3.7). Bio- tai synteettisten öljyjen osuus vuoden 2050 tarpeesta on noin 28 % ja niiden tarve on 8 eksajoulea vuonna 2050.

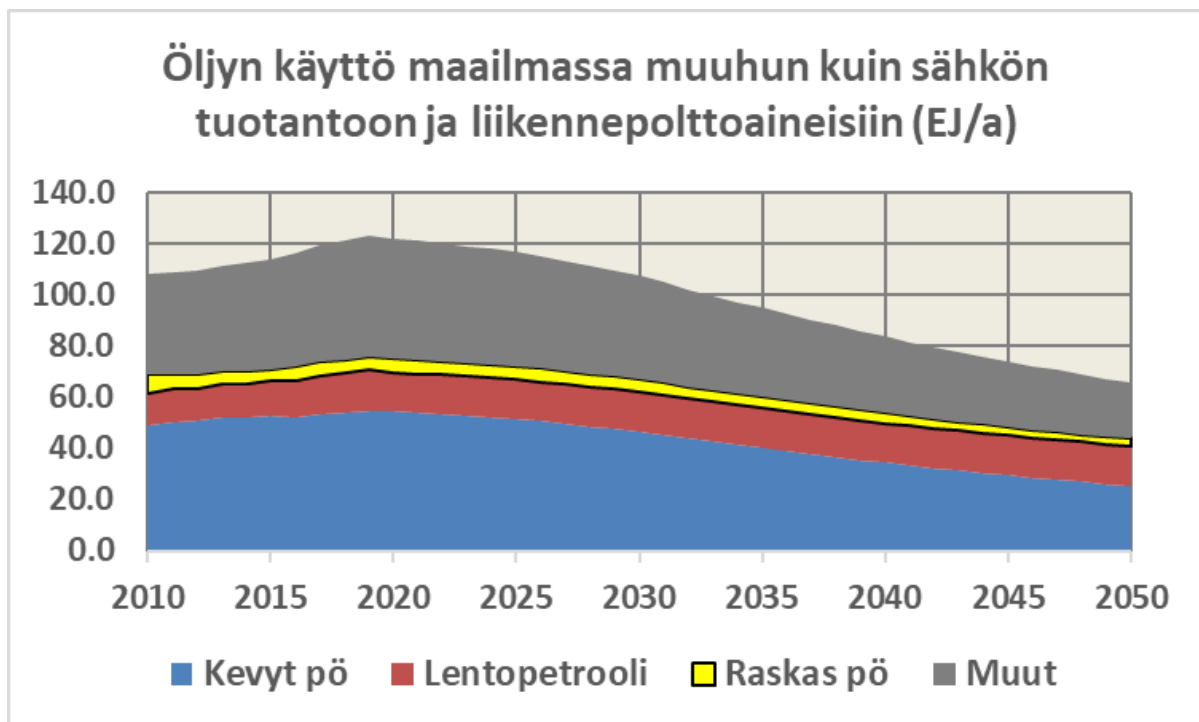
Nesteen tuottama MyDiesel käyttää jäteöljyjä ja sertifioitua palmuöljyä, jonka CO₂-päästöt ovat jopa 90 % pienemmät kuin mineraaliöljystä valmistetulla dieselillä. Jos palmuöljyn lämpöarvo on 40 MJ/kg, bioöljyä tarvitaan noin 200 miljoonaa tonnia. Jos sama määrä tuotettaisiin palmuöljynä, viljelmiä tarvitaan noin 50 miljoonaa hehtaaria. Tuo määrä voitaisiin tuottaa esimerkiksi perustamalla uusia palmuöljyviljelmiä esimerkiksi Afrikkaan.



Kuva 6.3.7 Liikennepolttoaineiden kulutus tuotteittain (EJ/a).

Muiden öljytuotteiden kuin liikennepolttoaineiden kulutus tulisi puolittua vuoteen 2050 mennessä (Kuva 6.3.8). Kevyen polttoöljyn korvaaminen sähköllä ja lämpöpumpuilla on merkittävä säästökeino. Kiinassa on yleistymässä sen lisäksi aurinkolämpöön perustuvat lämmitystavat. Siellä oli vuonna 2010 noin 20 miljoonassa asunnossa aurinkolämmön keräimet, joiden tyypillinen koko on kaksi neliometriä.

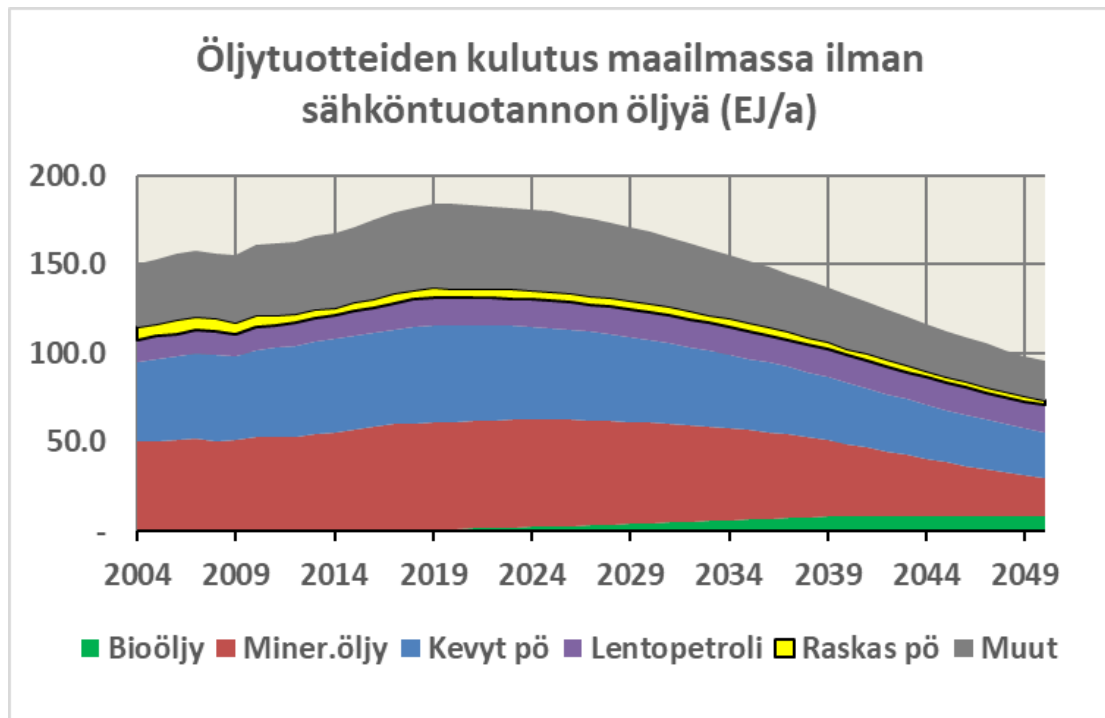
Ongelmana on mm. lentopetroli, joka korvaaminen sähköllä on melko vaikeaa. Sitä tarvitaan vuonna 2050 noin 15 eksajoulea, joka voitaisiin tuottaa synteettisillä polttoaineilla, kun sähköllä tehdään ensin vetyä, jonka avulla tehdään savukaasujen kanssa metanolia.



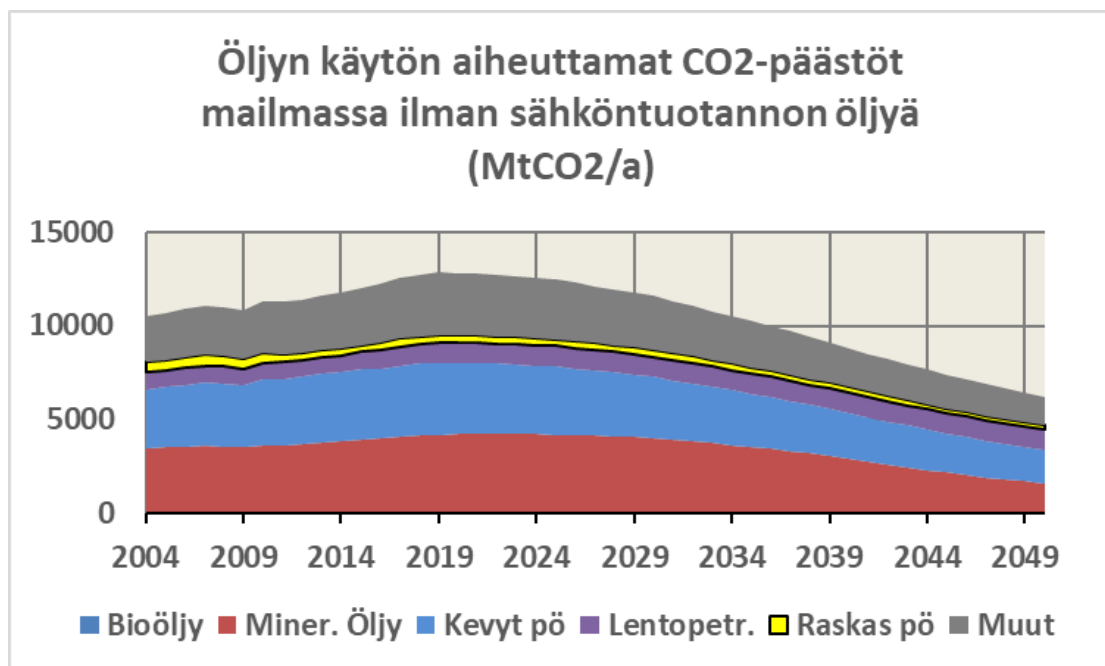
Kuva 6.3.8 Muiden kuin liikennepolttoaineiden kulutus (EJ/a).

Öljytuotteiden kulutuksen ilman sähköntuotannossa käytettyä öljyä arvioidaan laskevan nykyisestä 183 EJ/a tasolta vuoteen 2050 mennessä arvoon 95 EJ/a eli noin 49 % (Kuva 6.3.9).

Öljytuotteiden osuus kaikista CO₂-päästöistä (37 Gt) oli vuonna 2019 noin 13 Gt (35 %). CO₂-päästöt laskevat noin kuuteen gigatonniin (54 %) vuoteen 2050 mennessä (Kuva 6.3.10). Öljytuotteiden päästöt ovat vuonna 2050 noin 70 % suuremmat kuin sähköntuotannon päästöt, joiden arvioitiin kohdassa 6.2 olevan noin 3,5 GtCO₂ vuonna 2050.



Kuva 6.3.9 Öljytuotteiden primäärienergian kulutus ilman sähköntuotannon öljyä (EJ/a).



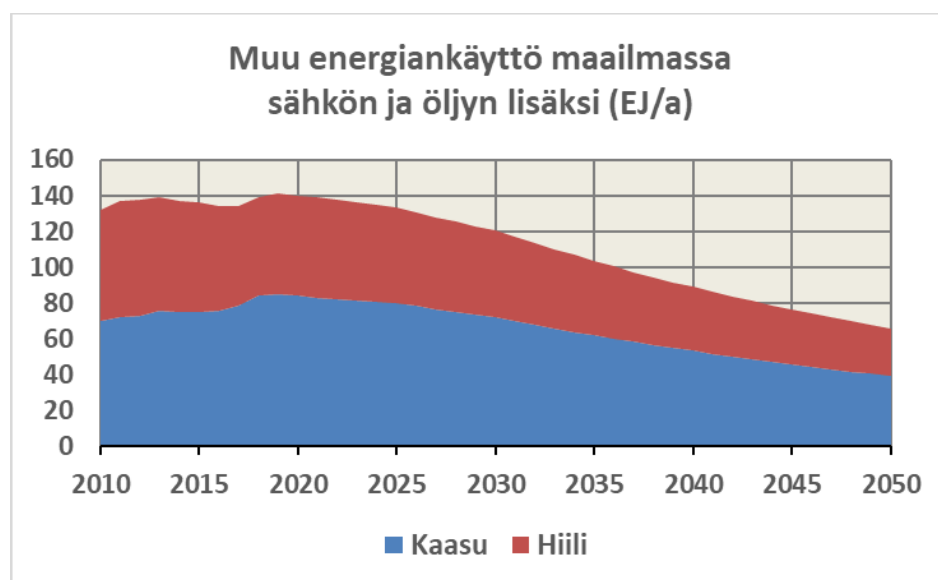
Kuva 6.3.10 Öljytuotteiden aiheuttamat CO₂-päästöt ilman sähköntuotannossa käytettyä öljyä (MtCO₂/a).

6.4 Muu energiankulutus

Sähkön tuotannon ja öljyn lisäksi energian muu käyttö on lähinnä maakaasua ja kivihiiltä. Maakaasua käytetään kotitalouksissa ruuanlaittoon ja lämmityksen sekä teollisuudessa moneen käyttöön. Maakaasun käyttöä voidaan vähentää, jos kotitaloudet siirtyvät sähkön käyttöön ruuanlaitossa sekä sähkön ja lämpöpumppujen käyttöön lämmityksessä. Erityisen suurta on kaasun käyttö Venäjän kaukolämmön tuotannossa, joka perustuu suureksi osaksi lämmityskattiloihin. Sen muuttaminen yhdistettyyn sähkön ja lämmön tuotantoon merkitsisi suuria säästöjä.

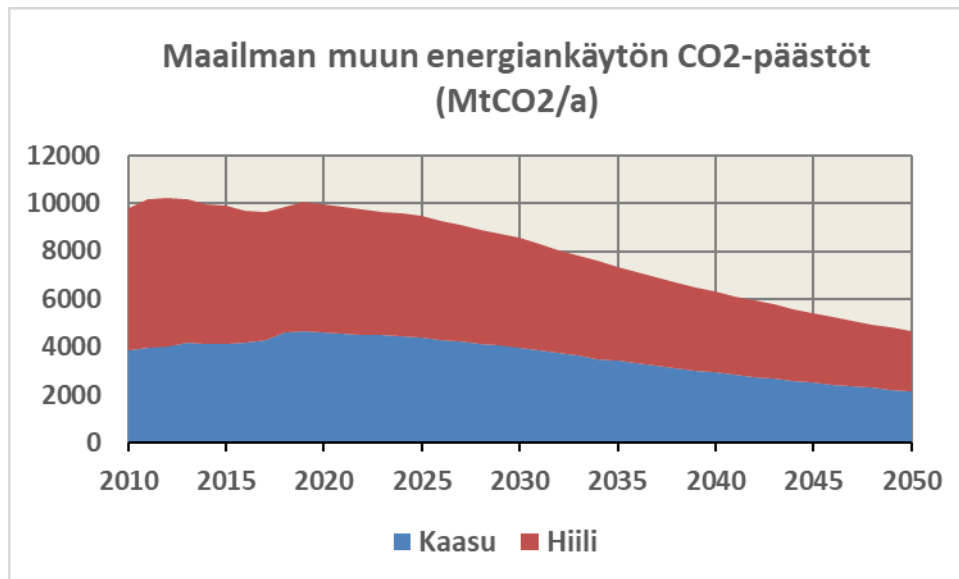
Kivihiiltä käytetään sähkön tuotannon lisäksi eniten lämmityksessä ja raudanjalostuksessa. Sen käyttöä voidaan vähentää, jos malmia aletaan pelkistää hiilen asemasta vedyllä. Vetyä voidaan puolestaan tehdä ylijäämästä sähköä elektrolyysin avulla. Ensimmäisiä vetypelkistykseen perustuvia raudanvalmistusprosesseja on jo kokeiluasteella. Hiilen käyttö lämmityksessä on hyvin yleistä Kiinassa.

Näiden keinojen avulla on mahdollista vähentää maakaasun ja kivihiilen käyttöä 54 % nykyisestä vuoteen 2050 mennessä (Kuva 6.4.1). Asiaan voidaan vaikuttaa myös, jos hiilidioksidin päästöille saadaan määrättyä verot tai päästöoikeusmaksut.



Kuva 6.4.1 Muu energiankäyttö sähkön ja öljyn lisäksi (EJ/a).

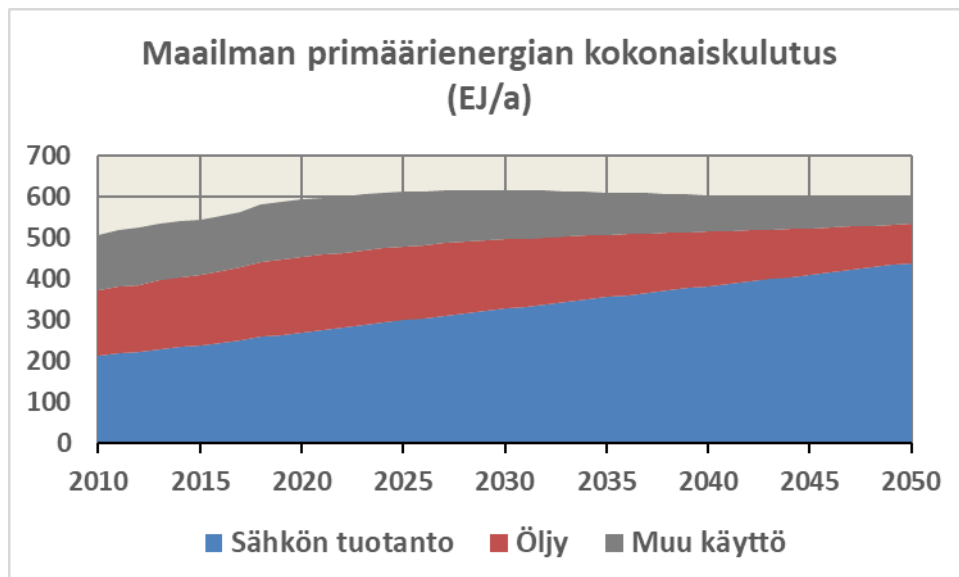
Muun energiakäytön CO₂-päästöt laskevat vastaavasti nykyisestä noin 10 gigatonnista noin 4,6 gigatonniin eli 54 % (Kuva 6.4.2). Muun energiakäytön ominaispäästö on noin 71 g/MJ, kun maakaasun ja kivihiilen ominaispäästöt ovat vastaavasti 50 ja 90 grammaa per megajoule.



Kuva 6.4.2 Muun energiankäytön CO₂-päästöt (MtCO₂/a).

6.5 Energian kokonaiskäyttö

Maailman primäärienergian kokonaiskäyttö saadaan laskemalla yhteen sähkön, öljyn ja muiden sektoreiden energiakäyttö (Kuva 6.5.1). Huomataan, että energian kokonaiskäyttö pysyisi nykyisen suuruisena (600 EJ/a) aina vuoteen 2050 asti. Sähkön osuus nousee nykyisestä 45 % noin 73 %:iin primäärienergiasta vuoteen 2050 mennessä.

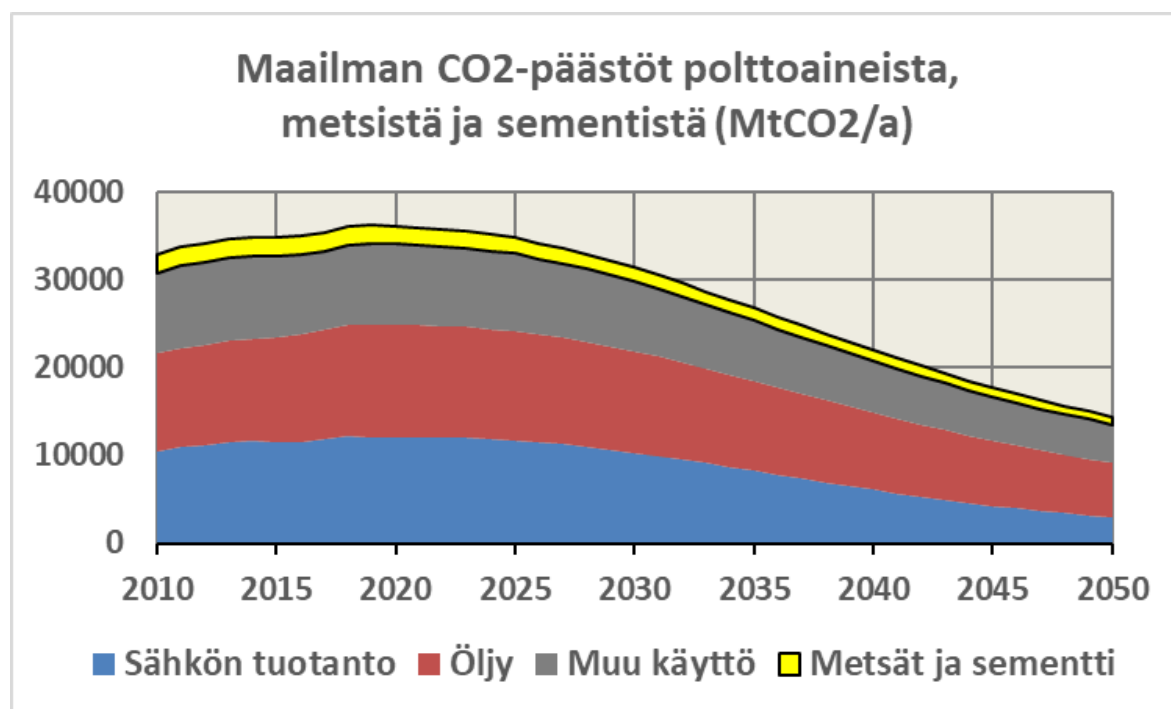


Kuva 6.5.1 Primäärienergian kokonaiskulutus (EJ/a).

Kun energiatuotannon päästöihin lisätään sementin valmistuksen ja metsien hävityksen aiheuttamat päästöt, saadaan kokonaispäästöjen kehitys tulevaisuudessa (Taulu 6.5.1 ja Kuva 6.5.2). CO₂-päästöt laskevat nykyisestä 36 gigatonnista 14,4 gigatonniin (60 %) vuoteen 2050 mennessä.

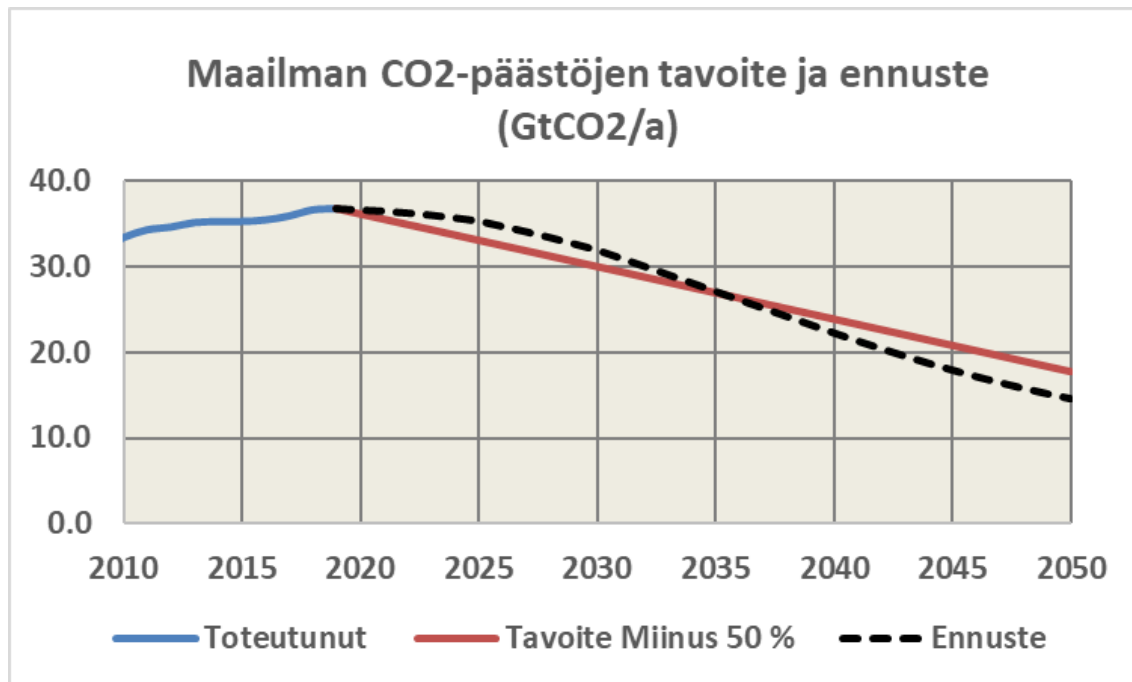
Taulu 6.5.1 CO₂-päästöjen kehityssennuste vuoteen 2050 mennessä (MtCO₂/a).

Maailma	CO ₂ -päästöt		CO ₂ -päästöt			Osuudet		
Lähde	2019 Gt	2050 Gt	Muutos Gt	Muutos Gt/a	Muutos %	2019 %	2050 %	Muutos
Sähkö	12005	3005	-9001	-290	-75.0%	33.1%	20.8%	-12.3%
Öljy	12870	6225	-6645	-214	-51.6%	35.5%	43.1%	7.7%
Muut	9351	4328	-5024	-162	-53.7%	25.8%	30.0%	4.2%
Metsät ja sementti	2064	879	-1185	-38	-57.4%	5.7%	6.1%	0.4%
Yhteensä	36290	14436	-21854	-705	-60.2%	100.0%	100.0%	



Kuva 6.6.2 Maailman CO₂-päästöjen ennuste energialähetittäin (MtCO₂/a).

Ennustettu päästökehitys vastaisi silloin melko hyvin tavoitteeksi laitettua Miinus 50 %-päästöskenaariota (Kuva 6.6.3). Päästöjen vähentäminen ei käytännössä tapahtuisi alussa tavoitteen mukaisesti, koska uusien ratkaisujen tuleminen markkinoille tapahtuu hitaammin. Esimerkiksi sähköautojen osuus käytössä olevista autoista on 50 % vasta vuosien 2040–2045 välillä.



Kuva 6.5.3 Tavoiteltu Miinus 50 % -päästöskenaario ja ennustetut päästöt (GtCO₂/a).

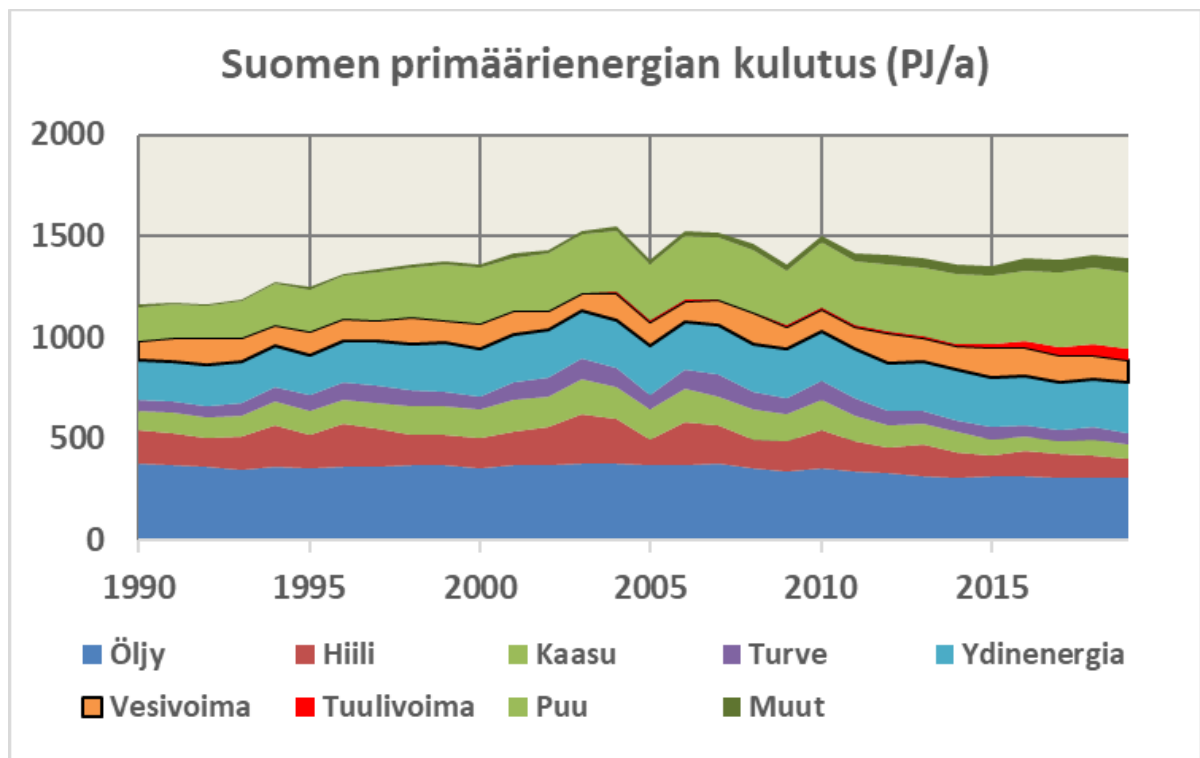
Maailmassa on siis hyvinkin mahdollista päästä lähelle Miinus 50 %- skenaarion päästötavoitteita. Se edellyttää, että

- 1) Jatkossa kivihiilellä tuotettu sähkö korvataan pääasiassa tuuli- ja aurinkovoimalla ja niitä rakennetaan sen verran, että myös autoilu ja asuntojen lämmitys voidaan muuttaa sähköiseksi.
- 2) Öljyn käyttöä vähennetään muuttamalla autoilu ja kodit sähköiseksi. Polttomoottoriautojen valmistus lopetetaan vuonna 2040. Bioöljyn käyttö nostetaan noin 30 %:iin öljynkulutuksesta.
- 3) Maakaasun ja öljyn käyttöä korvataan kodeissa muuttamalla niiden lämmitys lämpöpumpuille ja aurinkolämmitykselle.
- 4) Hiilen käyttö voimalaitoksissa lopetetaan ja sen käyttöä korvataan muuttamalla teräksen valmistus hiilestä vedyksi
- 5) Hiilinieluja lisätään vähentämällä metsien hävitystä, istuttamalla puita ja tekemällä suurin osa asuintaloista puusta.
- 6) Luomalla CO₂-päästöille hinta, jonka tulisi olla sitä korkeampi, mitä kauempana maa on Kaksi tonnia per asukas- päästötavoitteesta.

7. TAVOITEOHJELMA SUOMELLE

7.1 Nykytilanne

Energiankäyttö on Suomessa ollut huipussaan vuonna 2004, jolloin primäärienergiaa käytettiin 1550 petajoulea (PJ, 1000 PJ = 1 EJ). Tilasto on laskettu BP:n tilastojen mukaisesti, jolloin vesivoiman ja tuulivoiman hyötysuhteeksi on oletettu 40 %, kun Suomen tilastokeskuksen käyttämä hyötysuhde on 100 %. Kuvasta 7.1.1 huomataan, että energiankulutus kasvoi tasaisesti vuodesta 1990 alkaen vuoteen 2004 asti, jonka jälkeen kulutus on laskenut hieman.



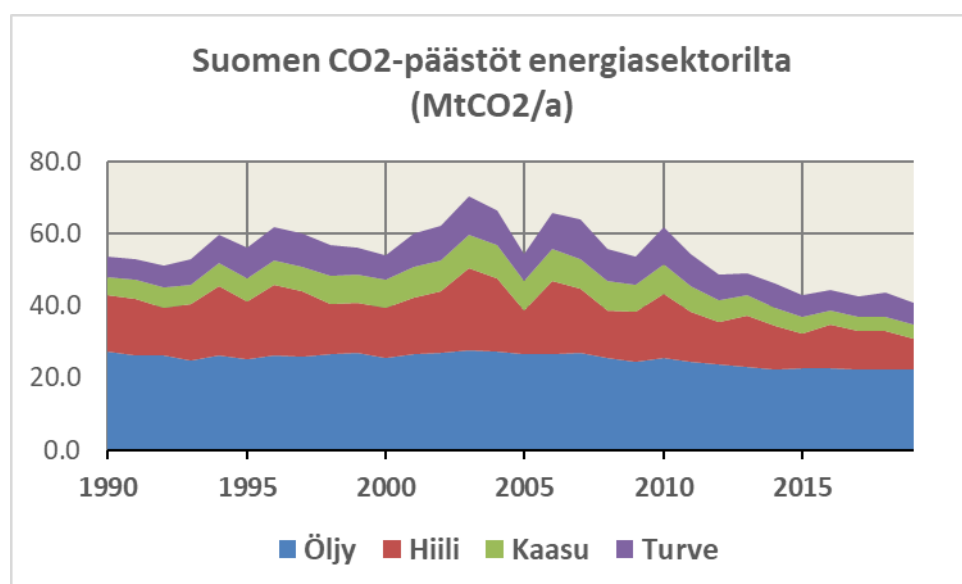
Kuva 7.1.1 Energian käyttö Suomessa 1990–2019 (PJ/a).

Vuoden 1990 jälkeen kulutus on muuttunut siten, että öljyn osuus on pudonnut 33 %:sta arvoon 22 % ja se on enää toiseksi tärkein energialähde (Taulu 7.1.1). Puun osuus on noussut vastaavana aikana 14 %:sta 27 %:iin ja siitä on tullut tärkein energialähde Suomessa. Ydinvoima on pudonnut kolmanneksi ja sen osuus on 18 %, mutta se nousee ohi öljyn, kun Olkiluoto 3-yksikkö valmistuu.

Taulu 7.1.1 Suomen energiatilastot vuosilta 1990 ja 2019 (PJ/a).

	Öljy	Hiili	Kaasu	Turve	Ydin	Vesi	Tuuli	Puu	Muut	Yhteensä
Kulutus	PJ/a	PJ/a	PJ/a	PJ/a	PJ/a	PJ/a	PJ/a	PJ/a	PJ/a	PJ/a
1990	378	167	91	53	198	97	0	167	10	1,161
2019	309	91	73	56	250	111	54	379	69	1,391
Muutos	-69	-76	-18	3	52	14	54	212	59	230
Muutos %	-18%	-45%	-20%	6%	26%	14%		127%	602%	20%
Osuudet	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1990	32.6%	14.4%	7.8%	4.6%	17.0%	8.3%	0.0%	14.4%	0.8%	100.0%
2019	22.2%	6.6%	5.2%	4.0%	18.0%	7.9%	3.9%	27.3%	4.9%	100.0%
Muutos	-10.4%	-7.8%	-2.6%	-0.5%	0.9%	-0.4%	3.9%	12.9%	4.1%	

Suomi on ensimmäinen maa maailmassa, joka ryhtyi toimenpiteisiin hiilidioksidipäästöjen rajoittamiseksi ottamalla käyttöön hiilidioksidipäästöihin perustuvan energiaveron 1990-luvun alussa. Vaikka näin tapahtui, CO₂-päästöt ovat kasvaneet sen jälkeen aina vuoteen 2003 asti, jolloin CO₂-päästöt olivat 71 miljoonaa tonnia (Kuva 7.1.2). Sen jälkeen päästöt ovat pienentyneet siten, että niiden määrä oli noin 41 MtCO₂ vuonna 2019.



Kuva 7.1.2 Polttoaineiden CO₂-päästöt (MtCO₂/a).

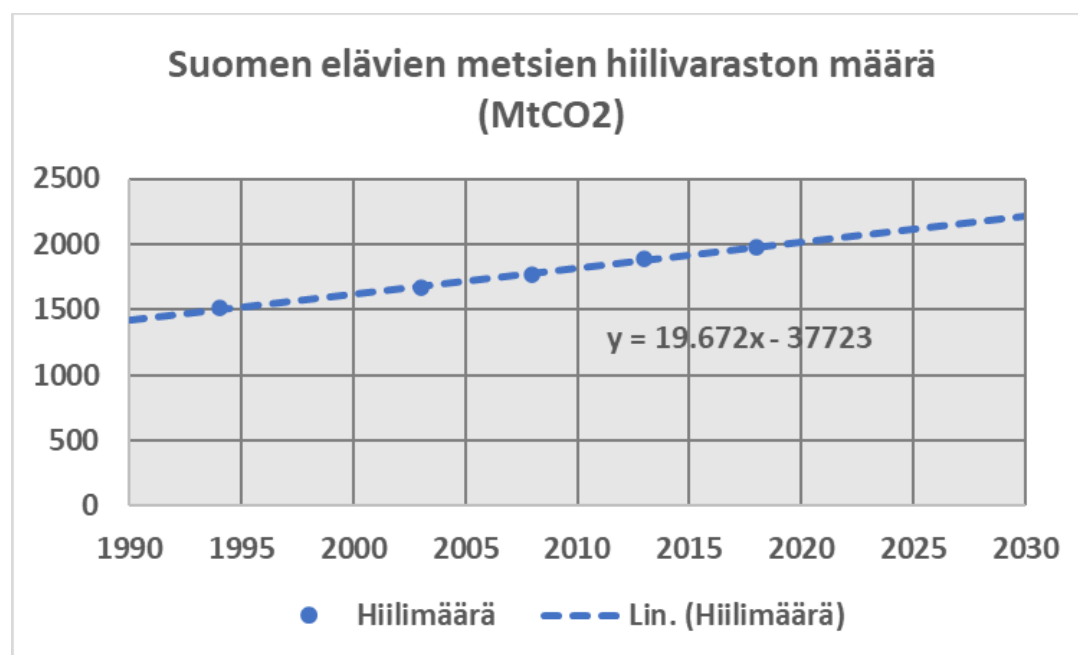
CO₂-päästöt ovat vähentyneet vuoteen 1990 verrattuna 23,9 %, joka alittaa Suomelle vuodella 2020 asetetun 20 %:n vähennystavoitteen (Taulu 7.1.2). Eniten ovat alentuneet kivihiilen ja maakaasun aiheuttamat päästöt, 45 % ja 20 % vastaavasti. Öljyn päästöt ovat vähentyneet myös 18 %, mutta öljyn osuus päästöistä on nyt 54 %, kun se oli 51 % kaikista päästöistä vuonna 1990. Myös turpeen osuus on kasvanut, mutta sen osuus on vain 15 % päästöistä. Suurin ongelma Suomessa on, miten päästä eroon öljyn CO₂-päästöistä.

Taulu 7.1.2 Hiilidioksidipäästöt polttoaineittain (Lähde: Tilastokeskus).

Vuodet	Öljy	Hiili	Kaasu	Turve	Yhteensä
Päästöt	MtCO ₂	MtCO ₂	MtCO ₂	MtCO ₂	MtCO ₂
1990	27.2	15.8	5.0	5.6	53.7
2019*	22.2	8.6	4.0	6.0	40.8
Muutos	-5.0	-7.2	-1.0	0.3	-12.8
Prosentti	-18.4%	-45.4%	-19.8%	5.7%	-23.9%
Osuudet					
1995	50.7%	29.5%	9.3%	10.5%	100.0%
2019*	54.4%	21.2%	9.8%	14.6%	100.0%
Muutos	3.7%	-8.3%	0.5%	4.1%	

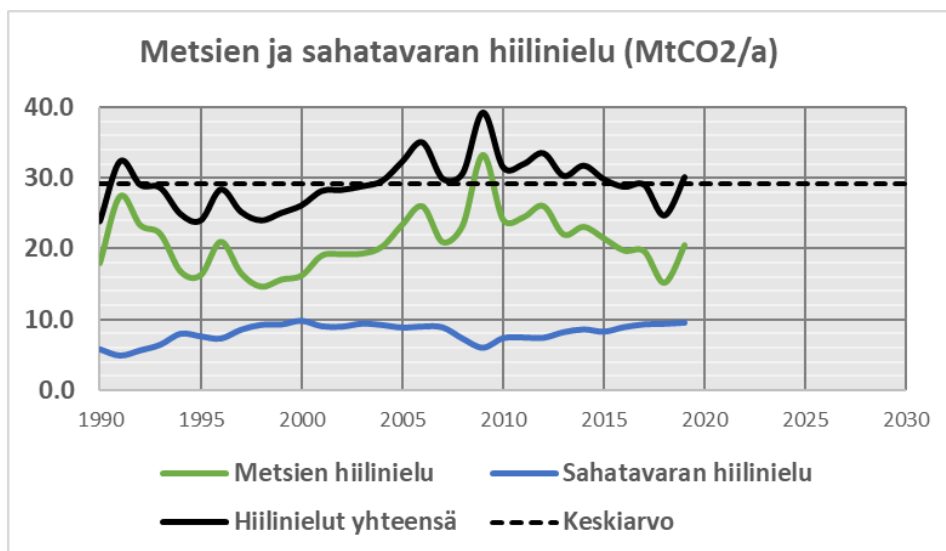
Metsien hiilinielu

Metsien hiilinielun säilyttäminen on Suomelle merkittävä asia, koska Suomi haluaa kompensoida CO₂-päästöt metsien hiilinielujen avulla. Luonnonvarakeskuksen (LUKE) tiedoista laskettuna, metsien hiilivarasto on ollut vuonna 2018 noin 2000 miljoonaa tonnia CO₂ (Kuva 7.1.3). Hiilinielu on puolestaan lineaarisen trendin kulmakerroin ja se on ollut noin 19,7 miljoonaa tonnia CO₂. Hiilivaraston kasvu 19,7 MtCO₂ on melko tarkasti 1,0 % vuodessa, kun se EU:ssa kasvanut noin 1,1 %/a.

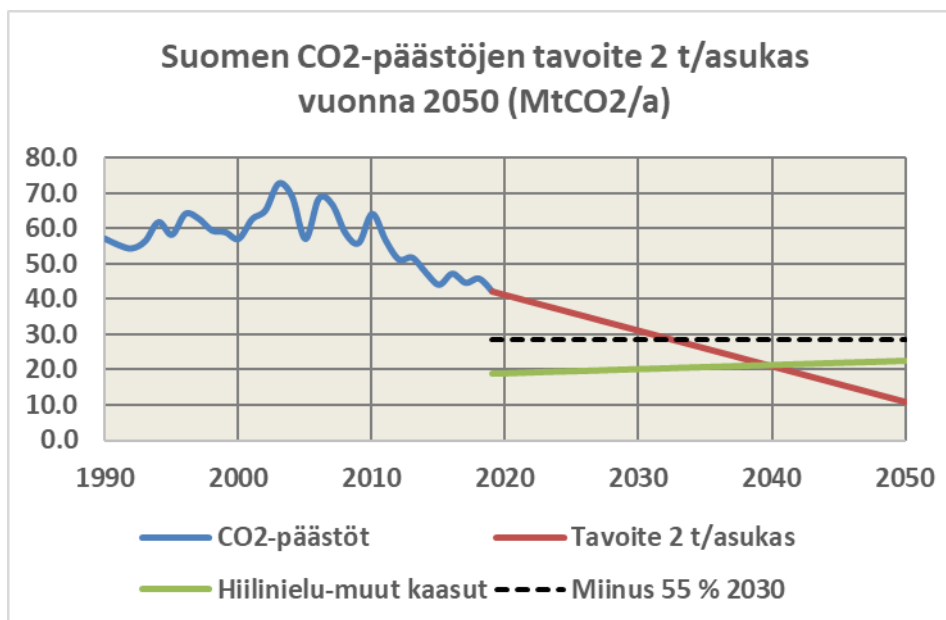


Kuva 7.1.3 Suomen metsien hiilivarasto (MtCO₂).

Metsät ja sahatavaroiden tuotanto varastoivat hiilidioksidia noin 30 miljoonaa tonnia vuodessa (Kuva 7.1.4). LUKEn mukaan vertailutaso hiilinielulle on 29,3 miljoonaa tonnia CO₂, johon tulevien vuosien kehitystä verrataan. Se vastaa kuvassa esitettyä hiilinielujen keskiarvoa vuosilta 1990–2019. Kuten kuvasta voi huomata, vuonna 2019 metsien hakkuut vähenivät ja hiilinielun lasku kääntyi nousuksi. Jos tätä muutosta ei olisi tapahtunut, hiilinielut olisivat pienenevässä.



Kuva 7.1.4 Metsien ja sahatavaran hiilinielu (MtCO₂/a).



Kuva 7.1.5 Suomen CO₂-päästöjen tavoitteet (MtCO₂/a).

Tavoitteet

Suomen tavoitteena on olla hiilineutraali vuonna 2035. Suomen tavoitteeseen lasketaan kuuluvan myös muut kasvihuonekaasut CO₂:n lisäksi. Niihin kuuluvat esimerkiksi maatalouden, soiden ja kaatopaikkojen tuottama metaani (CH₄) ja ilokaasu (N₂O).

Tässä kuitenkin lasketaan tavoite siten, että se koskisi vain hiilidioksidia. Vuoden 2050 tavoitteena oleva 2 tonnia per asukas (11 miljoonaa tonnia) savutetaan, kun päästöjä vähennetään miljoonalla tonnilla hiilidioksidia joka vuosi (Kuva 7.1.5). Samalla vähennysohjelmalla Suomi olisi myös hiilineutraali vuonna 2040, jolloin päästöt olisivat yhtä suuret kuin hiilinielut miinus muuta kasvihuonekaasut.

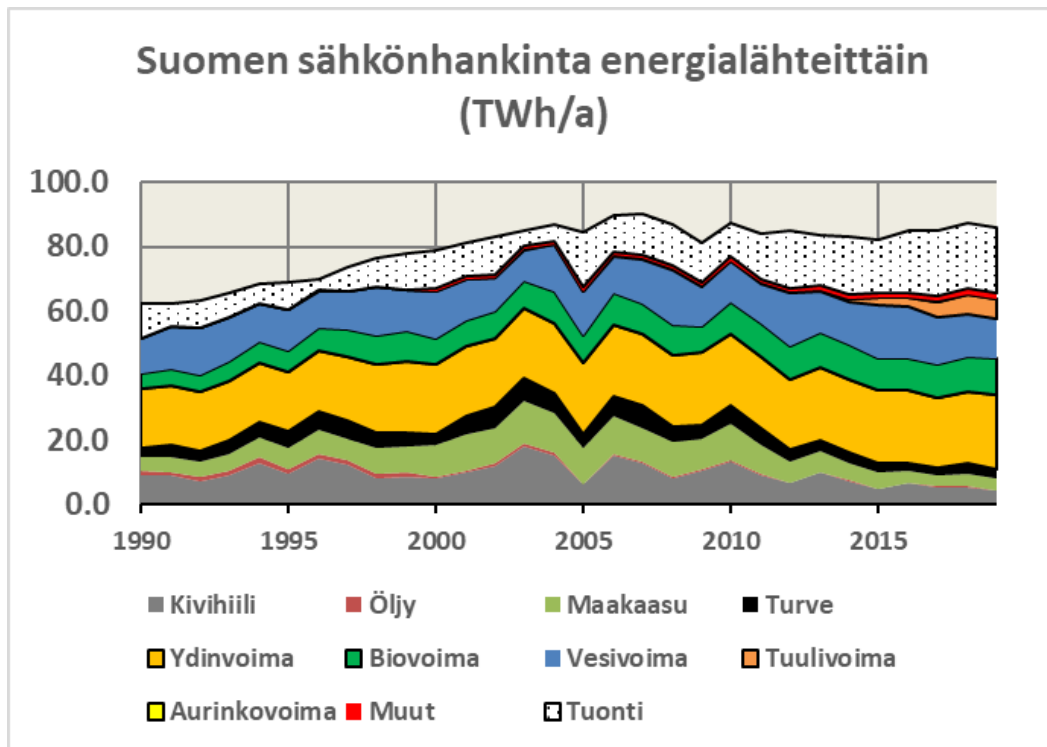
Muiden kasvihuonekaasujen metaani (CH₄), ilokaasu (N₂O), fluorivedyt (HFC) ja rikkiheksafluori (SF₆) lisäävät ekvivalenttisia CO₂-päästöjä noin 10,5 MtCO₂ verran. Kun Hiilinieluista (29,3 MtCO₂) vähennetään muiden kaasujen päästöt, saadaan vuodelle 2035 tavoitteena olevien CO₂-päästöjen arvoksi 18,8 MtCO₂. On mahdollista, että näiden muiden kaasujen päästöt laskevat myös jatkossa, jolloin tavoitteeksi vuodelle 2035 riittää, jos CO₂-päästöt alenevat arvoon 20 miljoonaa tonnia vuoteen 2035 mennessä.

EU-maiden johtajat päättivät 11. joulukuuta Brysselissä asettaa EU:n tavoitteeksi CO₂-päästöjen vähentämisen 55 % vuoden 1990 tasosta vuoteen 2030 mennessä. Kuvassa 7.1.3 tuo tavoite on merkitty mustalla katkoviivalla ja se osuu myös melko hyvin Suomen vuoden 2050 tavoitteen (Tavoite 2 t/asukas) suoralle.

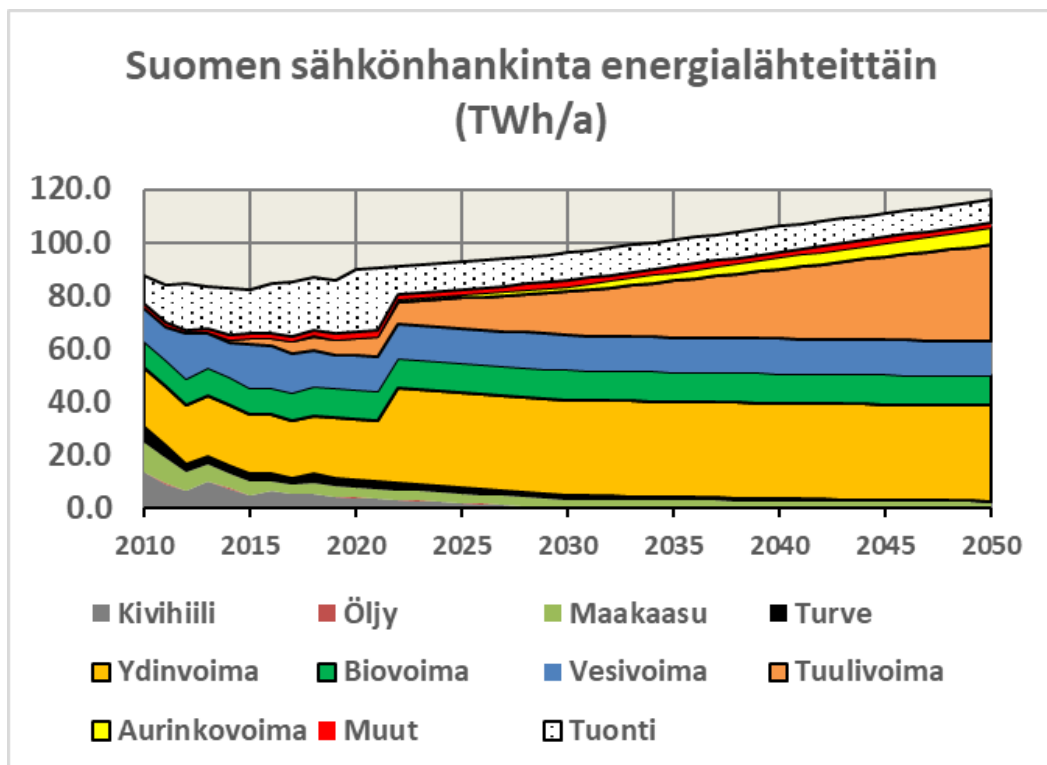
7.2 Suomen sähkönhankinta

Suomen sähkönhankinta kasvoi 1990-luvulla vielä kaksi terawattituntia (TWh) vuodessa, mutta vuoden 2005 jälkeen kulutus on pysynyt paikallaan hieman yli 80 terawattitunnissa (Kuva 7.2.1). Vuodesta 1990 vuoteen 2019 sähkönhankinta kasvoi 23,5 TWh, josta eniten kasvoivat sähkön tuonti (9,3 TWh), biovoima (6,2 TWh), tuulivoima (6,0 TWh) ja ydinvoima (4,8 TWh) (Taulu 7.2.1). Eniten vähenivät hiilivoima (4,8 TWh), öljyvoima (1,4 TWh) ja kaasuvoima (0,5 TWh) eli yhteensä 6,7 TWh.

Vuoden 2020 jälkeen kulutus kasvaa noin yhdellä terawattitunnilla vuodessa eli yhteensä noin 30 TWh ja nousee arvoon 116 TWh eli 21 MWh/asukas vuoteen 2050 mennessä. Kulutuksen kasvusta noin 6–8 TWh kuluu sähköautojen tarpeeseen. Uusiin lämpöpumppuihin kuluu myös noin 6–8 TWh sähköä ja uusiin teollisuussovellutuksiin kuluu noin 10–15 TWh.



Kuva 7.2.1 Suomen sähköntuotanto energialähteittäin.



Kuva 7.2.2 Suomen sähkönhankinta energialähteittäin 2010–2050.

Taulu 7.2.1 Sähkön tuotanto Suomessa energialähteittäin 1990–2019 (TWh).

Suomi Vuosi	Kivihiili TWh	Öljy TWh	Kaasu TWh	Turve TWh	Ydin. TWh	Biov. TWh	Vesiv. TWh	Tuuli TWh	Aurinko TWh	Muut TWh	Tuonti TWh	Kulutus TWh
1990	9.03	1.57	4.35	2.76	18.13	5.00	10.75	0.00	0.00	0.00	10.74	62.33
2019	4.24	0.22	3.89	2.86	22.93	11.19	12.29	5.99	0.18	2.03	20.04	85.84
Muutos	-4.79	-1.35	-0.46	0.10	4.80	6.18	1.53	5.99	0.18	2.03	9.30	23.51
Muutos/a	-0.15	-0.04	-0.01	0.00	0.15	0.20	0.05	0.19	0.01	0.07	0.30	0.76
Muutos%	-53%	-86%	-11%	4%	26%	124%	14%				87%	38%
Osuudet	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1990	14.5%	2.5%	7.0%	4.4%	29.1%	8.0%	17.2%	0.0%	0.0%	0.0%	17.2%	100.0%
2019	4.9%	0.3%	4.5%	3.3%	26.7%	13.0%	14.3%	7.0%	0.2%	2.4%	23.3%	100.0%
Muutos	-9.5%	-2.3%	-2.4%	-1.1%	-2.4%	5.0%	-2.9%	7.0%	0.2%	2.4%	6.1%	0.0%

Vuonna 2019 Suomessa oli noin miljoona lämpöpumppua, jotka tuottivat lämpöä noin 10,5 TWh ja kuluttivat sähköä 4,1 TWh (Taulu 7.2.2). Lämpöpumppujen määrä 2,5-kertaistuu vuoteen 2050 mennessä, jolloin niiden kuluttama sähkömäärä nousee arvoon 8–10 TWh.

Taulu 7.2.2 Lämpöpumppujen tuottama lämpömäärä ja kuluttama sähkömäärä v. 2019.

Vuosi 2019	Lukumäärä 1000 kpl	Lämpöteho MW	Sähköteho MW	Tuotettu lämpö GWh	Tuotettu kylmä GWh	Kulutettu sähkö GWh	Tuotettu jätelämpö GWh
Ilmalämpöpumppu	780	2340	780	4680	1170	2145	2535
Maalämpöpumppu	160	1600	533	4800		1600	3200
Ilma/vesilämpöpumppu	25	250	83	750		250	500
Poistoilmalämpöpumppu	35	105	35	315		105	210
Yhteensä	1000	4295	1432	10545	1170	4100	6445

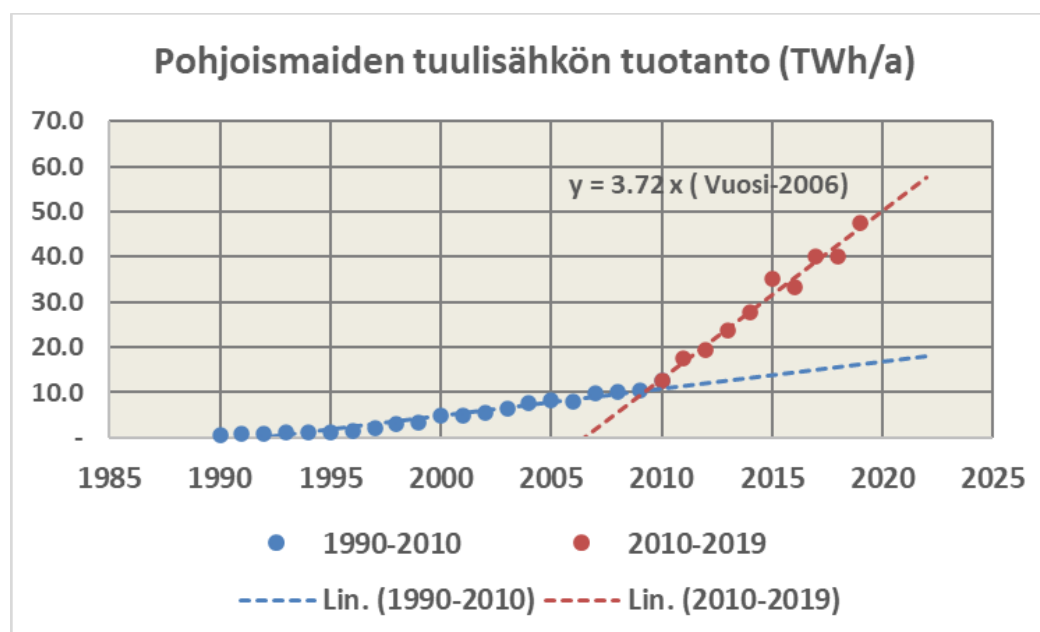
Vuonna 2050 Suomessa on noin 3,3 miljoonaa sähköautoa. Jos autoilla ajetaan keskimäärin 15.000 km vuodessa ja sähköä kuluu 0,15 kWh/km, yhden auton tarvitsema sähkömäärä on 2250 kWh. Kaikki 3,3 miljoonaa autoa tarvitsevat sähköä yhteensä noin 7–8 TWh vuodessa.

Tuotannon lisäyksestä kattaa Olkiluoto 3 -ydinvoimalayksikkö 13 TWh, uudet tuulivoimalat 30 TWh ja aurinkovoima 6 TWh (Taulu 7.2.3 ja Kuva 7.2.2). Sähkön tuotanto fossiililla polttoaineilla ja turpeella vähenee 8 TWh ja tuonti vähenee 12 TWh, kun Olkiluoto 3. yksikkö valmistuu. Sähköautojen (8 TWh) ja lämpöpumppujen (8 TWh) tarvitsema sähkö voidaan kattaa pelkästään uusien tuulivoimalaitosten avulla. Sähkön tuonti puolestaan voidaan lopettaa, kun Olkiluodon 3-yksikkö valmistuu. Ongelmaksi muodostuu miten nyt toiminnassa olevat Loviisan ja Olkiluodon ydinvoimalat korvataan, koska niiden käyttö loppuu todennäköisesti vuoteen 2050 mennessä.

Taulu 7.2.3 Sähkönhankinta Suomessa energialähteittäin 2019–2050 (TWh).

Suomi Vuosi	Kivihiili TWh	Öljy TWh	Kaasu TWh	Turve TWh	Ydin. TWh	Biov. TWh	Vesiv. TWh	Tuuli TWh	Aurinko TWh	Muut TWh	Tuonti TWh	Kulutus TWh
2019	4.24	0.22	3.89	2.86	22.93	11.19	12.29	5.99	0.18	2.03	20.04	85.84
2050	0.00	0.22	2.08	0.59	35.93	11.19	13.00	36.30	6.28	2.03	8.46	115.84
Muutos	-4.24	0.00	-1.81	-2.27	13.00	0.00	0.71	30.31	6.10	0.00	-11.58	30.00
Muutos/a	-0.14	0.00	-0.06	-0.07	0.42	0.00	0.02	0.98	0.20	0.00	-0.37	0.97
Muutos%	-100%	0%	-47%	-79%	57%	0%	6%	506%	3425%	0%	-58%	35%
Osuudet	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
2019	4.9%	0.3%	4.5%	3.3%	26.7%	13.0%	14.3%	7.0%	0.2%	2.4%	23.3%	100.0%
2050	0.0%	0.2%	1.8%	0.5%	31.0%	9.7%	11.2%	31.3%	5.4%	1.7%	7.3%	100.0%
Muutos	-4.9%	-0.1%	-2.7%	-2.8%	4.3%	-3.4%	-3.1%	24.4%	5.2%	-0.6%	-16.0%	0.0%

Tuulivoiman tuotanto on kasvanut Pohjoismaissa nopeasti. Käännekohta oli vuosi 2010, jolloin sekä Ruotsissa ja Suomessa alkoi tuulivoiman nopea kasvu (3,7 TWh vuodessa) takuuhintojen ansiosta (Kuva 7.2.3).



Kuva 7.2.3 Tuulivoiman tuotanto Pohjoismaissa (TWh/a).

Julkaisin vuonna kirjan *“Energiakäyttäjän käsikirja 2013”*, jossa päädyin siihen, että sähkön tuotantokustannukset ovat ydinvoimalla ja tuulivoimalla samat. Vuonna 2017 Lappeenrannan ja Lahden yliopistossa (LUT) tehdyt selvitykset osoittivat, että tuulivoimalla tuotettu sähkö on edullisempaa tuottaa kuin ydinvoima uudelle paikalle tehtynä.

https://www.lut.fi/uutiset/-/asset_publisher/h33vOeufOQWn/content/sahkontuotannon-hintavertailu-tuulivoima-edullisin

Vuonna 2020 tuulivoiman avulla voidaan tuottaa edullisempaa sähköä kuin Suomen uusilla ydinvoimalaitoksilla. Omakustannushinta 200 MW tuulivoimapuiston tuottamalle sähkölle on noin 40 €/MWh (Taulu 7.2.4). Olkiluodon 3:n ja Hanhikivi 1:n ydinvoimayksiköiden omakustannushinta on arvioni mukaan 45–65 €/MWh välillä. Sen sijaan IVOn suunnitteleminen ja Kiinaan rakennettujen Tianwan 1–4 laitosten omakustannushinta oli noin 30 €/MWh eli selvästi tuulivoimaa edullisempi.

Taulu 7.2.4 Ydin- ja tuulivoimalaitosten kustannusarviota (Asko Vuorinen 2020).

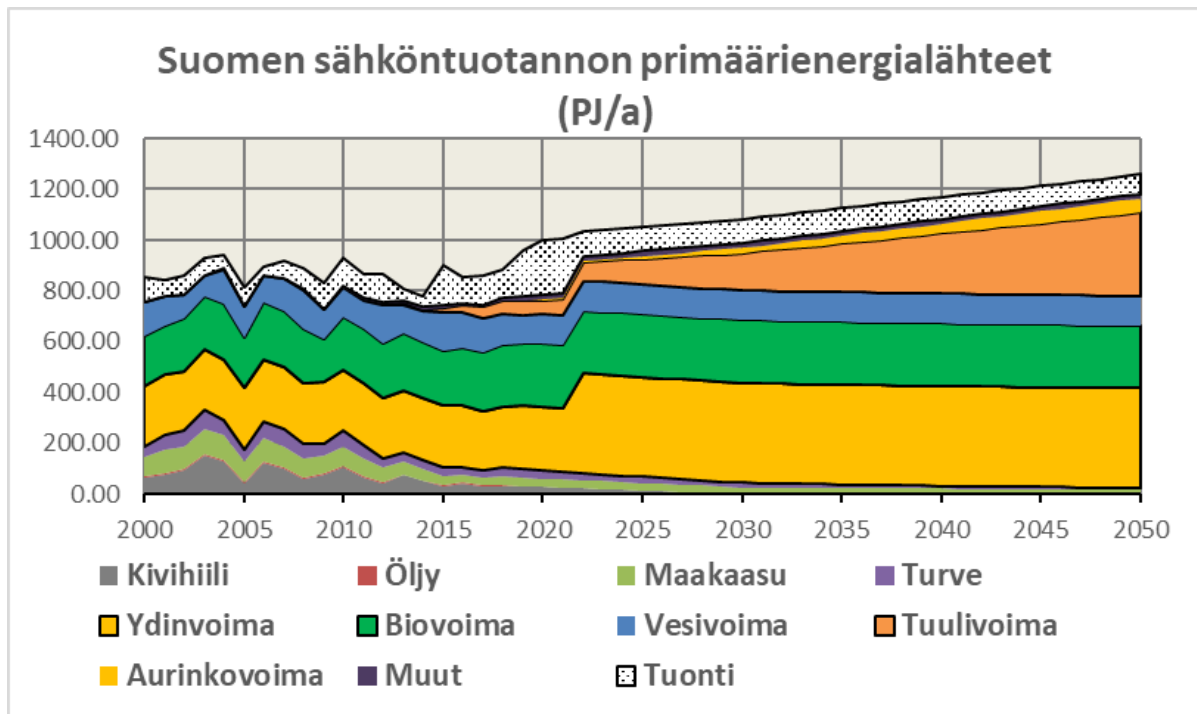
Voimalaitos		Tianwan 1-2	Tianwan 3-4	Olkiluoto 3	Hanhikivi 1	Tuulivoima
Tyyppi		VVER-91/99	VVER-91/99	EPR-1600	VVER-1200	40x5
Nettoteho	MW/kpl	990	1060	1600	1150	
Yhteensä	MW	1980	2120	1600	1150	200
Pääsopimus	Meur	800	900	3200	4400	260
Oma osuus	Meur	1867	2100	1280	1320	26
Yhteensä	Meur	2667	3000	4480	5720	286
	€/kW	1347	1415	2800	4974	1430
Rakennusaika	vuotta	6.5	5	17	8	2
Laskentakorko	%	3%	3%	3%	3%	3%
Rakennusajan korot	%	9.8%	7.5%	25.5%	12.0%	3.0%
	Meur	260	225	1142.4	686.4	8.58
Investointi	Meur	2927	3225	5622	6406	295
	€/kW	1478	1521	3514	5571	1473
Suhde Tianwaniin		1.00	1.03	2.38	3.77	1.00
Annuiteetti (30 v 5 %)		6.5%	6.5%	6.5%	6.5%	6.5%
Huipunkäyttöaika	h/a	7500	7500	7500	7500	3200
Pääomakust.	€/MWh	12.8	13.2	30.5	48.3	29.9
Käyttö ja polttoaine	€/MWh	16.0	16.0	16.0	16.0	10.0
Omakustannushinta	€/MWh	28.8	29.2	46.5	64.3	39.9

Uusi Piiparinmäen tuulivoimapuisto on rakenteilla Kajaanin lähelle. Sinne tehdään 211 MW tuulipuisto, johon kuuluu 41 kappaletta noin 5 MW tuuliturbiinia. Sen omistava yhtiö Ilmatar tarjoaa sähköä kahden vuoden sopimuksella hinnalla 40 €/MWh ilman veroja.

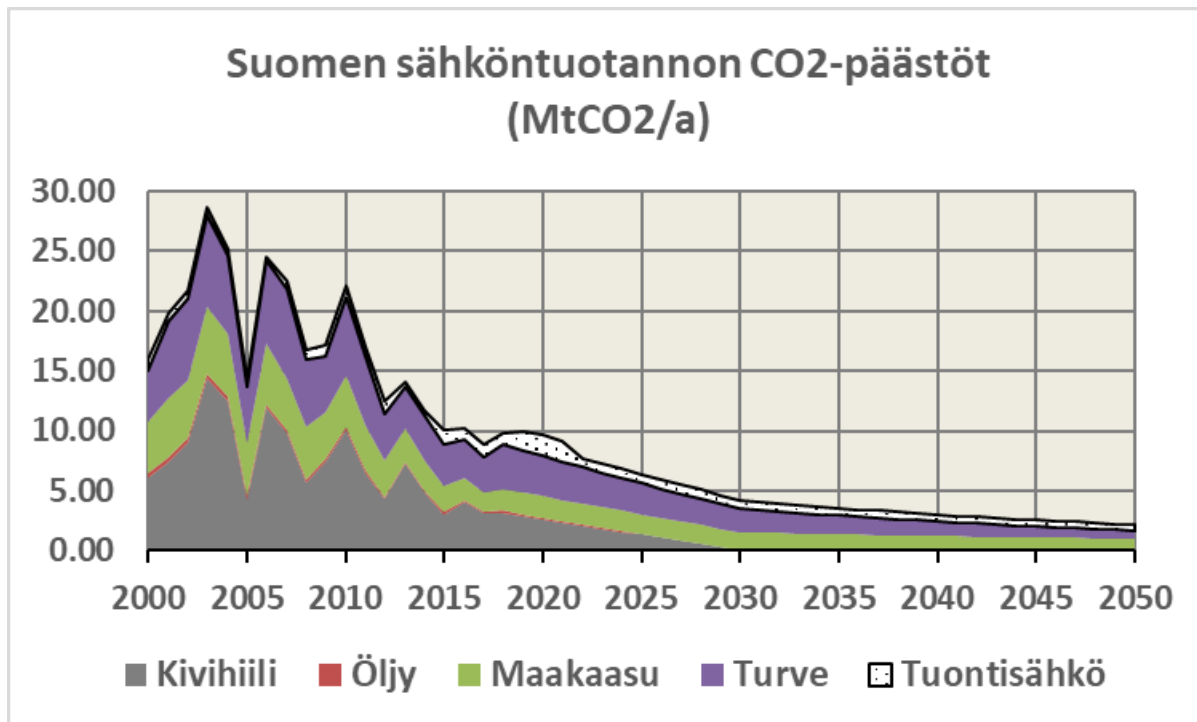
Ydinvoimala saisi maksaa 2500 €/kW ollakseen kilpailukykyinen tuulivoimaan verrattuna. Siihen hintaan VVER-tyyppisen voimalan voisi kylläkin rakentaa, jos rakentaja käyttäisi Imatran Voimassa aikanaan Loviisa 3-yksikköä varten tehtyjä piirustuksia. Niiden mukaan rakennettiin neljä ydinvoimalaa Kiinaan (Tianwan 1–4), jotka maksoivat noin 1500 €/kW.

Sen jälkeen on Suomeen tullut suojaamisvaatimus lentokonetörmäyksestä (11.9.2001 New York) ja ydinvoimalan toimimisesta ilman sähköä (2011 Fukushima). Ne ovat nostaneet ydinvoimalaitosten rakennuskustannuksia.

Sähköntuotannon primäärienergianlähteet on laskettu olettaen vesivoiman, tuulivoiman, aurinkovoiman ja tuontisähkön hyötysuhteeksi 40 % BP:n tilastojen mukaisesti. Tällöin sähköntuotannon primäärienergian tarve kasvaa nykyisestä noin 1000 petajoulesta vuodessa (PJ/a) arvoon 1260 PJ/a vuonna 2050 (Kuva 7.2.4).



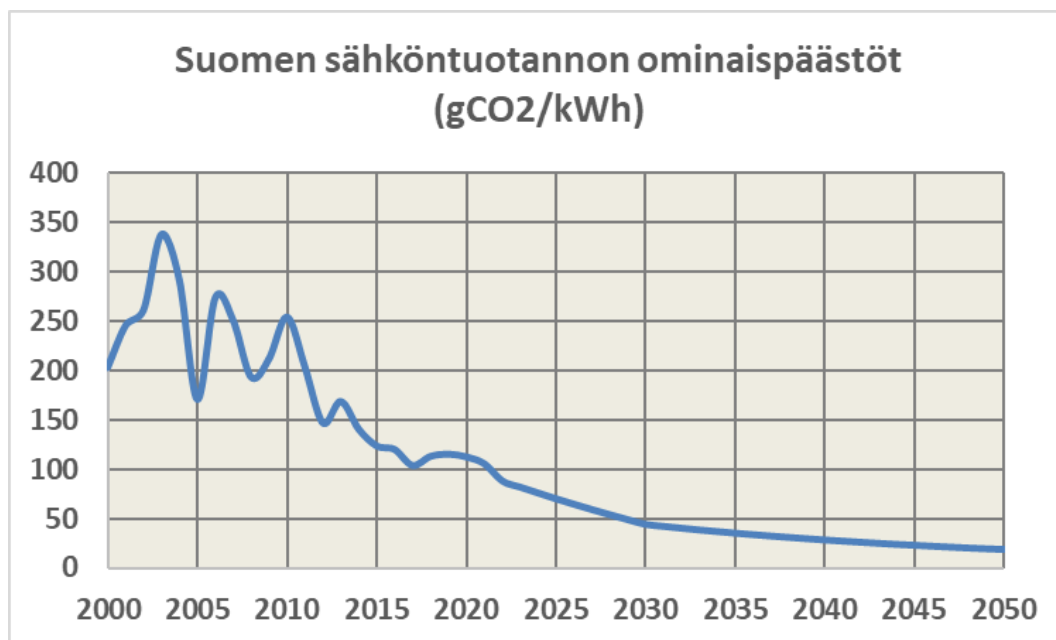
Kuva 7.2.4 Sähköntuotannon primäärienergian lähteet (PJ/a).



Kuva 7.2.5 Sähköntuotannon CO₂-päästöt Suomessa (MtCO₂/a).

Sähköntuotannon hiilidioksidipäästöt vähenevät nykyistä noin 10 miljoonasta tonnista noin

kahteen (80 %) vuoteen 2050 mennessä (Kuva 7.2.5). Sähkön tuotannon ominaispäästöt laskevat vastaavasti nykyisestä noin 100 g/kWh arvoon 20 g/kWh vuoteen 2050 mennessä (Kuva 7.2.6).



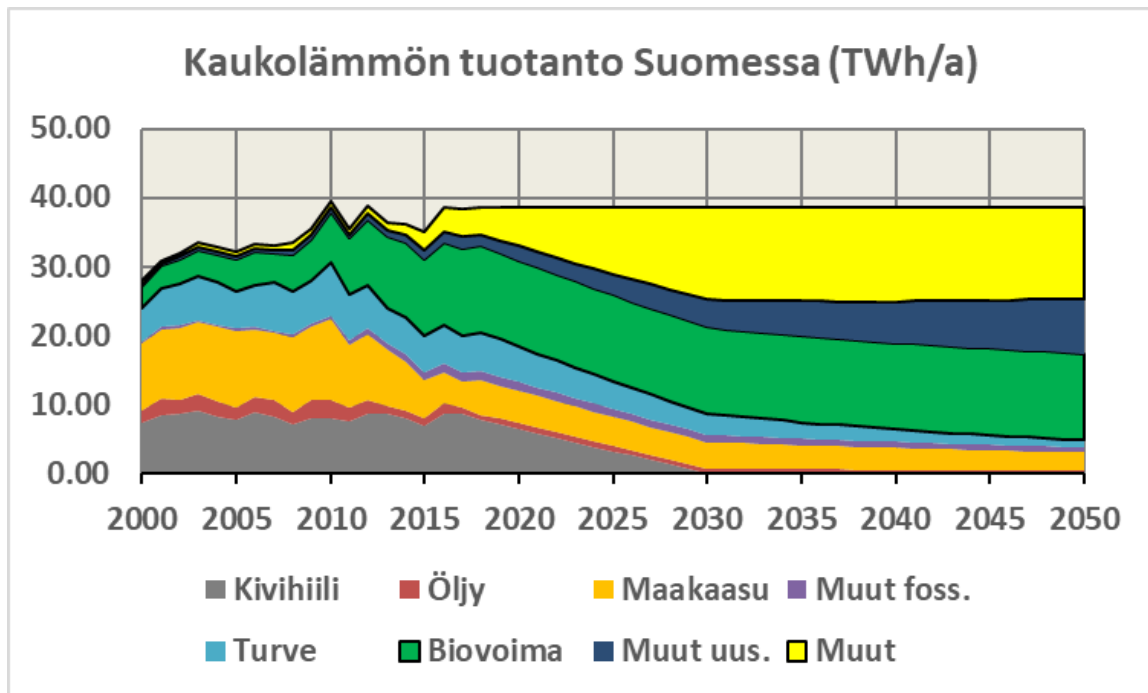
Kuva 7.2.6 Sähkön tuotannon ominaispäästöt Suomessa (gCO₂/kWh).

7.3 Kaukolämmön tuotanto Suomessa

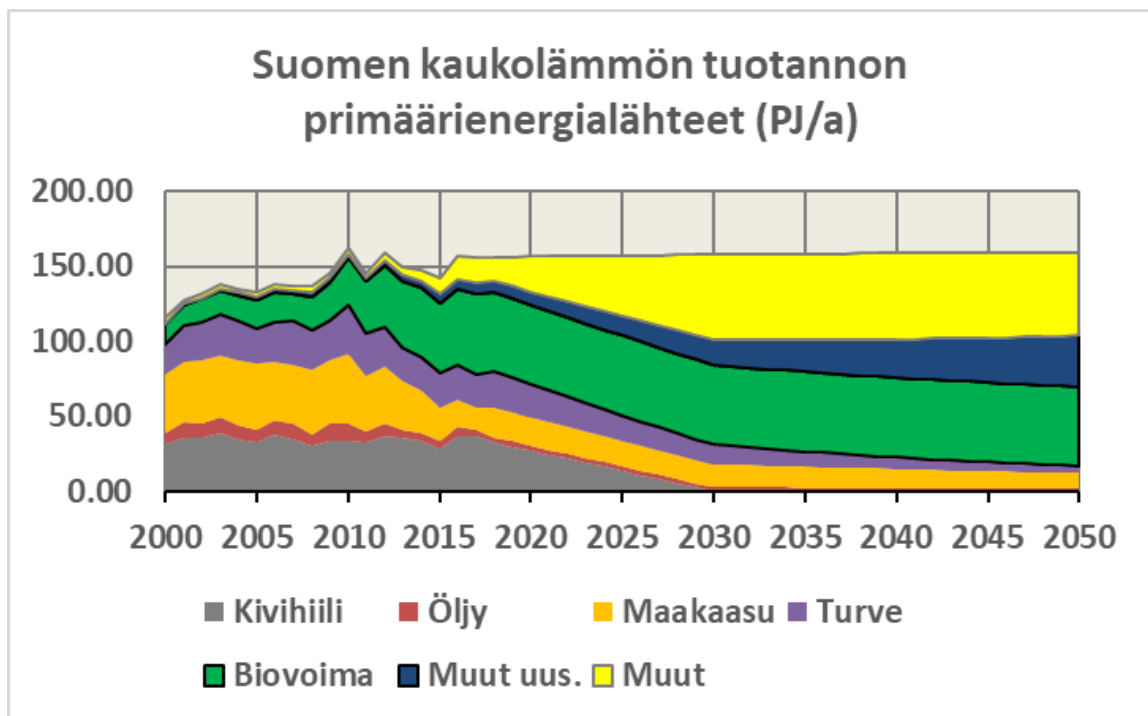
Kaukolämmön kulutuksen arvellaan pysyvän nykyisenä, mutta fossiilisten lähteiden poistuessa tilalle tulee muita uusiutuvia (lämpöpumput) ja muut lähteet (hukkalämpö) (Kuva 7.3.1). Bioenergian käyttö säilyy nykyisenä, koska jätetuotokset ovat jo täysin hyödynnetty. Hukkalämpöä voitaisiin saada myös Loviisan voimalasta noin 6 TWh, joka riittäisi siihen, että Helsingin seudun kaukolämmöstä tulisi hiilivapaata.

Kaukolämmön primäärienergian kulutus säilyy samalla myös nykyisenä eli noin 150 PJ/a tasolla (Kuva 7.3.2). Suomen kaukolämmön CO₂-päästöt vähenevät nykyisestä noin kuudesta miljoonasta tonnista noin yhteen miljoonaan tonniin vuoteen 2050 mennessä (Kuva 7.3.3).

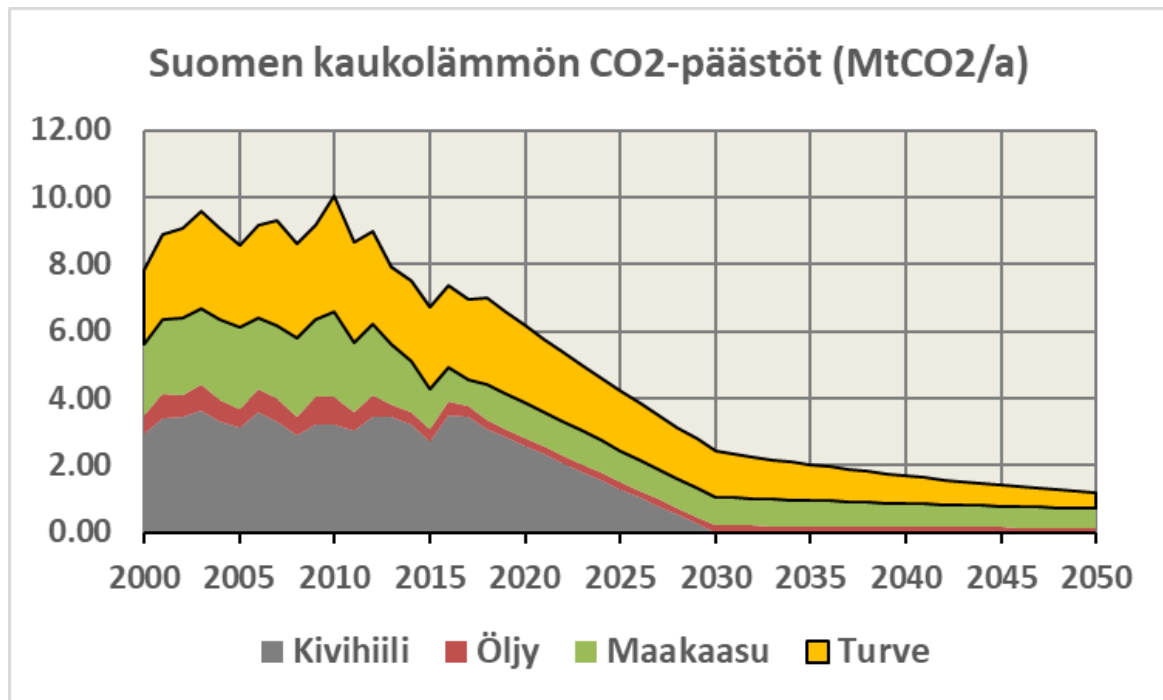
Sähkön ja lämmöntuotannon ominaispäästöt laskevat nykyisistä noin 110 ja 170 g/kWh arvoihin 20 ja 30 g/kWh vuoteen 2050 mennessä (Kuva 7.3.4).



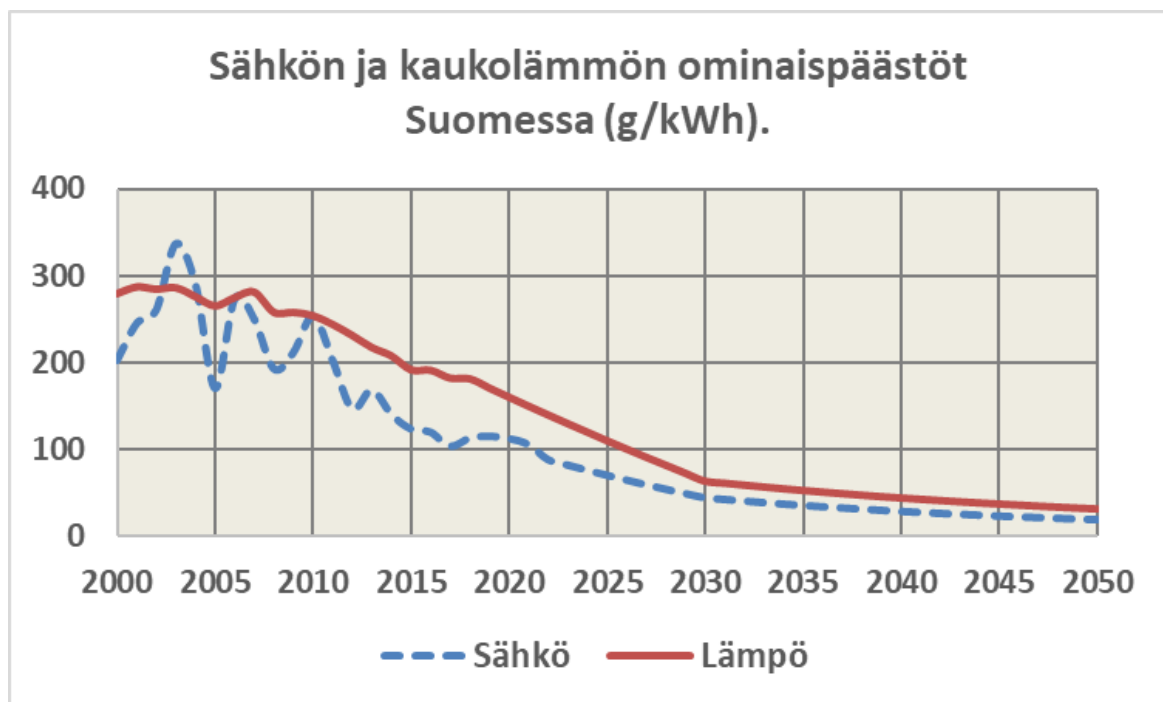
Kuva 7.3.1 Kaukolämmön tuotanto Suomessa (TWh).



Kuva 7.3.2 Suomen kaukolämmön tuotannon primäärienergian lähteet (PJ/a).



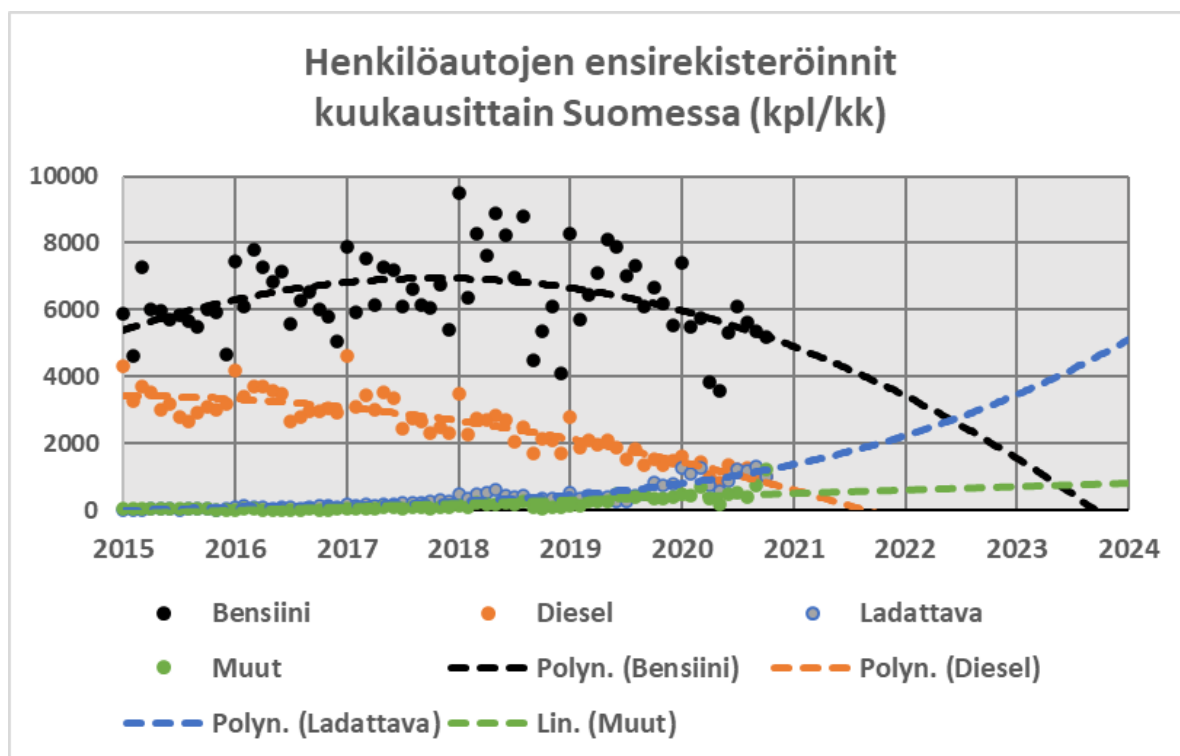
Kuva 7.3.3 Kaukolämmön CO₂-päästöt (MtCO₂/a).



Kuva 7.3.4 Sähkön ja kaukolämmön ominaispäästöt (g/kWh).

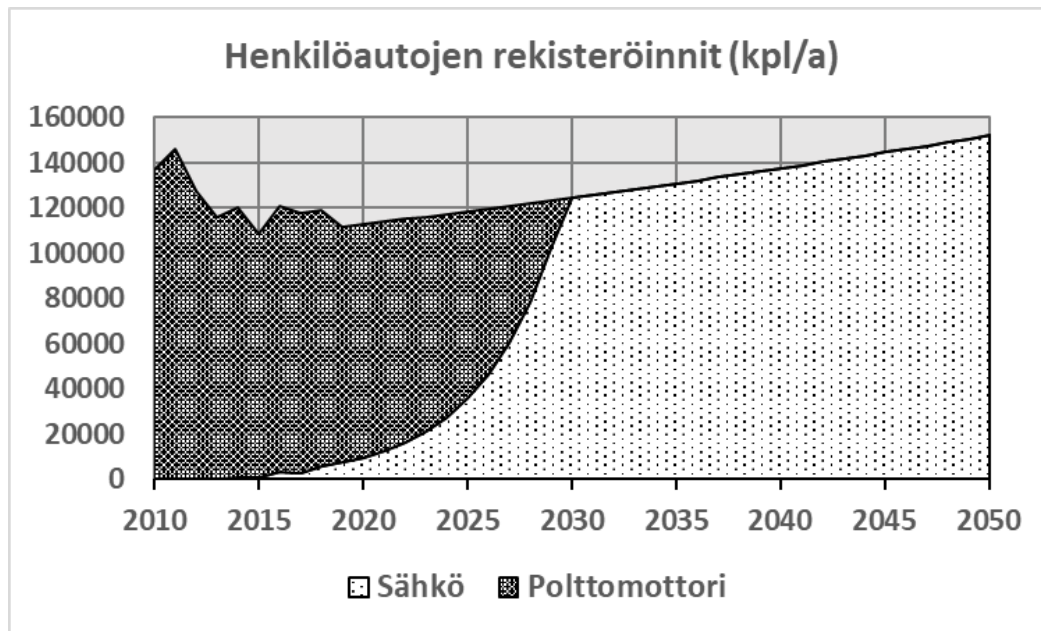
7.4 Öljyn käyttö Suomessa

Öljyn tarve lähtee ensisijaisesti henkilöautoista, joiden rekisteröinnit ovat muuttuneet nopeasti. Syyskuussa 2020 rekisteröidyistä autoista jo 15 % oli ladattavia ja ne ohittivat dieselautot (Kuva 7.4.1). Trendin jatkuessa samanlaisena ladattavien autojen rekisteröinnit ohittavat myös bensiiniautot vuonna 2022. Vuoteen 2025 mennessä kaikki uudet autot olisivat trendin mukaan ladattavia sähköautoja.

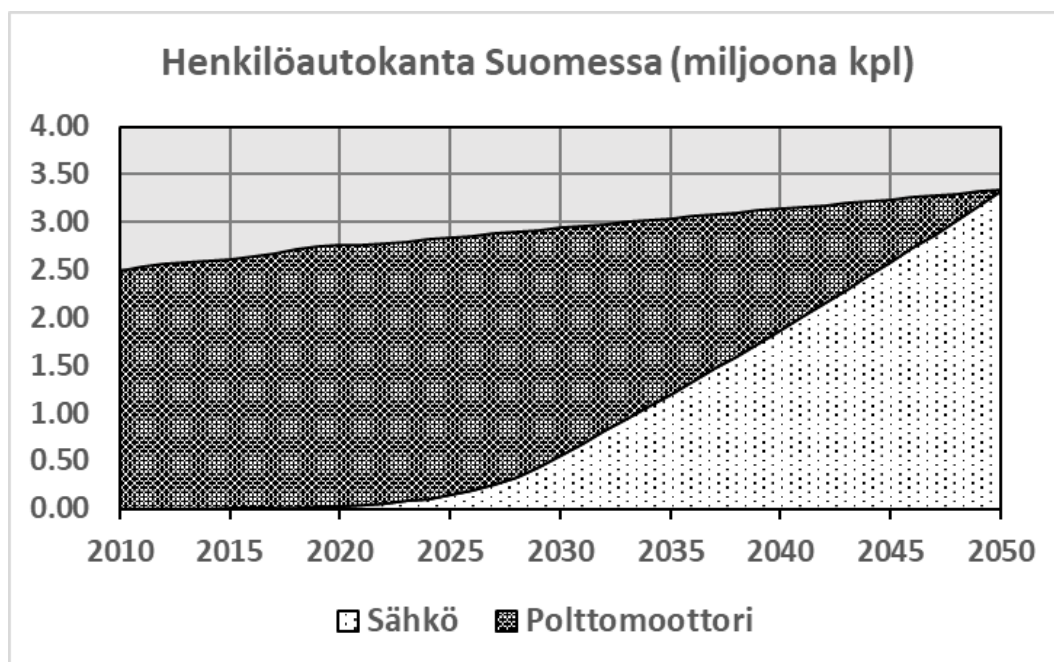


Kuva 7.4.1 Henkilöautojen ensirekisteröinnit käyttövoimittain Suomessa (kpl/kk).

Tässä on kuitenkin oletettu, että ladattavien autojen myynti kehittyy siten, että uusista autoista 100 % olisi sähköautoja vasta vuonna 2030 (Kuva 7.4.2). Samalla autokanta muuttuisi siten, että vuonna 2050 kaikki henkilöautot kulkisivat sähköllä (Kuva 7.4.3).

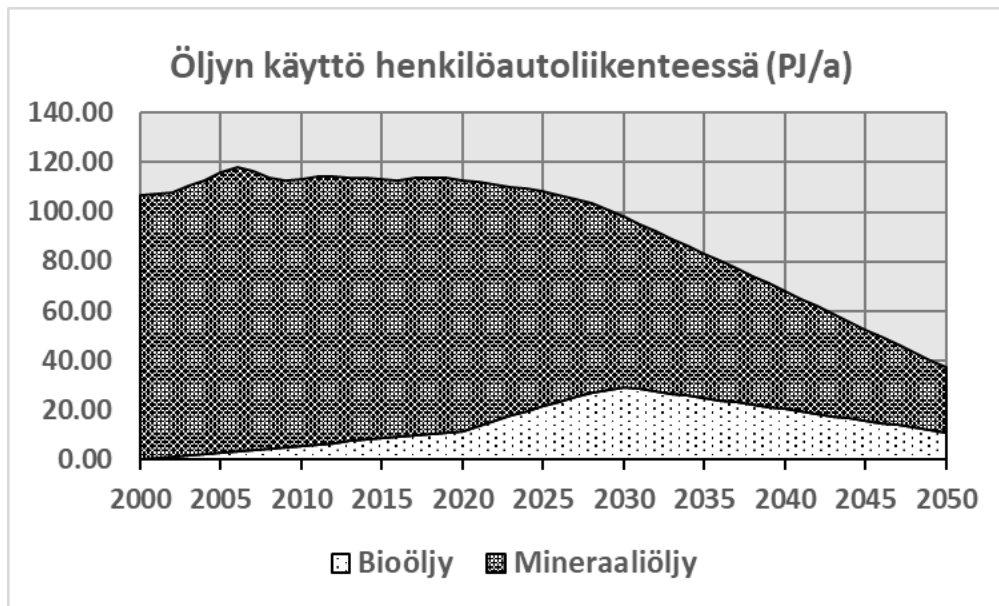


Kuva 7.4.2 Henkilöautojen rekisteröinnit (kpl/a).



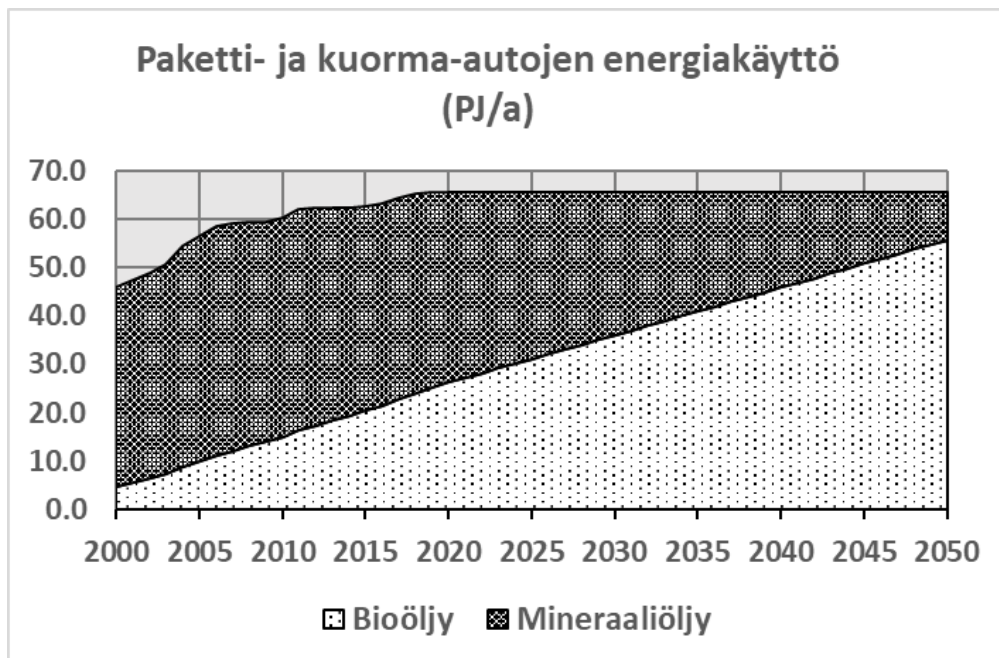
Kuva 7.4.3 Henkilöautokanta Suomessa (milj. kpl).

Henkilöautoliikenteen polttoainekulutus vähenee 110 petajoulesta noin 40 petajouleen (64 %) vuoteen 2050 mennessä (Kuva 7.4.4). Samalla autojen käyttämän bioöljyn osuus nousee 30 % energiasisällöstä vuoteen 2030 mennessä.



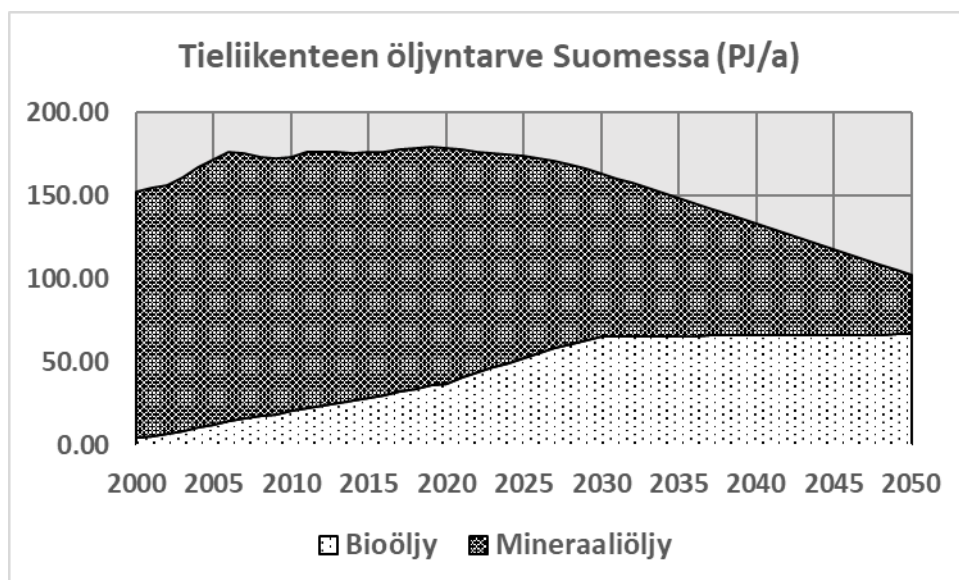
Kuva 7.4.4 Henkilöautojen energiankulutus (PJ/a).

Paketti- ja kuorma-autojen energiankäyttö säilyy ennallaan, mutta ne raskas liikenne siirtyy käyttämään biopolttoaineita (Kuva 7.4.5). Biopolttoainesta tärkeimmäksi voi nousta tulevaisuudessa Suomessa biokaasu, joka voisi kattaa raskaan liikenteen tarpeen kokonaan. Myös jätteistä ja palmuöljystä tehty Nesteen MyDiesel voi korvata raskaan liikenteen polttoainetarpeen osittain.

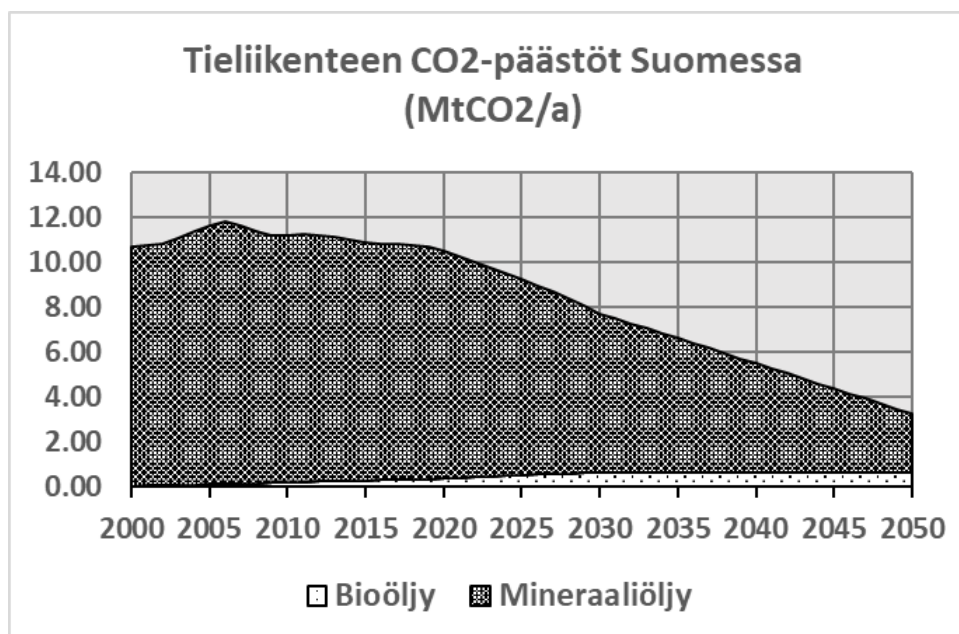


Kuva 7.4.5 Paketti- ja kuorma-autojen energiakäyttö (PJ/a),

Tieliikenteen öljyntarve on tänään noin 180 PJ/a. Siitä se laske arvoon 100 PJ/a vuoteen 2050 mennessä eli vain noin 45 % (Kuva 7.4.6). Kuitenkin mineraaliöljyn käyttömäärä laskee 144 PJ/a arvoon 36 PJ/a eli 75 %. Maantieliikenteen CO₂-päästöt vähenevät noin 11 miljoonasta tonnista 3,2 miljoonaan tonniin (71 %) vuoteen 2050 mennessä (Kuva 7.4.7).

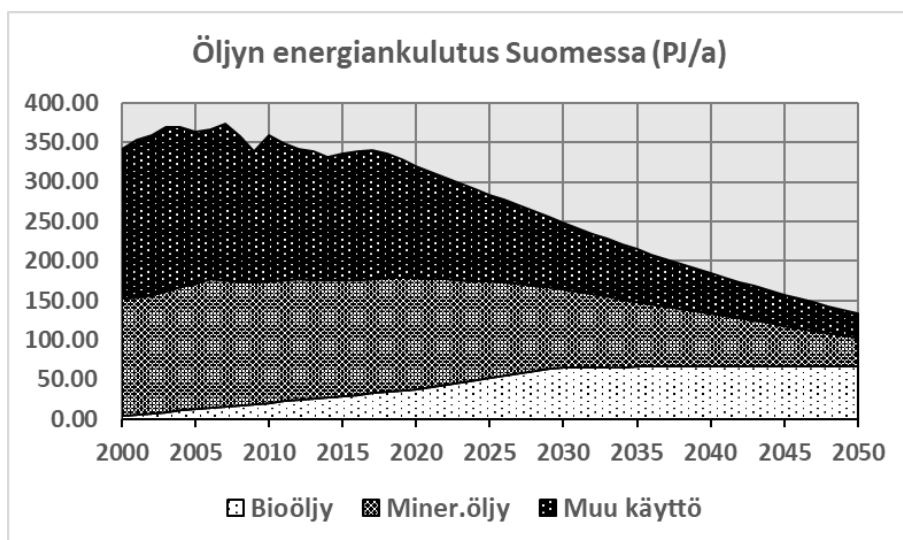


Kuva 7.4.6 Tieliikenteen öljyntarve (PJ/a).



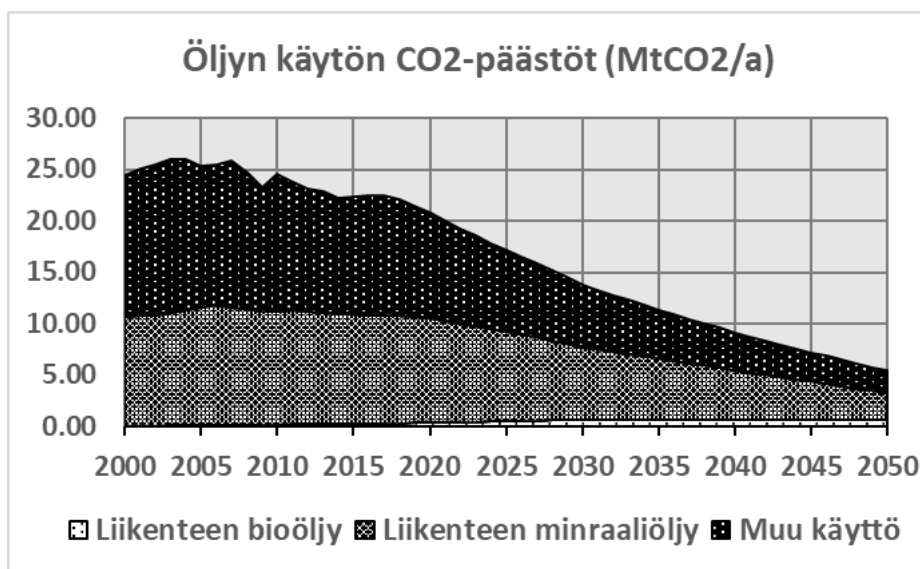
Kuva 7.4.7 Tieliikenteen CO₂-päästöt (MtCO₂/a).

Hallituksen tavoitteena on puolittaa öljyn käyttö vuoteen 2030 mennessä, kun vertailuvuotena on vuosi 2005. Käyttö vuonna 2005 oli noin 360 TJ, jolloin sen pitäisi olla 180 PJ vuonna 2030. Ennusteen mukaan öljyä käytetään vuonna 2030 vielä 250 PJ/a (Kuva 7.4.8). Jos siitä vähennetään bioöljyjen osuus, niin mineraalipohjaisten öljyjen käyttö vuonna 2030 olisi noin 180 PJ/a, jolloin päästäisiin 50 % vähennystavoitteeseen.



Kuva 7.4.8 Öljyn kokonaiskäyttö ilman sähkön ja kaukolämmön käyttämää öljyä (PJ/a)

Öljyn käytöstä aiheutuvat hiilidioksidipäästöt vähenevät noin 21,4 miljoonasta tonnista vuonna 2019 noin 5,4 miljoonaan tonniin (75 %) vuoteen 2050 mennessä (Kuva 7.4.9). Päästöt vähenevät vastaavasti vuoteen 2005 verrattuna vuoteen 2030 mennessä noin 55 %



Kuva 7.4.9 Öljyn aiheuttamat CO₂-päästöt muussa kuin sähkön ja kaukolämmön tuotannossa (MtCO₂/a).

Biopolttoaineiden jakeluvelvoitetta on nostettu henkilöautoissa 30 %:iin vuoteen 2030 mennessä. Diesel-autojen jakeluvelvoitteen voisi nostaa 80 % vuoteen 2050 mennessä. Niissä on mahdollista käyttää myös biokaasua tai Nesteen MyDieseliä.

Öljy-yhtiö Neste valmistaa jo tällä hetkellä kaupallisesti palmuöljystä ja jätteistä tehtyä MyDieseliä, jota voidaan käyttää dieselautoissa sellaisenaan. Tällaisia tuotteita voidaan kehittää myös puusta ja savukaasuista sekä biokaasusta. Biokaasun tuotantopotentiaali Suomessa on AFRY:n selvityksen mukaan noin 16 TWh kaasuna eli 58 PJ/a (AFRY, *Jakeluvelvoitteen laajentaminen, 2020*).

7.5 Suomen primäärienergian kulutus

Suomen primäärienergian kulutus pysyy noin 1500 TJ/a tuntumassa vuoteen 2050 asti (Kuva 7.5.1). Sähkö kattaa energiantarpeesta tänään 66 %, mutta jo 80 % vuonna 2050 (Taulu 7.5.1). Kaukolämmön osuus arvioidaan pysyvän vakiona 10 %:ssa. Mineraaliöljyjen osuus vähenee vuoteen 2050 mennessä noin 75 %. Mineraaliöljyn osuus primäärienergiasta putoaa 20:sta noin viiteen prosenttiin, mutta bioöljyn (tai biokaasun) osuus kasvaa 2,5:stä noin 4,5 prosenttiin.

Taulu 7.5.1 Primäärienergian kulutus 2019 ja 2050 (PJ/a).

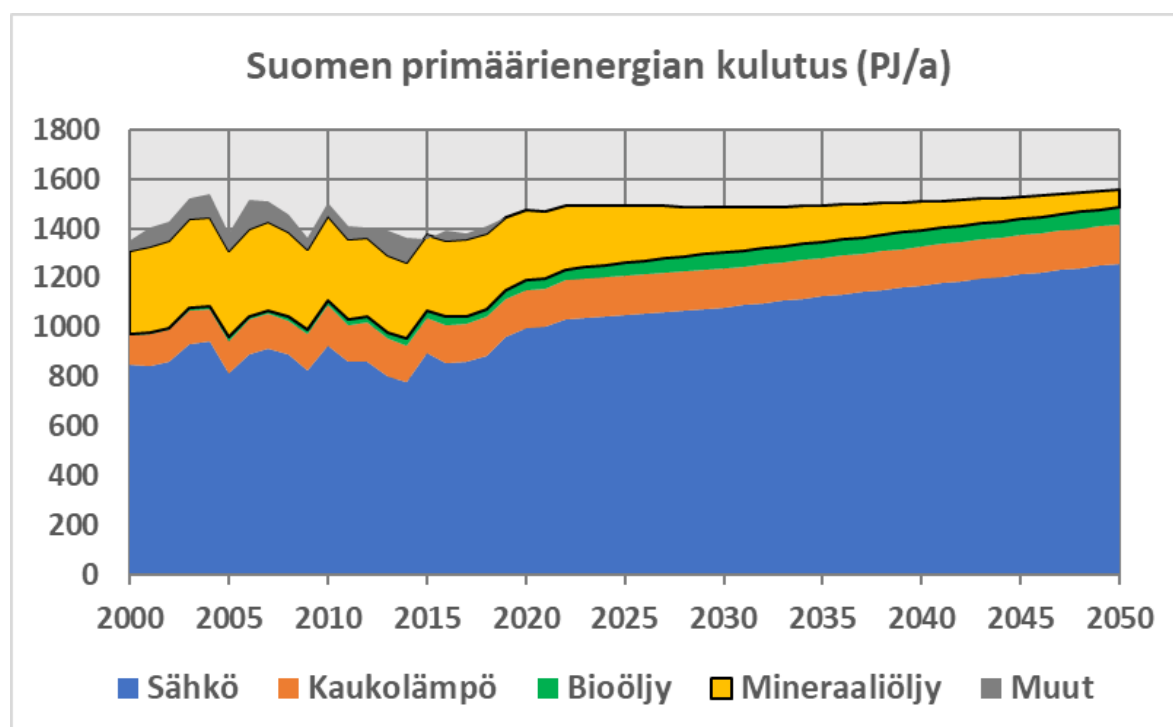
	Sähkö	Kaukolämpö	Bioöljy	Mineraaliöljy	Yhteensä
Energia	PJ/a	PJ/a	PJ/a	PJ/a	PJ/a
2019	960.65	156.38	36.05	292.78	1445.86
2050	1258.18	159.51	69.20	71.74	1558.62
Muutos	297.54	3.13	33.15	-221.05	112.77
Muutos %	31.0%	2.0%	92.0%	-75.5%	7.8%
Osuudet	%	%	%	%	%
2019	66.4%	10.8%	2.5%	20.2%	100.0%
2050	80.7%	10.2%	4.4%	4.6%	100.0%
Muutos	14.3%	-0.6%	1.9%	-15.6%	0.0%

Vaikka primäärienergian kulutus säilyy lähes vakiona, niin CO₂-päästöt vähenevät nykyisestä noin 38 MtCO₂ vuodessa vuoteen 2050 mennessä noin 10,8 miljoonaan tonniin hiilidioksidiavuodessa (MtCO₂/a) (Taulu 7.5.2). Suomi alittaisi samalla 2 tCO₂/asukas päästötavoitteen.

Taulu 7.5.2 Suomen CO₂-päästöt vuosina 2019 ja 2050 (MtCO₂/a).

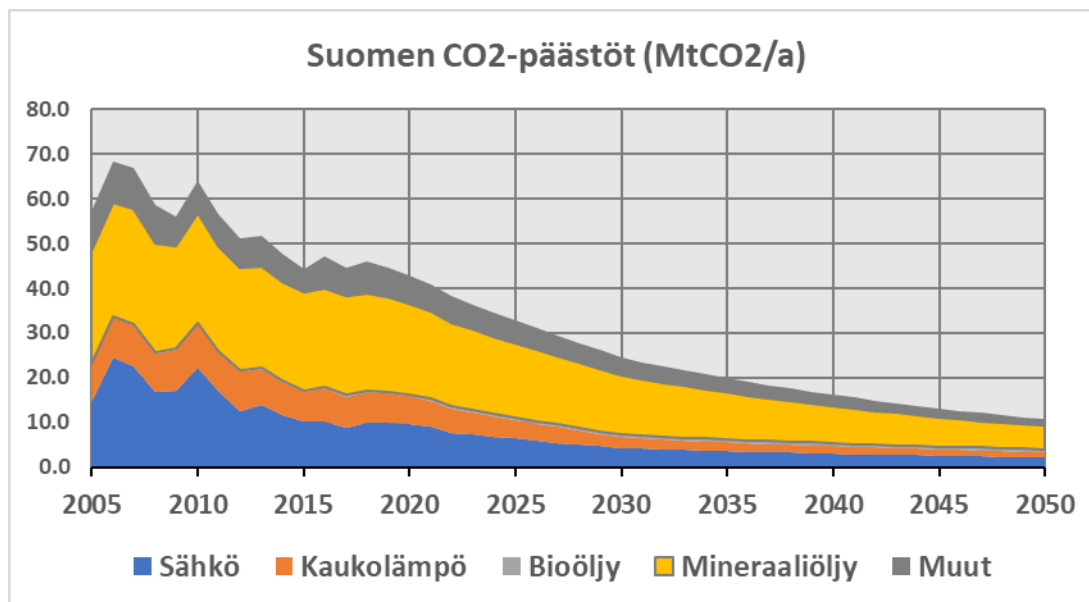
	Sähkö	Kaukolämpö	Bioöljy	Mineraaliöljy	Muut	Yhteensä
Päästöt	MtCO ₂ /a	MtCO ₂ /a	MtCO ₂ /a	MtCO ₂ /a	MtCO ₂ /a	MtCO ₂ /a
2019	9.9	6.6	0.4	21.1	6.7	44.6
2050	2.2	1.2	0.7	5.2	1.6	10.8
Muutos	-7.7	-5.4	0.3	-15.9	-5.1	-33.7
Muuos %	-78.0%	-81.8%	92.0%	-75.5%	-76.0%	-75.7%
Osuudet	%	%	%	%	%	%
2019	22.2%	14.7%	0.8%	47.3%	15.0%	100.0%
2050	20.1%	11.0%	6.4%	47.7%	14.8%	100.0%
Muutos	-2.1%	-3.7%	5.6%	0.4%	-0.2%	0.0%

Eniten vähenevät mineraaliöljyn päästöt (15.9 MtCO₂/a), koska autot siirtyvät sähkön ja bioöljyn käyttöön. Sähkön ja kaukolämmön CO₂-päästöt vähenevät noin 80 %, kun niiden käyttämät fossiilisten polttoaineiden käyttö loppuu melkein kokonaan. Öljyn käyttö aiheuttaisi vielä vuonna 2050 noin 48 % Suomen CO₂-päästöistä.

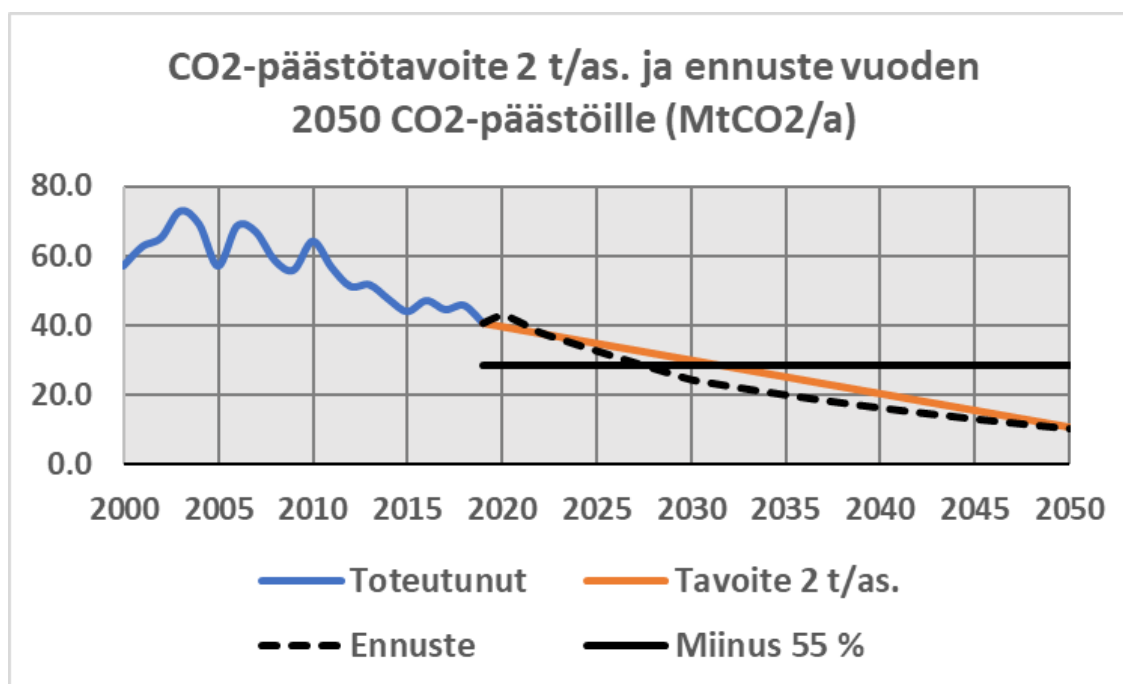


Kuva 7.5.1 Primäärienergian kulutus Suomessa (PJ/a).

Suomen CO₂-päästöt kehittyvät ennusteen mukaisesti siten, että öljy säilyy suurimpana päästöjen aiheuttajana tulevaisuudessa (Kuva 7.5.2). Ennuste saavuttaa vuodelle 2050 asetetun päästötavoitteen 2 tCO₂/asukas (Kuva 7.5.3). Päästöt olisivat ennusteen mukaisesti 11 MtCO₂ vuonna 2050.



Kuva 7.5 2 Suomen CO₂-päästöjen ennuste (MtCO₂/a).



Kuva 7.5.3 CO₂-päästötavoite 2 t/asukas ja ennustetut päästöt (MtCO₂/a).

Yhteenveto

Suomen on mahdollista päästä vuonna 2050 päästötavoitteeseen 2 t/asukas, jonka välitavoitteena Suomi voi olla hiilineutraali vuonna 2035 ja saavuttaa 55 % vähennyksen vuoden 1990 päästöihin vuoteen 2030 mennessä.

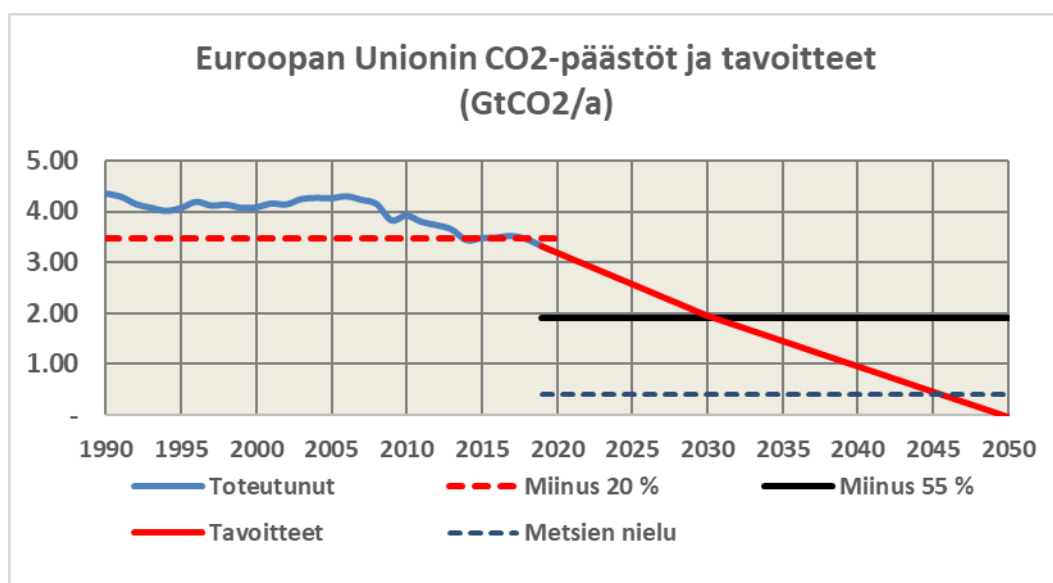
Tavoite edellyttää, että:

- 1) Sähkön osuus nostetaan 80 %:iin primäärienergian määrästä ja sähköntuotantoa lisätään pääasiassa tuulivoimalla noin 30 TWh ja ydinvoimalla noin 13 TWh
- 2) Kaukolämpö muutetaan päästöttömäksi lisäämällä lämpöpumppujen ja hukkalämmön käyttöä. Esimerkiksi Loviisan voimalasta voidaan saada 6 TWh hukkalämpöä
- 3) Henkilöautoliikenne muutetaan sähköiseksi siten, että vuodesta 2030 alkaen ei myydy enää pelkkiä polttomoottoriautoja
- 4) Paketti- ja kuorma-autoliikenne muutetaan biopolttoaineille siten, että 80 % polttoaineista on biodieseliä, biokaasua tai synteettisiä polttoaineita vuonna 2050
- 5) Öljylämmitys muutetaan puu-, sähkö- tai lämpöpumppulämmitykseksi kaikissa pientaloissa
- 6) Talot rakennetaan enenevässä määrin hirrestä ja puusta ja metsätaloudessa siirrytään kuitupuusta tukkeihin, jolloin elävien metsien ja asuntojen hiilinielut kasvavat.
- 7) Päästöjen hinnoittelua laajennetaan liikenteeseen ja metsien hiilinieluihin.

8. TAVOITEOHJELMA EUROOPAN UNIONILLE

8.1 Tavoitteet EU:lle

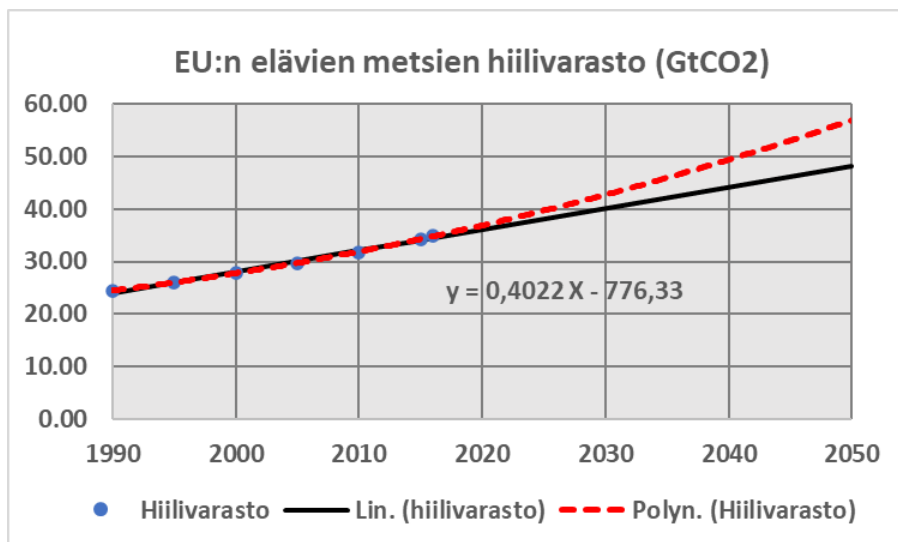
Euroopan Unioni (EU) on asettanut tavoitteekseen vähentää päästöjä 20 % vuoden 1990 tasosta vuoteen 2020 mennessä. Tämä tavoite on toteutumassa (Kuva 8.1.1). Seuraava tavoite on 55 % vähennys vuoteen 2030 mennessä vuoden 1990 päästöihin verrattuna. Se tarkoittaisi, että päästöjen tulisi olla vuonna 2030 noin 1,9 GtCO₂. Tämä tavoite voi toteutua, jos EU vähentää CO₂-päästöjään 4 % vuodessa.



Kuva 8.1.1 EU tavoite hiilineutraalisuudesta vuodelle 2050 tarkoittaisi että CO₂-päästöjä tulee vähentää 7 % vuosittain (GtCO₂/a).

Tämän jälkeen EU tavoittelee hiilineutraalisuutta vuonna 2050. Se tarkoittaisi, että CO₂-päästöt ovat yhtä suuret kuin hiilinielu vuonna 2050. Tavoite on vaikeampi kuin Suomella, koska Suomi on EU:n metsäisin valtio. Tavoitteen savuttaminen edellyttäisi, että päästöjä vähennetään 7 % joka vuosi. Tuntuu siltä, että se on mahdoton tehtävä tuolla aikataululla.

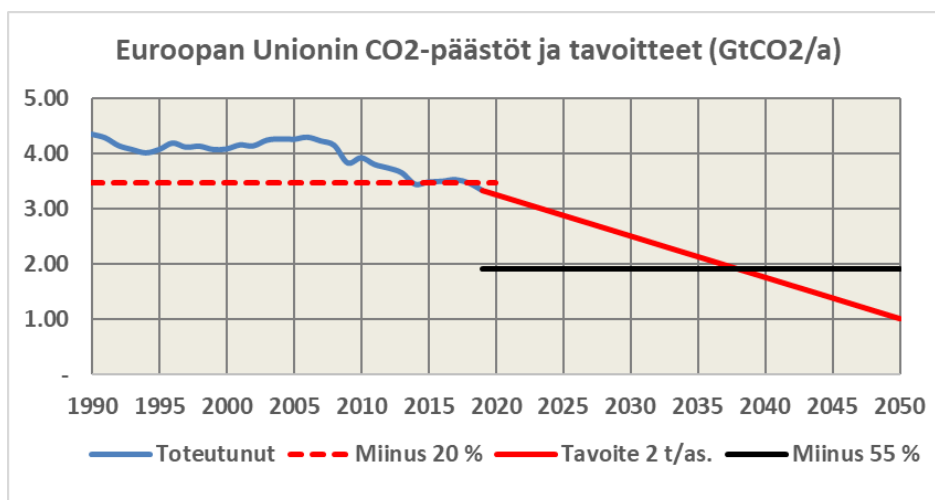
EU:n metsien hiilivarasto on kasvanut vuoden 1990 jälkeen arvosta 25 arvoon 35 GtCO₂ vuoteen 2016 mennessä (Kuva 8.1.2). Metsien hiilinielu eli hiilivarastojen kasvun kulmakerroin on siis 0,4 gigatonnia, joka vastaa kasvua 1,1 % vuodessa metsien hiilimäärään 35 GtCO₂ verrattuna. Kun EU:n CO₂-päästöt ovat olleet noin 3,3 GtCO₂ vuodessa, hiilinielujen avulla päästöistä on kompensoitu noin 0,4 GtCO₂ eli noin 12 %. Elävien metsien hiilinielu on ollut noin 0,8 tCO₂/asukas.



Kuva 8.1.2 EU:n elävien metsien hiilivarasto (GtCO₂) (Lähde: FAO).

Suomen metsien hiilinielu on kasvanut saman FAOn tilaston mukaan 0,54 gigatonnia 26 vuodessa eli 21 miljoonaa tonnia vuodessa. Suomea enemmän hiilinieluja ovat kasvattaneet (Liite 3) Ranska (60), Puola (52), Saksa (47), Espanja (42), Romania (39), Italia (35) ja Ruotsi (23 MtCO₂/a). Samoilla leveysasteilla oleva Ruotsi on varastoinut metsiinsä hiiltä 4.1 gigatonnia eli kaksinkertaisesti Suomen määrän. Ruotsin hiilinielu on kasvanut puolestaan keskimäärin 23 miljoonaa tonnia vuodessa eli noin 10 % Suomea enemmän.

EU:n tavoitteeksi riittää sama kuin koko maailmalle, että päästöt vuonna 2050 olisivat korkeintaan 2 tonnia per asukas vuonna 2050 (Kuva 8.1.3). Silloin EU:ssa on noin 530 miljoonaa asukasta ja kaksi tonnia per asukas tarkoittaisi päästötavoitetta 1,0 GtCO₂/a. EU:n välitavoite 55 % vähennys vuoden 1990 päästöistä toteutuu silloin vasta vuonna 2037. Tässä on huomattava, että muita kasvihuonekaasuja kuin CO₂ ei ole laskettu mukaan. Suurin ero on vuodessa 2050, jolloin EU haluaa painaa CO₂-päästöt nolnaan.



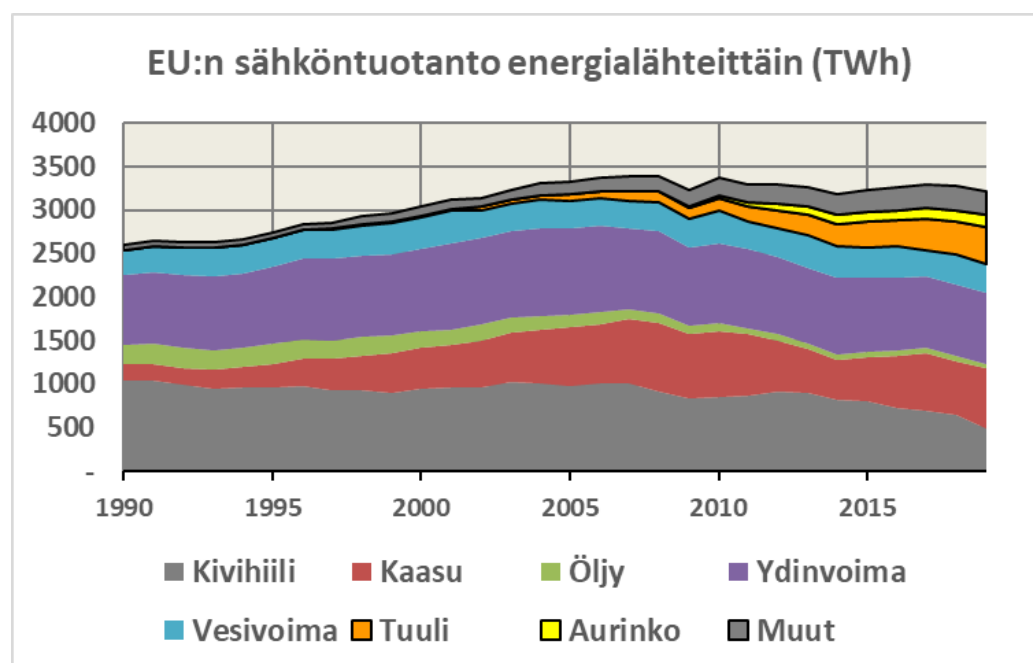
Kuva 8.1.2 Euroopan Unionin päästötavoitteet (GtCO₂/a).

8.2 EU:n sähköntuotanto

Euroopan Unionin sähköntuotanto on kasvanut vuodesta 1990 vuoteen 2019 mennessä noin 24 % (Taulu 8.2.1). Suurin muutos on tapahtunut kivihiilivoiman tuotannossa, joka on vähentynyt samana aikana 53 % ja se kattoi vuonna 2019 enää vain 15 % sähköntuotannosta. Eniten sähköä tuotettiin (36 %) vuonna 2019 uusiutuvilla energialähteillä. Ydinvoima on ollut tärkein sähköntuotannon lähde, mutta sen osuus on pienentynyt vuoden 1990 osuudesta 31 % vuoteen 2019 mennessä arvoon 26 %. Maakaasun osuus on vastaavasti kasvanut 7 %:sta vuoteen 2019 mennessä 22 %:iin ja siitä on tullut toiseksi tärkein sähköntuotannon lähde.

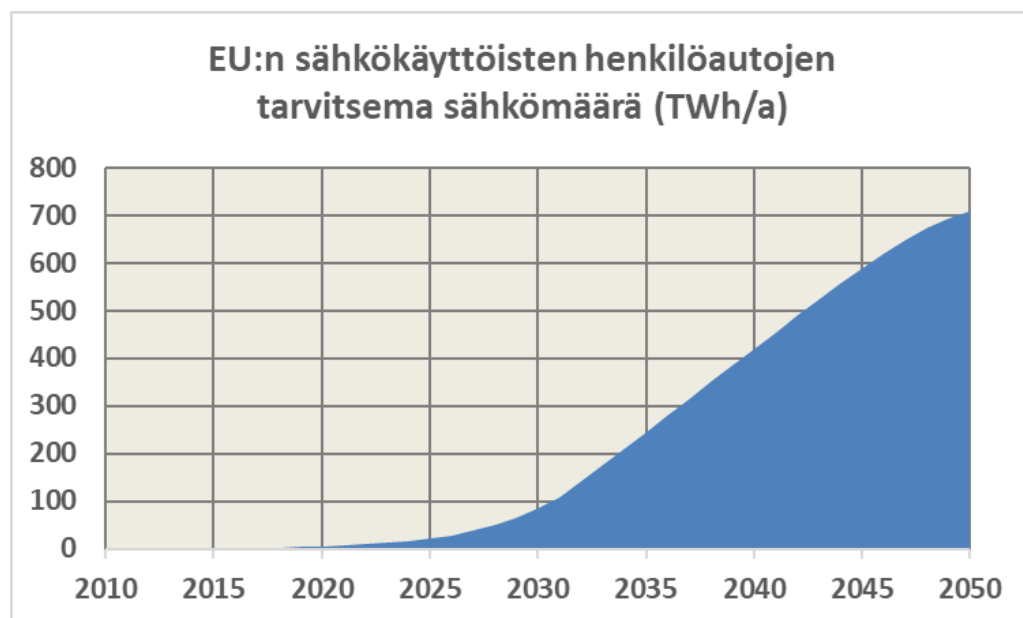
Taulu 8.2.1 Sähköntuotanto EU:ssa vuosina 1990 ja 2019 (Lähde BP Statistics 2020).

EU Energiälähde	Tuotanto		Tuotanto		Osuudet		
	1990 TWh	2019 TWh	Muutos TWh	Muutos %	1990 %	2019 %	Muutos %
Kivihiili	1040.2	488.4	-551.8	-53.0%	40.1%	15.2%	-24.9%
Kaasu	190.1	692.2	502.1	264%	7.3%	21.5%	14.2%
Öljy	221.9	49.1	-172.9	-78%	8.6%	1.5%	-7.0%
Ydinvoima	794.8	822.4	27.7	3%	30.6%	25.6%	-5.0%
Vesivoima	289.9	327.9	38.0	13%	11.2%	10.2%	-1.0%
Tuuli	0.8	430.7	430.0	55160%	0.0%	13.4%	13.4%
Aurinko	0.0	138.4	138.4		0.0%	4.3%	4.3%
Muut	57.2	266.2	209.0	365%	2.2%	8.3%	6.1%
Yhteensä	2594.9	3215.3	620.4	24%	100.0%	100.0%	0.0%
Uusiutuvat	348.0	1163.2	815.3	234%	13.4%	36.2%	22.8%



Kuva 8.2.1 EU:n sähköntuotannon energialähteet (TWh/a).

EU:n sähkönkulutus kasvaa vuoteen 2050 mennessä 1700 TWh eli määrään 4900 TWh (9 MWh/asukas). Kulutuksen kasvusta sähköautot kattavat 700 TWh (Kuva 8.2.2). Suunnilleen saman verran kasvaa myös lämpöpumppujen sähkön tarve. Teollisuuden sähkön tarve kasvaa noin 300 TWh.

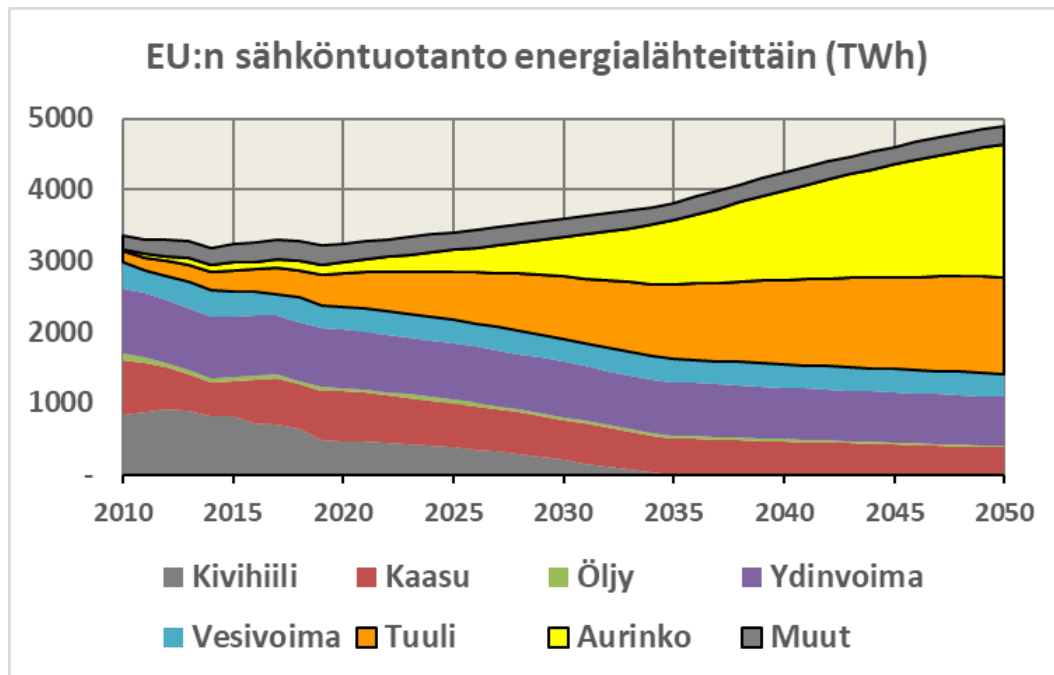


Kuva 8.2.2 EU:n sähkökäyttöisen henkilöautojen sähkön tarve (TWh/a).

EU:n sähköntuotanto kehittyy vuoteen 2050 mennessä siten, että aurinkovoimasta tulee tärkein sähkönlähde 38 % osuudella (Taulu 8.2.2 ja Kuva 8.2.3). Tuulivoima nousee toiseksi 28 % osuudella. Ydinvoima putoaa kolmanneksi 14 % osuudella. Tämä tarkoittaisi, että aurinko- ja tuulivoimaa rakennetaan jatkossa 83 ja 44 TWh joka vuosi vastaavasti. Fossiiliset polttoaineet putoavat noin 8 % osuuteen ja jäljellä jää vain maakaasu. Näin ei-fossiiliset energiamuodot kattavat noin 92 % EU:n sähköntuotannosta vuonna 2050.

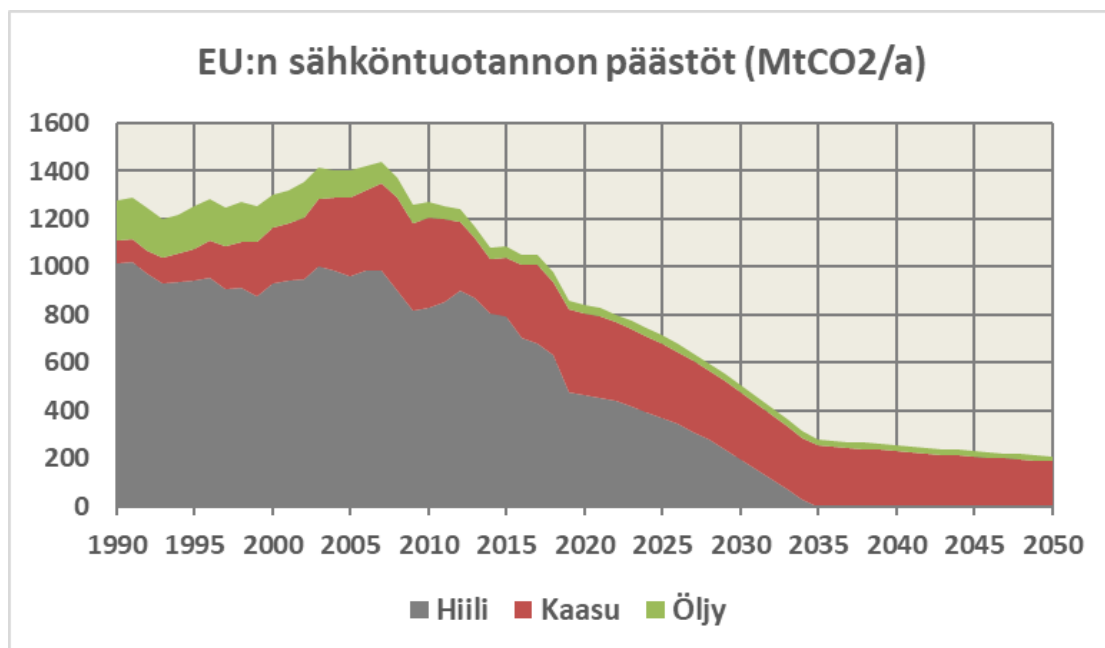
Taulu 8.2.2 EU:n sähköntuotannon lähteet vuonna 2050 (TWh/a).

EU Energiälähde	Energiamäärä		Energiamäärä			Osuudet		
	2019 TWh	2050 TWh	Muutos TWh	Muutos TWh/a	Muutos %	1990 %	2050 %	Muutos %
Kivihiili	488	-	-488	-23	-100%	15%	0%	-15%
Kaasu	692	378	-315	-15	-45%	22%	8%	-14%
Öljy	49	26	-23	-1	-47%	2%	1%	-1%
Ydinvoima	822	681	-141	-7	-17%	26%	14%	-12%
Vesivoima	328	328	0	0	0%	10%	7%	-3%
Tuuli	431	1357	926	44	215%	13%	28%	14%
Aurinko	138	1872	1734	83	1253%	4%	38%	34%
Muut	266	250	-16	-1	-6%	8%	5%	-3%
Yhteensä	3215	4892	1676	80	52%	100%	100%	0%
Uusiutuvat	1163.2	3807.0	2643.7	125.9	227%	36%	78%	42%

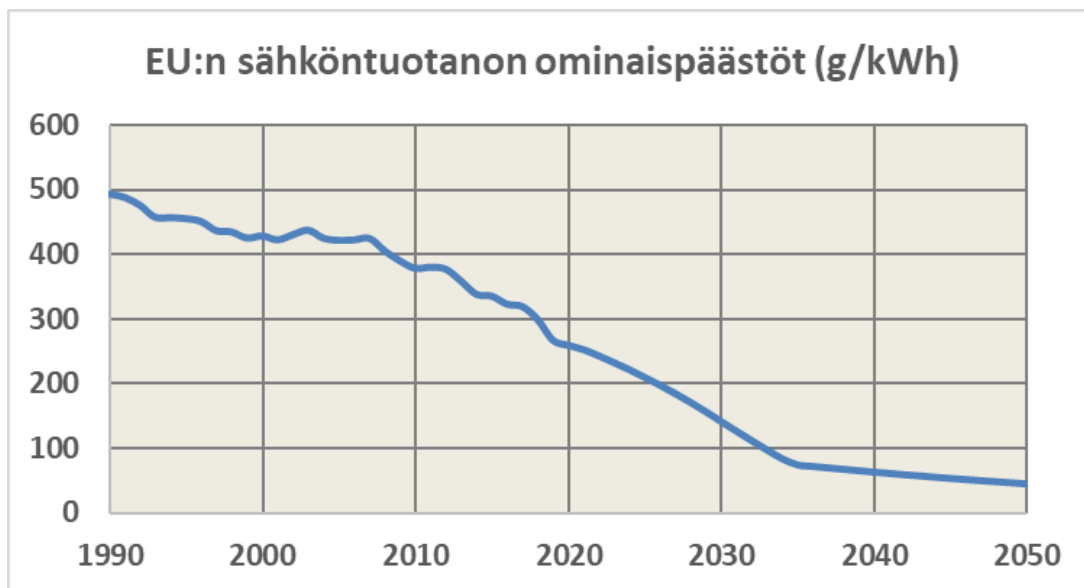


Kuva 8.2.3 EU:n sähköntuotannon energialähteittäin (TWh/a).

Sähköntuotannon aiheuttamat CO₂-päästöt pienenevät nykyisestä 860 miljoonasta tonnista 200 miljoonaan tonniin vuoteen 2050 mennessä (Kuva 8.2.4). Vastaavasti sähköntuotannon ominaispäästöt pienenevät nykyisestä 270 g/kWh arvoon 50 g/kWh (Kuva 8.2.5).



Kuva 8.2.4 EU:n sähköntuotannon CO₂-päästöt (MtCO₂/a).



Kuva 8.2.5 EU:n sähköntuotannon hiilidioksidin ominaispäästöt (g/kWh).

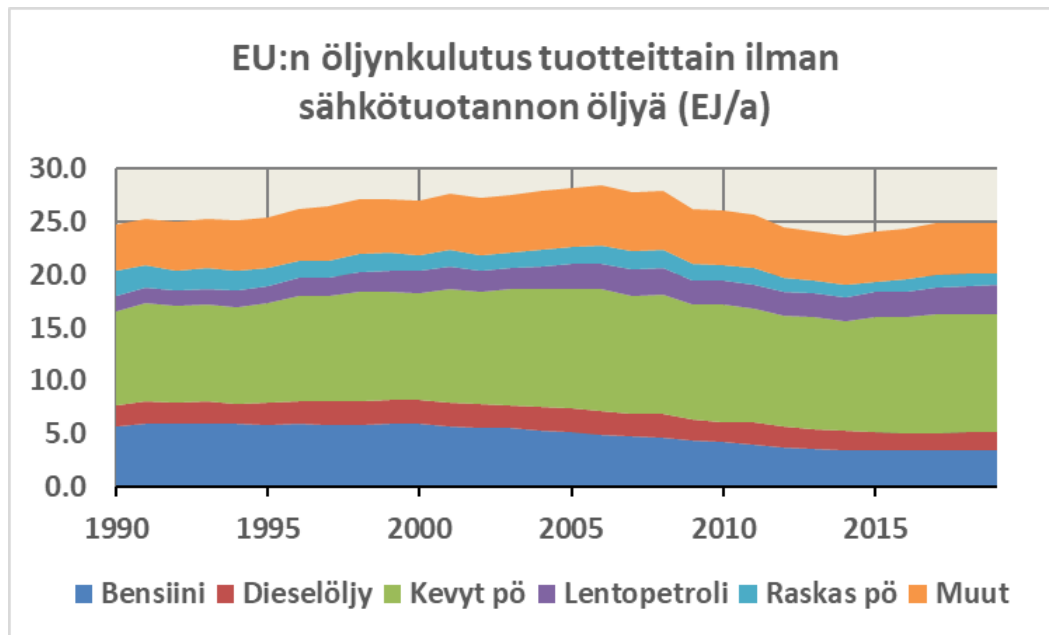
8.3 EU:n öljynkulutus

EU:n öljynkulutus ilman sähköntuotannon käyttämää öljyä alkoi vähentyä vuoden 2005 jälkeen ja oli 26,5 EJ/a vuonna 2019 (Kuva 8.3.1 ja Taulu 8.3.1). Merkittävin osa öljytä (42 %) oli kevyttä polttoöljyä, jota on käytetty pääasiassa lämmityspolttoaineena EU:ssa

Vuoden 2010 jälkeen vain kevyen polttoöljyn ja lentopetrolin kulutus on kasvanut, kun muiden polttoaineiden kulutus on vähentynyt. Eniten on vähentynyt bensiinin kulutus, joka saattaa aiheutua autojen siirtymisestä vaihtoehtoisiin energialähteisiin.

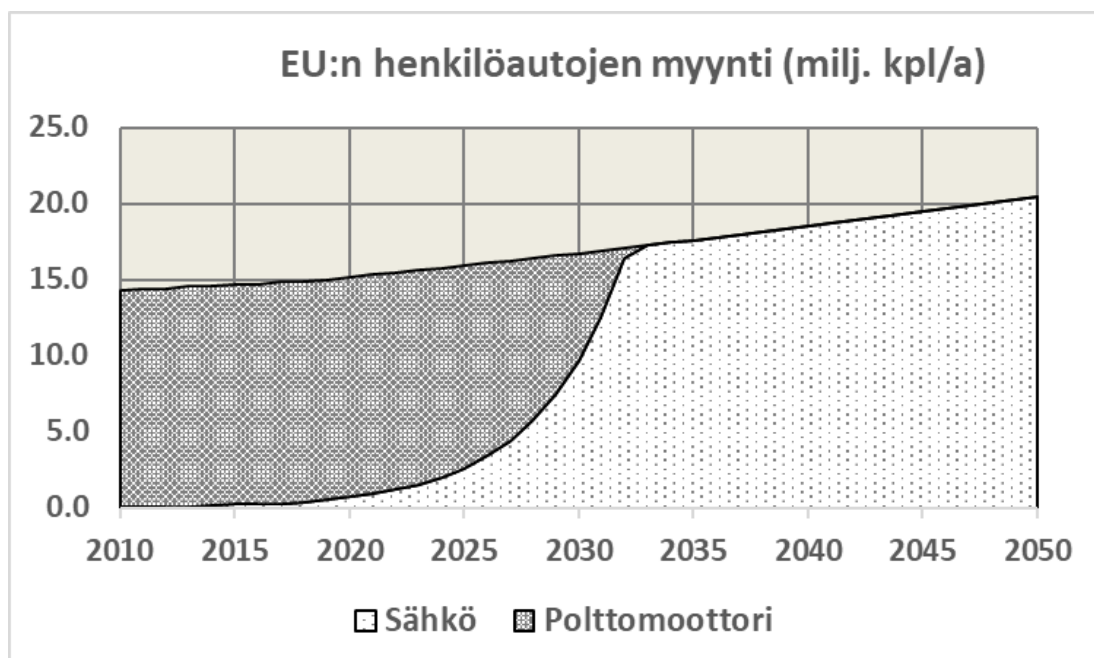
Taulu 8.3.1 EU:n öljynkulutus ilman sähköntuotannon öljyä (EJ/a).

EU Tuote	Energiamäärä		Energiamäärä			Osuudet		
	2010 EJ	2019 EJ	Kasvu EJ	Kasvu/a EJ/a	Kasvu-% %	2010 %	2019 %	Muutos %-yks.
Dieselöljy	1.96	1.71	-0.25	-0.03	-12.9%	7.5%	6.9%	-0.7%
Kevyt polttoöljy	11.07	11.22	0.16	0.02	1.4%	42.5%	45.0%	2.5%
Lentopetroli	2.26	2.69	0.43	0.05	19.1%	8.7%	10.8%	2.1%
Raskas polttoöljy	1.48	1.13	-0.34	-0.04	-23.3%	5.7%	4.5%	-1.1%
Muut	5.08	4.75	-0.33	-0.04	-6.4%	19.5%	19.1%	-0.4%
Yhteensä	26.05	24.94	-1.11	-0.12	-4.3%	100.0%	100.0%	



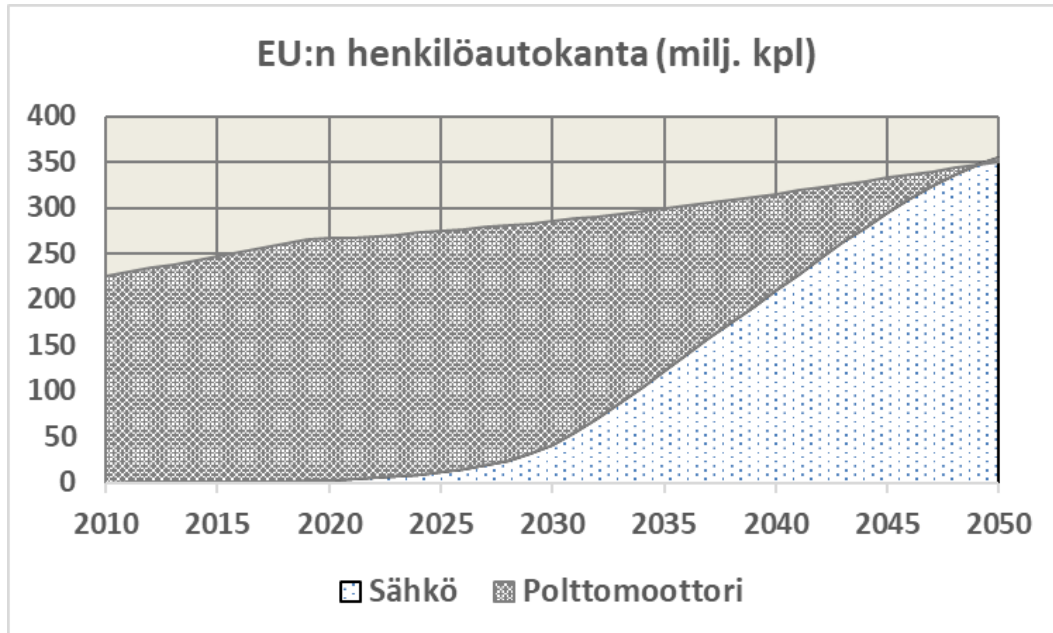
Kuva 8.3.1 EU:n öljynkulutus ilman sähköntuotannon öljyä (EJ/a).

Henkilöautojen myynnin arvellaan kehittyvän siten, että vuonna 2035 kaikki uudet autot olisivat sähköautoja, joihin on laskettu myös ladattavat hybridiautot (Kuva 8.3.2).

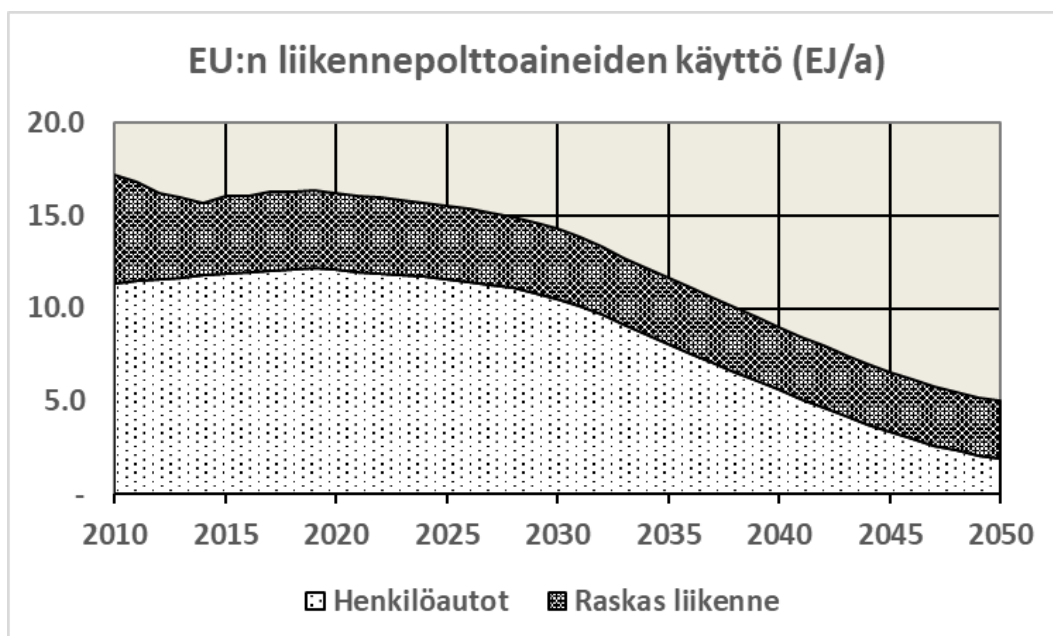


Kuva 8.3.2 EU:n uusien autojen markkinaosuudet (milj. kpl/a).

Henkilöautokanta muuttuu hitaammin. Vuonna 2050 lähes kaikki EU:n henkilöautot olisivat sähköautoja (Kuva 8.3.3). Liikennepolttoaineiden käyttö henkilöautojen ja raskaiden ajoneuvojen vähenee nykyisestä 16 EJ/a arvosta noin 5 EJ/a vuonna 2050 (Kuva 8.2.4).

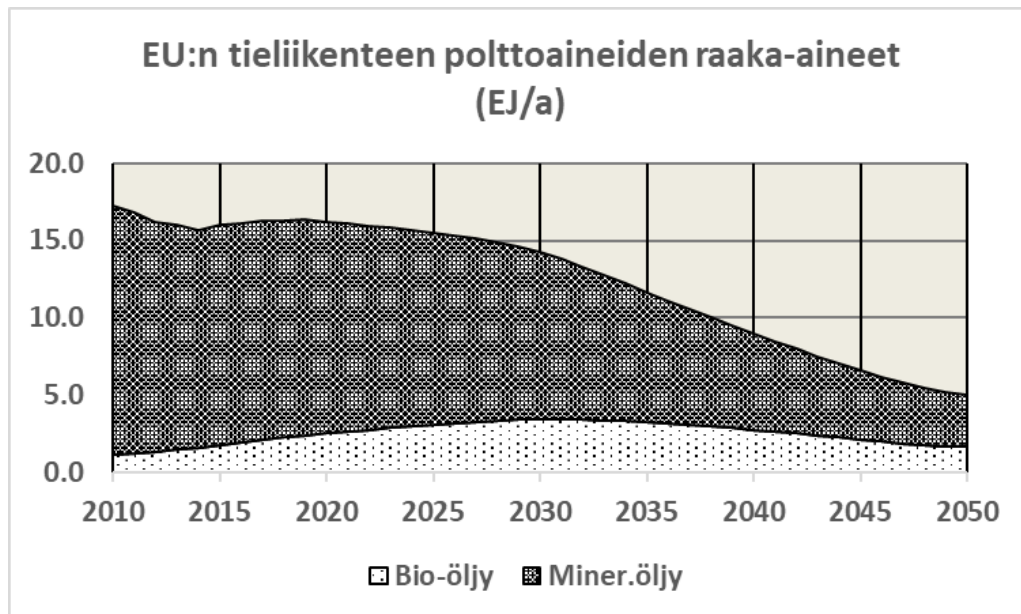


Kuva 8.3.3 EU:n henkilöautokanta (milj. kpl).

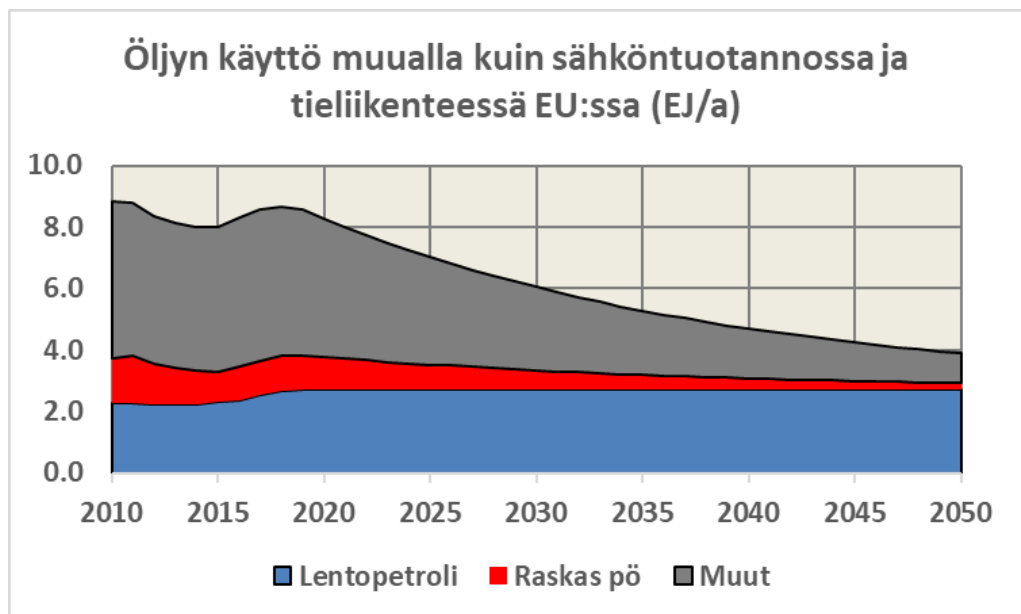


Kuva 8.3.4 EU:n liikepolttoaineiden käyttö autotyypeittäin (EJ/a).

Liikennepolttoaineita joudutaan tekemään myös uusiutuvista lähteistä esim. bioöljystä. Niiden osuus kasvaa koko ajan ja mineraaliöljyn osuus vähenee (Kuva 8.3.5). Muiden kuin sähköntuotannon ja liikenteen tarvitsemien öljytuotteiden kulutus EU:ssa vähenee nykyisestä 8 EJ/a arvoon 4 EJ/a vuoteen 2050 mennessä (Kuva 8.3.6).

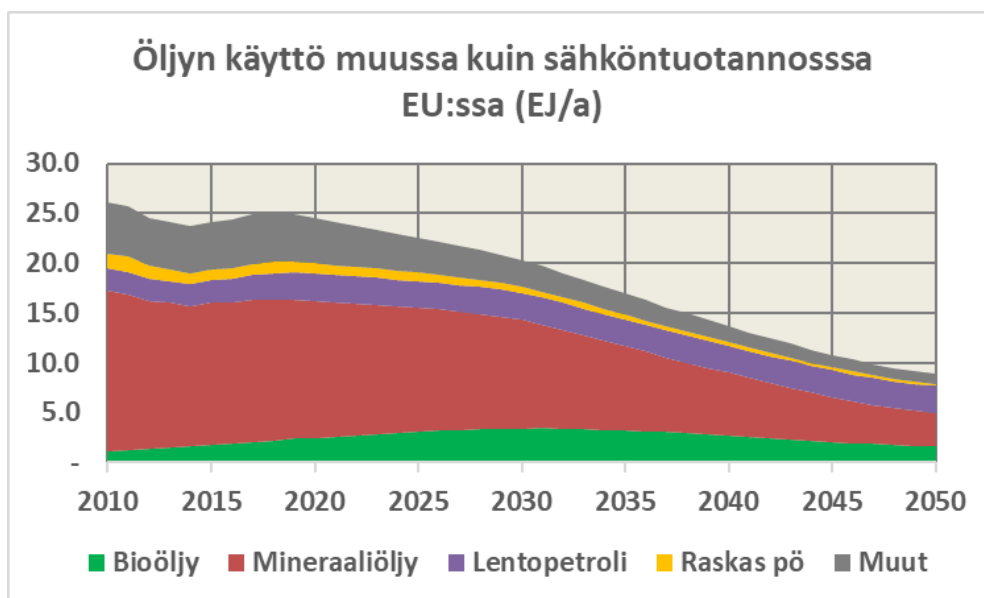


Kuva 8.3.5 Öljytuotteiden käyttö liikenteessä EU:ssa (EJ/a).

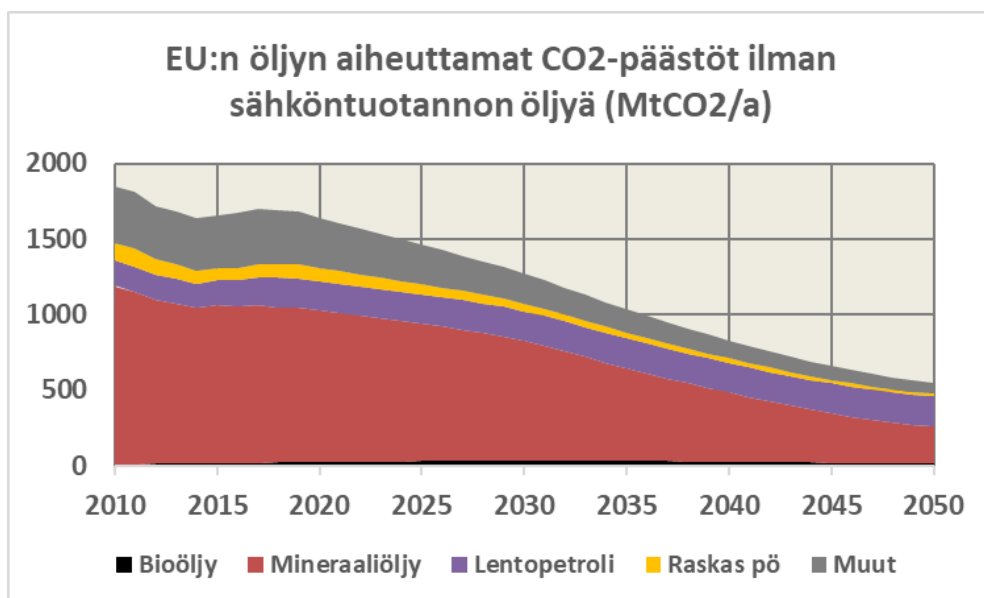


Kuva 8.3.6 Öljytuotteiden käyttö muussa kuin sähköntuotannossa ja liikenteessä EU:ssa (EJ/a).

Kaikkien öljyalaatujen käyttö laskee nykyisestä 25 EJ/a noin arvoon 9 EJ/a vuonna 2050 (Kuva 8.3.7). Bioöljyn osuus öljyn kokonaiskäytöstä nousee 27 %:iin vuoteen 2050 mennessä. Öljyn aiheuttamat CO₂-päästöt pienevät EU:ssa nykyisestä 1680 MtCO₂/a vuoteen 2050 mennessä arvoon 550 Mt/a eli 67 % (Kuva 8.3.8). Suurimmat päästöjen aiheuttajat ovat autojen käyttämä mineraaliöljy ja lentokoneiden käyttämä lentopetroli.



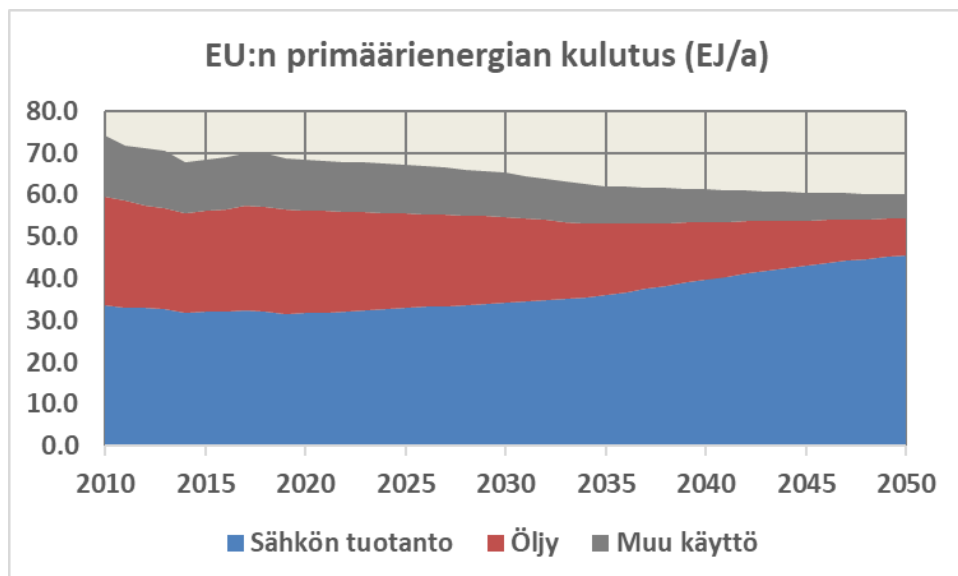
8.3.7 EU:n öljytuotteiden käyttö (EJ/a).



Kuva 8.3.8 Öljyn aiheuttamat CO₂-päästöt EU:ssa ilman sähköntuotannon öljyä (MtCO₂/a).

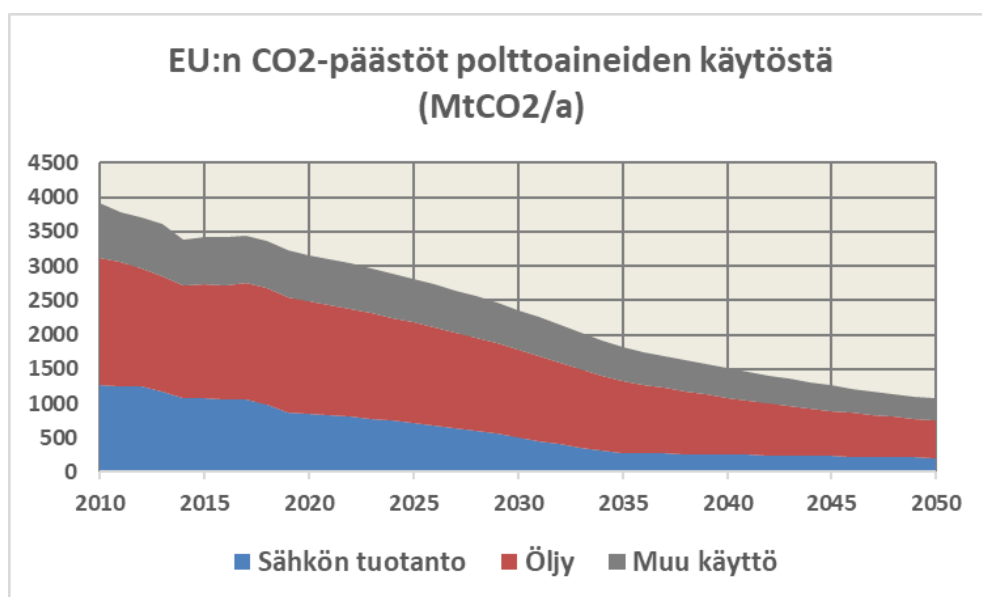
8.4 Energian kokonaiskulutus EU:ssa

Energian kokonaiskulutus vähenee EU:ssa tulevaisuudessa nykyisestä 69 eksajoulesta vuodessa arvoon 60 eksajoulea vuonna 2050 (Kuva 8.4.1).



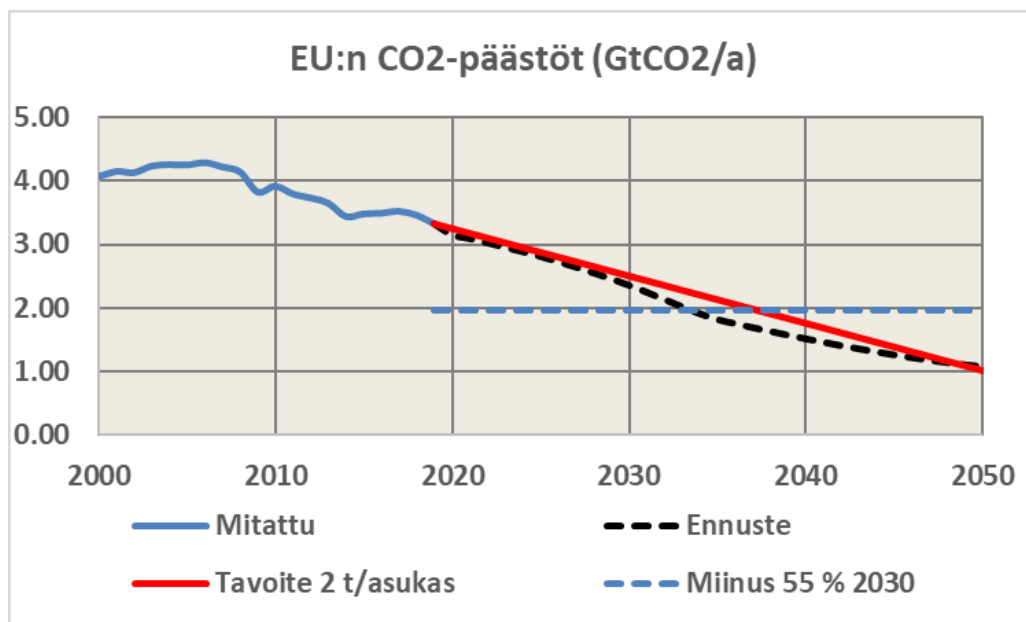
Kuva 8.4.1 Energian kokonaiskulutus EU:ssa (EJ/a).

EU:n CO₂-päästöt energiasektorista vähenevät nykyisestä noin 3220 miljoonasta tonnista noin 1070 miljoonaan tonniin eli noin 77 % vuoteen 2050 mennessä (Kuva 8.4.2). Se on karkeasti noin kaksi tonnia per asukas, joka oli tavoitteena, kun lämpötilan nousu halutaan rajoittaa kahteen asteeseen (Luku 6.1).



Kuva 8.4.2 EU:n CO₂-päästöt polttoaineiden käytöstä (MtCO₂/a).

Ennustettu päästöjen kehitys vastaa Tavoite 2 t/asukas -skenaariota (Kuva 8.4.3). Vuonna 2050 olisi noin 1,0 GtCO₂/a eli noin kaksi tCO₂/asukas. Ennusteen mukaan päästöt ovat vuonna 2030 noin 2,4 gigatonnia, joka on noin 45 % vähemmän kuin vuonna 1990, jolloin päästöt olivat 4,35 gigatonnia. Se on kuitenkin noin 20 % enemmän kuin EU:n 55 % vähennystavoite vuodelle 2030, jolloin päästöjen tulisi olla alle 2 gigatonnia. Ennusteen mukaan 55 %:n vähennys saavutettaisiin vasta vuonna 2034.



Kuva 8.4.3 Ennuste EU:n CO₂-päästöistä (MtCO₂/a).

Suurin CO₂-päästöjen aiheuttaja on nyt ja tulevaisuudessa öljy (Taulu 8.4.1). Se aiheuttaa noin 52 % nykyisistä ja 51 % vuoden 2050 CO₂-päästöistä. Ilman öljyn käytön radikaalia vähennystä kaikki päästötavoitteet voidaan unohtaa. Siihen on kuitenkin hyvät mahdollisuudet, kunhan liikenne muuttuu sähköiseksi ja dieselautojen polttoaineet korvataan biopohjaisilla tai synteettisillä tuotteilla.

Taulu 8.4.1 EU:n CO₂-päästöt polttoaineiden käytöstä (MtCO₂/a).

EU	Päästöt		Päästöt			Osuudet		
	2019	2050	Muutos	Muutos/a	Muutos	2019	2050	Muutos
Lähde	MtCO ₂	MtCO ₂	MtCO ₂	MtCO ₂ /a	%	%	%	%-yks.
Sähkö	857	207	-650	-21	-75.9%	26.6%	19.3%	-7.3%
Öljy	1682	549	-1133	-37	-67.4%	52.2%	51.3%	-1.0%
Muu käyttö	681	315	-366	-12	-53.7%	21.2%	29.4%	8.3%
Yhteensä	3221	1071	-2150	-69	-66.7%	100.0%	100.0%	

Yhteenveto

EU voi päästä tavoitteena olevaan CO₂-päästöjen tasoon 2 tonnia per asukas, johon päästään, kun CO₂-päästöjä vähennetään 4 prosenttia vuosittain. EU:n tavoite 55 % vähennys vuoden 1990 tasosta vuoteen 2030 mennessä tarkoittaisi, että päästöjä vähennetään noin 7 % vuosittain. Siihen ei ole enää mahdollista päästä.

Tavoitteeseen 2 tonnia per asukas vuonna 2050 voidaan vielä päästä edellyttäen, että:

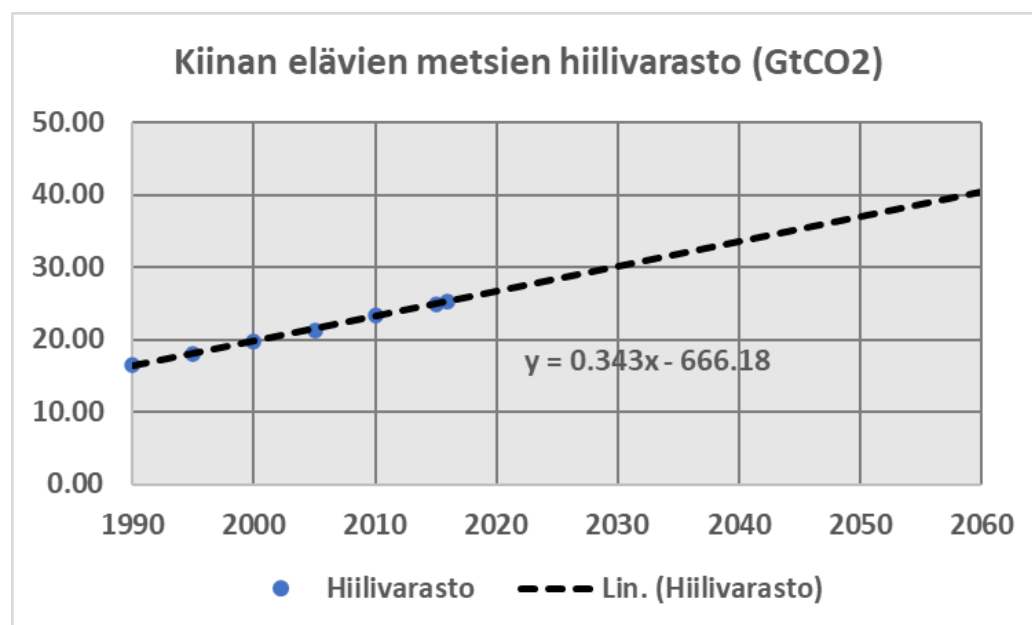
- 1) Sähköntuotanto muutetaan lähes päästöttömäksi lisäämällä uutta tuuli- ja aurinkovoimaa vastaavasti noin 44 TWh ja 30 TWh joka vuosi.
- 2) Liikenne muutetaan päästöttömäksi siten, että vuoden 2030 jälkeen polttomoottorikäyttöisten henkilöautojen myynti lopetetaan ja kuorma- ja pakettiautoille myytävä dieselpolttoaineen sekoitusvelvoite on vähintään 30 %.
- 3) Kotitaloudet siirtyvät kevyestä polttoaineesta ja maakaasusta sähköön ja lämpöpumppulämmitykseen.
- 4) EU:n metsien hiilinielu nostetaan vähintään 500 miljoonaa tonnia CO₂ vuodessa vastaavaksi.
- 5) EU laajentaa päästöoikeuksien kauppaa liikenteen polttoaineisiin ja hiilinieluihin sekä ottaa käyttöön hiilitullit.

9. TAVOITEOHJELMA KIINALLE

9.1 Tavoitteet Kiinalle

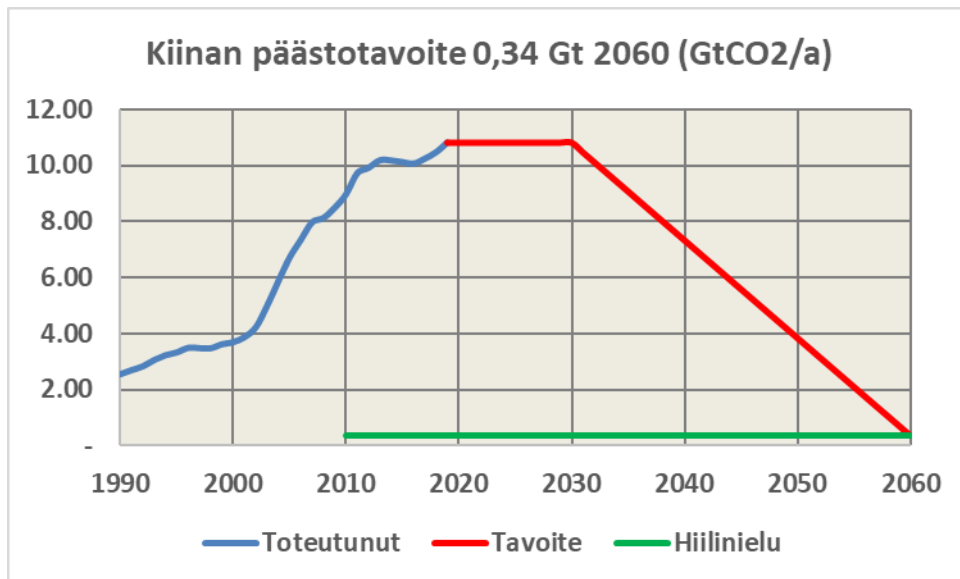
Tiistaina 22.9.2020 Kiinan presidentti **Xi Jinping** ilmoitti, että Kiina alkaa vähentää CO₂-päästöjään ennen vuotta 2030 ja haluaa olla hiilineutraali vuonna 2060. Hiilineutraalisuus merkitsisi EU:n ja Suomen mukaan, että päästöt saisivat olla korkeintaan yhtä suuret kuin metsien hiilinielut.

Kiinan metsien hiilinielut ovat vuosina 1990–2015 olleet keskimäärin 340 MtCO₂/a (Kuva 9.1.1). Metsien hiilimäärä on kasvanut 1,4 % vuodessa eli enemmän kuin EU:ssa, jossa kasvu oli 1,1 % vuodessa. Kiinassa on vuonna 2060 noin 1400 miljoonaa asukasta, jolloin hiilinielut ovat noin 0,24 tCO₂/asukas. Vuonna 2060 päästöt saisivat olla yhtä suuret kuin hiilinielut eli noin 340 gigatonnia vuodessa. Kuitenkin Kiinassa on myös runsaasti CH₄- ja N₂O-päästöjä, jotka saattavat olla hiilinieluja suuremmat, jolloin CO₂-päästöjen tulisi mennä lähelle nollaa.



Kuva 9.1.1 Kiinan metsien hiilinielun ennuste (GtCO₂/a).

Tavoite hiilineutraalisuudesta EU:n mallin mukaan edellyttää, että vuoden 2030 jälkeen Kiina joutuu vähentämään päästöjään noin 350 miljoonaa tonnia joka vuosi (Kuva 9.1.2). Tällä ohjelmalla Kiina laskee päästönsä tasolle 2.8 gigatonnia eli 2 t/asukas vuoteen 2053 mennessä, jolloin olisi lähes muun maailman aikataulussa.



Kuva 9.1.2 Kiinan CO₂-päästöt (GtCO₂/a).

Kiinan tavoitteena on rakentaa runsaasti ydinvoimaa, jonka vuoksi 10 vuoden siirtymäaika tarvitaan, koska ydinvoimalaitosten suunnitteleminen ja rakentaminen kestää tyypillisesti 10 vuotta. Sen sijaan tuuli- ja aurinkovoiman rakentaminen tapahtuu nopeammin.

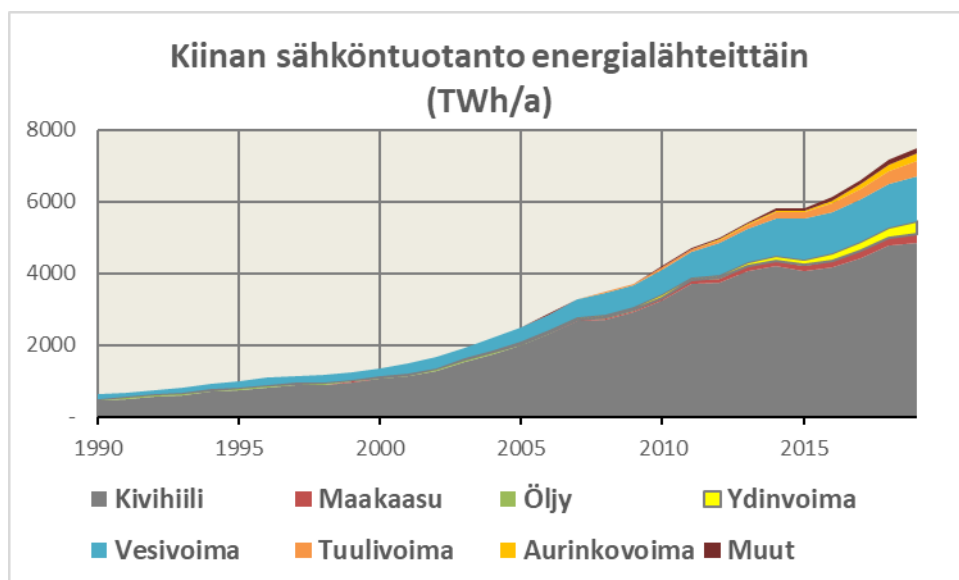
9.2 Kiinan sähköntuotanto

Kiinan sähköntuotanto on kasvanut vuoden 1990 jälkeen energiamäärästä 620 TWh arvoon 7500 TWh eli 12-kertaiseksi (Taulu 9.2.1). Kiinaan on rakennettu keskimäärin joka vuosi 113 TWh hiilivoimasähköä eli tehossa laskettuna noin 16.000 MW (Suomen voimalaitoskanta) joka vuosi.

Taulu 9.2.1 Kiinan sähköntuotannon kasvu vuodesta 1990 lähtien (TWh)

Kiina Lähde	Sähkömäärä		Sähkömäärä		Osuudet		
	1990 TWh	2019 TWh	Muutos TWh	Muutos/a TWh/a	1990 %	2019 %	Muutos %
Kivihiili	441	4854	4412	113	71.0%	64.7%	-6.3%
Maakaasu	3	236	234	6	0.4%	3.2%	2.7%
Öljy	50	6	-44	-1	8.1%	0.1%	-8.0%
Ydinvoima	-	349	349	9	0.0%	4.6%	4.6%
Vesivoima	127	1270	1143	29	20.4%	16.9%	-3.5%
Tuulivoima	-	406	406	10	0.0%	5.4%	5.4%
Aurinkovoima	^	224	224	6	0.0%	3.0%	3.0%
Muut	0	159	159	4	0.0%	2.1%	2.1%
Yhteensä	621	7503	6882	176	100.0%	100.0%	0.0%

Suurin kasvu on tapahtunut vuoden 2000 jälkeen, jolloin kivihiilivoiman tuotanto lisääntyi arvosta 1660 TWh arvoon 4850 TWh (Kuva 9.2.1). Kasvu oli 3190 TWh eli 168 TWh vuodessa. Sen mukaan Kiinassa rakennettiin joka vuosi 24.000 MW uutta kivihiilivoimatehoa eli yksi 500 MW:n hiilivoimala joka viikko.



Kuva 9.2.1 Kiinan sähköntuotanto energialähteittäin (TWh).

Vaikka ydinvoimaa, tuulivoimaa ja aurinkovoimaa näyttää kuvan mukaan olevan hyvin vähän, niitä tuotettiin 350 TWh, 410 TWh ja 220 TWh vastaavasti vuonna 2019. Ydinvoimamäärä vastasi 47 GW ydinvoimatehoa. Kiinassa on 49 käytössä olevaa ydinreaktoria, joka on kolmanneksi eniten maailmassa Yhdysvaltojen (95 kpl) ja Ranskan (56 kpl) jälkeen. Ydinvoimalaitoksia on rakenteilla nyt 15 kappaletta. Niistä useimmat ovat ranskalaisesta kolmiluoppisesta painevesireaktorilaitoksista kehitettyjä HPR-1000-yksiköitä, jotka on varustettu nykyaikaisilla suojarasteilla.

Kulutuksen kasvu on ollut 2010-luvulla 380 TWh vuodessa. Kulutus kasvaa tulevaisuudessa noin 320 TWh vuodessa ja nousee arvoon 12.500 TWh vuonna 2050. Se olisi noin 9 MWh/asukas.

Vuonna 2050 Kiinassa on noin 400 miljoonaa sähköautoa, joiden sähkönkulutus on noin 800 TWh. Kiinassa voisi vuonna 2050 olla noin 400 miljoonaa lämpöpumppua, joiden sähkön kulutus on noin 800 TWh. Teollisuuden sähkönkulutus kasvaa noin 3500 TWh, jolloin Kiinan sähkönkulutus vuonna 2050 olisi noin 5100 TWh suurempi kuin vuonna 2019.

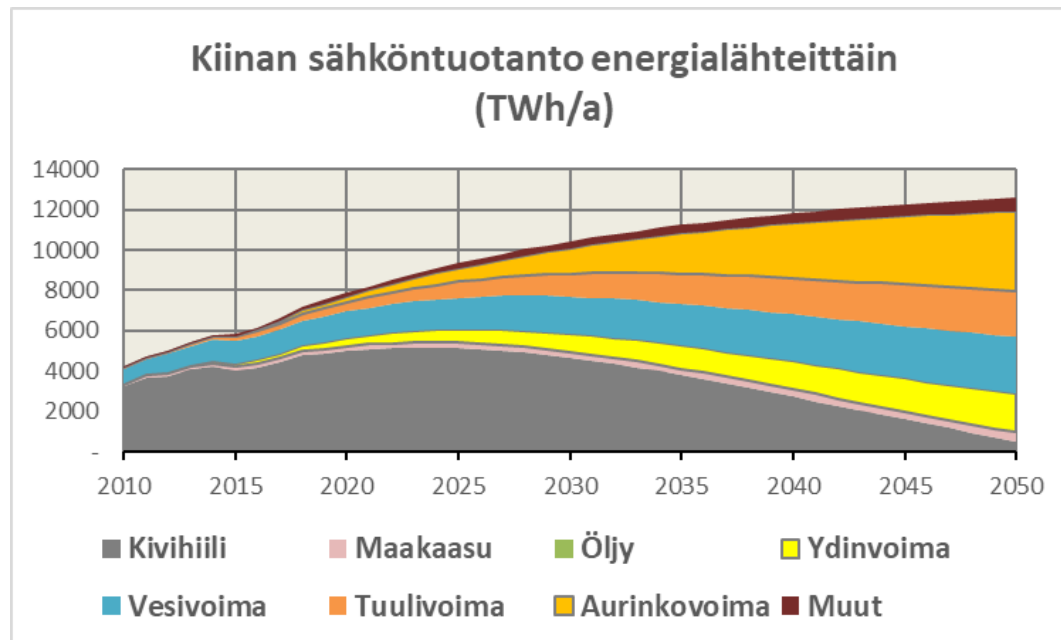
Eniten kasvaisivat aurinkovoiman (120 TWh/a) ja tuulivoiman (60 TWh/a) tuotannot (Taulu 9.2.2). Verrattuna vuoden 2019 lisäyksiin, jotka olivat 47 TWh (aurinko) ja 40 TWh (tuuli), aurinkovoiman rakentamistahti olisi 2,5-kertainen ja tuulivoiman 1,5-kertainen.

Taulu 9.2.2 Kiinan sähköntuotanto vuoteen 2050 asti (TWh/a).

Kiina Lähde	Sähkömäärä		Sähkömäärä			Osuudet		
	2019 TWh	2050 TWh	Muutos TWh	Muutos/a TWh/a	Muutos %	2019 %	2050 %	Muutos %
Kivihiili	4854	533	-4320	-139	-89%	64.7%	4.2%	-60.4%
Maakaasu	236	428	192	6	81%	3.2%	3.4%	0.3%
Öljy	6	3	-3	0	-47%	0.1%	0.0%	-0.1%
Ydinvoima	349	1899	1550	50	445%	4.6%	15.1%	10.5%
Vesivoima	1270	2820	1550	50	122%	16.9%	22.4%	5.5%
Tuulivoima	406	2259	1853	60	457%	5.4%	18.0%	12.6%
Aurinkovoima	224	3975	3751	121	1676%	3.0%	31.6%	28.6%
Muut	159	650	491	16	308%	2.1%	5.2%	3.1%
Yhteensä	7503	12567	5064	163	67%	100.0%	100.0%	0.0%
Uusiutuvat	2059	9704	7645	247	371%	27.4%	77.2%	49.8%

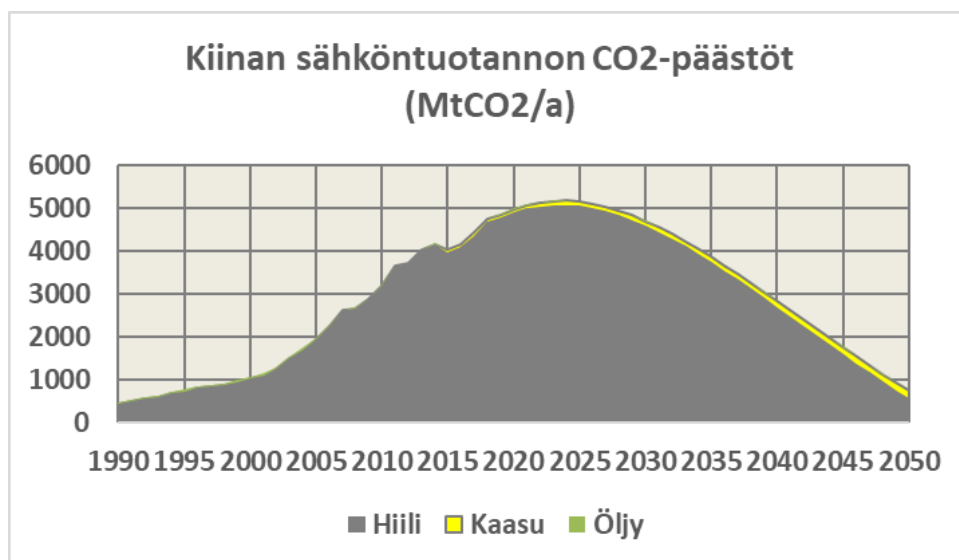
Myös ydinvoiman ja vesivoiman tuotanto kasvaisivat vastaavasti noin 50 TWh vuodessa kumpikin. Se tarkoittaisi ydinvoiman kohdalla noin viittä uutta 1100 MW:n ydinvoimalaa joka vuosi. Vuoden 2019 lisäykset olivat ydinvoimalla 50 TWh ja vesivoimalla 70 TWh.

Hiilivoimaa poistettaisiin käytöstä vastaavasti noin 140 TWh vuosittain, joten ydinvoima, tuulivoima ja vesivoima riittäisivät hiilivoiman korvaajiksi. Aurinkovoiman avulla tuotantoa lisättäisiin.

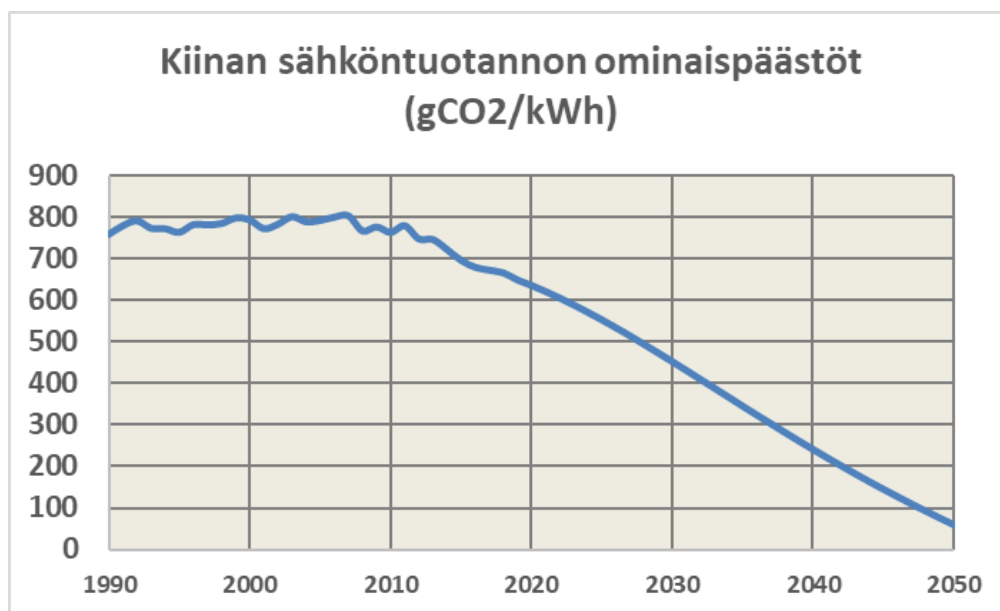


Kuva 9.2.2 Kiinan sähköntuotanto energialähteittäin vuoteen 2050 asti (TWh/a).

Sähköntuotannon CO₂-päästöt saavuttaisivat huippunsa vuonna 2025, jolloin päästöjä olisi 5050 GtCO₂/a (Kuva 9.2.3). Tämän jälkeen päästöt putoaisivat vuoteen 2050 mennessä arvoon 740 GtCO₂/a, joka olisi samaa luokkaa kuin vuonna 1990. Kiinan sähköntuotannon ominaispäästöt laskisivat nykyisestä noin 650 g/kWh arvoon 60 g/kWh vuonna 2050 (Kuva 9.2.4).



Kuva 9.2.3 Kiinan sähköntuotannon päästöt (MtCO₂/a).

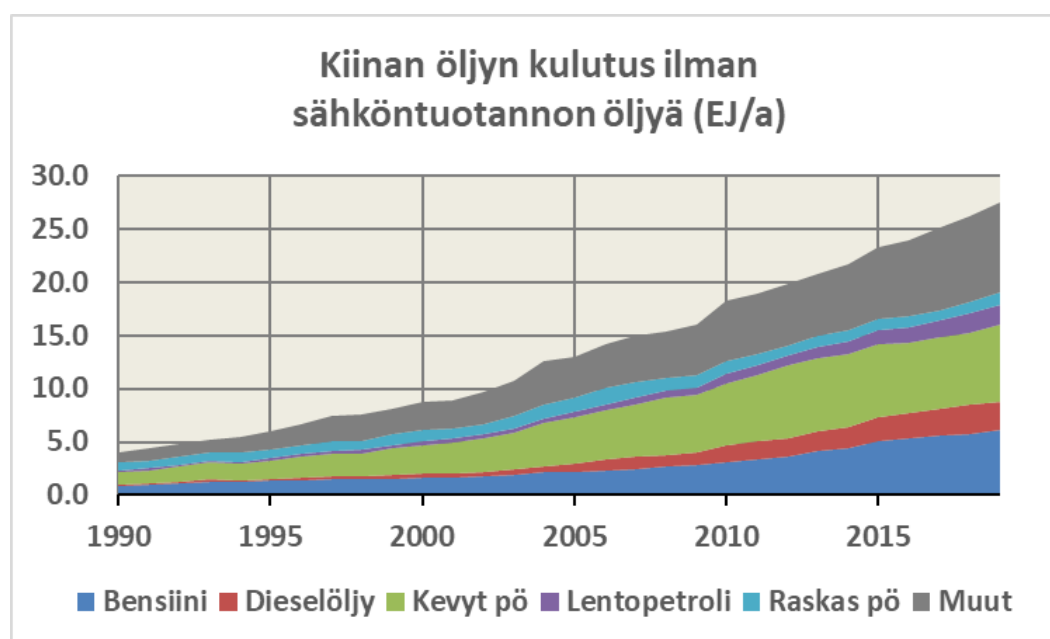


Kuva 9.2.4 Kiinan sähköntuotannon ominaispäästöt (gCO₂/kWh).

9.3 Kiinan öljynkulutus

Kiinan öljynkulutus on kasvanut vuoden 1990 jälkeen huimasti noin neljästä eksajoulesta vuonna 1990 noin 27 eksajouleen vuonna 2019 (Kuva 9.3.1). Kiinan öljyn käyttö on nyt samansuuruista kuin EU:n öljyn käyttö oli vuonna 2000.

Vuoden 2010 jälkeen kasvu on ollut noin yksi eksajoule vuodessa (Taulu 9.3.1). Eniten ovat kasvaneet bensiinin (0,33 EJ/a) ja muun öljyn kulutukset (0,3 EJ/a). Suurinta öljyn käyttö oli vuonna 2019 tuotteissa muut (31 %), kevyt polttoöljy (26 %) ja bensiini (22 %).



Kuva 9.3.1 Kiinan öljynkulutus tuotteittain ilman sähköntuotannon öljyä (EJ/a).

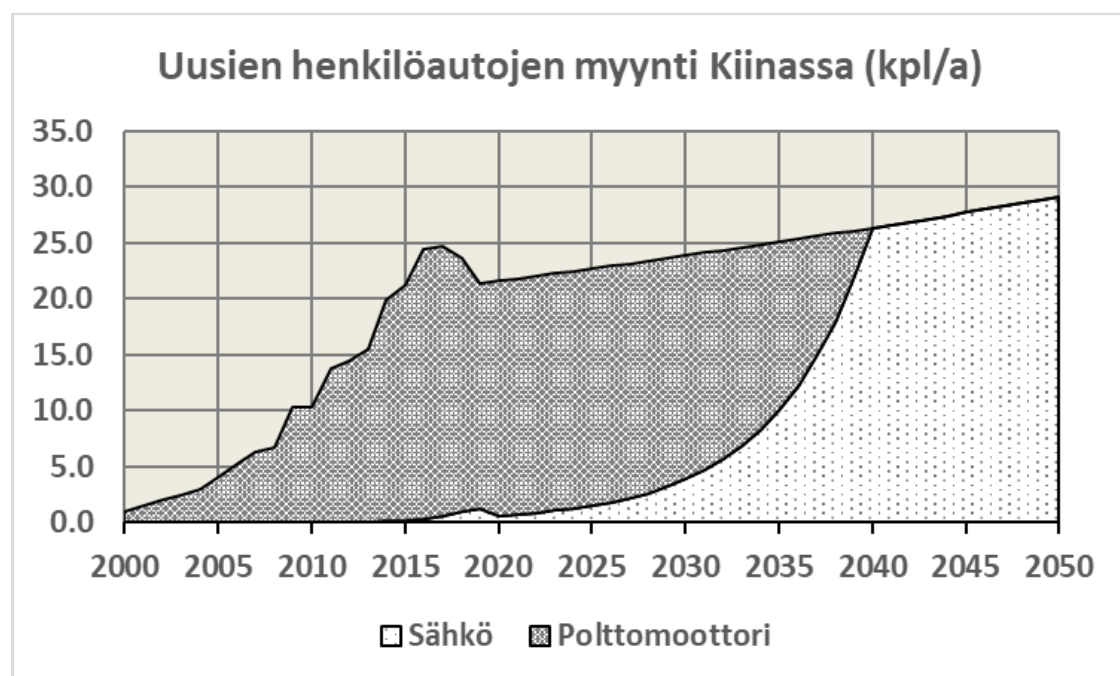
Taulu 9.3.1 Kiinan öljynkulutus tuotteittain ilman sähköntuotannon öljyä (EJ/a).

Kiina Tuote	Energiamäärä		Energiamäärä			Osuudet		
	2010	2019	Kasvu	Kasvu/a	Kasvu-%	2010	2019	Muutos
	EJ	EJ	EJ	EJ/a	%	%	%	%-yks.
Bensiini	3.13	6.06	2.94	0.33	94.0%	17.1%	22.0%	4.9%
Dieselöljy	1.53	2.73	1.20	0.13	78.8%	8.4%	9.9%	1.6%
Kevyt polttoöljy	5.90	7.25	1.35	0.15	22.8%	32.3%	26.3%	-6.0%
Lentopetroli	0.86	1.91	1.05	0.12	122.8%	4.7%	6.9%	2.2%
Raskas polttoöljy	1.16	1.13	-0.03	0.00	-2.6%	6.3%	4.1%	-2.2%
Muut	5.72	8.46	2.74	0.30	48.0%	31.3%	30.7%	-0.5%
Yhteensä	18.29	27.55	9.26	1.03	50.6%	100.0%	100.0%	0.0%

Uusien henkilöautojen myynti kasvaa Kiinassa nykyisestä 22 miljoonasta noin 28 miljoonaan autoon vuodessa (Taulu 9.3.2). Niistä 1,2 miljoonaa oli sähköautoja vuonna 2019 ja kaikki 27 miljoonaa uutta autoa olisivat sähköautoja vuonna 2040 (Kuva 9.3.2).

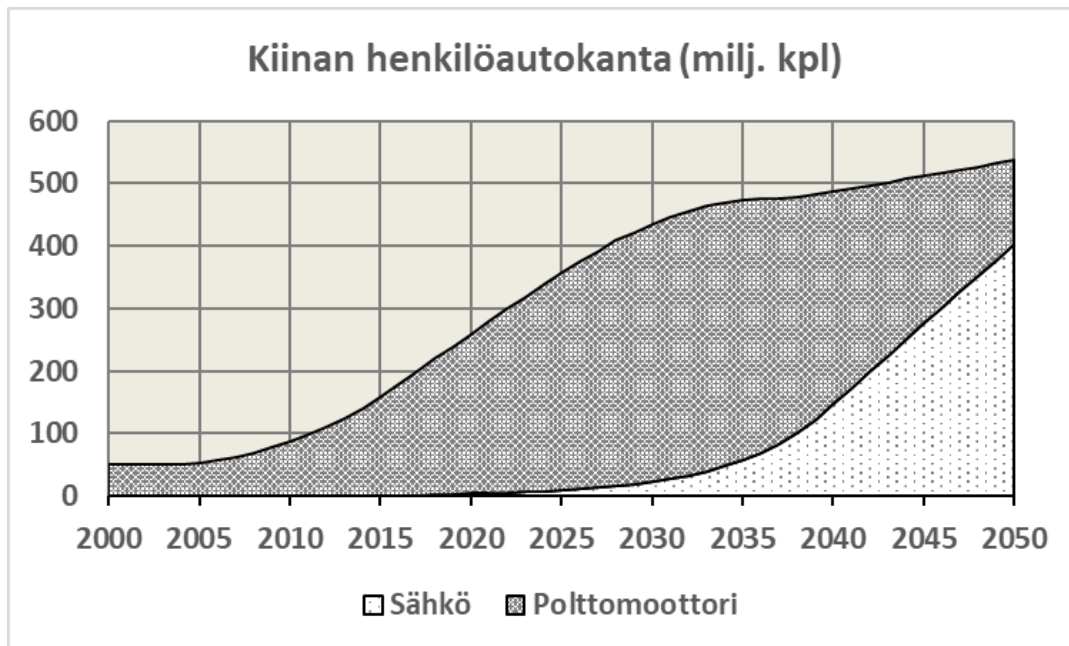
Taulu 9.3.2 Uusien henkilöautojen myynti Kiinassa (milj. kpl/a)

Kiina Tyyppi	Henkilöautojen myynti (milj. kpl/a)			
	2019	2050	Muutos	Muutos/a
Sähkö	1.2	29.1	27.9	0.9
Polttomoottori	20.2	0.0	-20.2	-0.7
Yhteensä	21.4	29.1	7.7	0.2



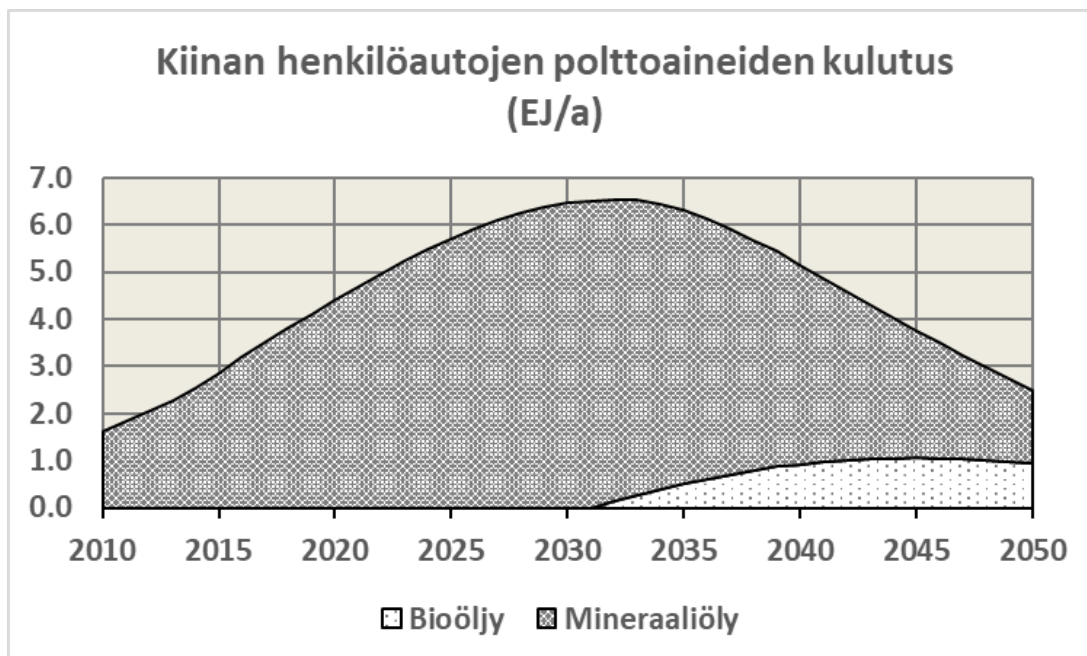
Taulu 9.3.2 Uusien henkilöautojen myynti Kiinassa (milj. kpl/a).

Henkilöajoneuvokanta kasvaa Kiinassa siten, että vuonna 2050 henkilöautoja on 530 miljoonaa kappaletta (Kuva 9.3.3). Autoista noin 400 miljoonaa (75 %) on vuonna 2050 sähköautoja.



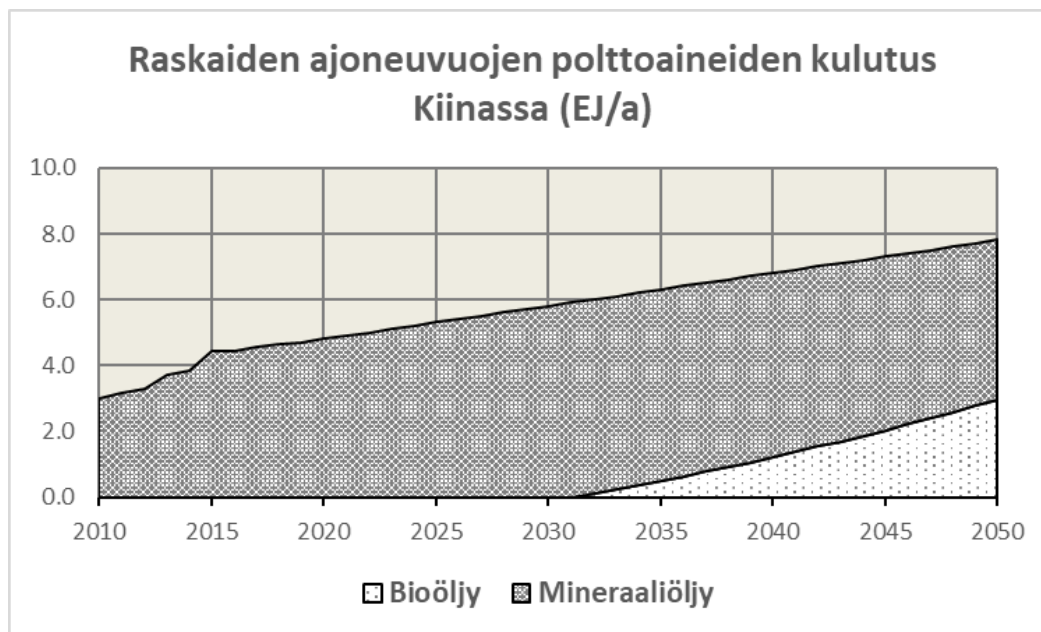
Kuva 9.3.3 Kiinan henkilöautokanta (milj. kpl).

Vuonna 2050 henkilöautojen käyttämästä polttoaineista noin 38 % olisi bioöljyä tai synteettistä polttoainetta (Kuva 9.3.4). Uskoisin, että Kiinassa kehitetään uusi tapa tehdä synteettistä polttoainetta vaikkapa ydinvoimalaitosten jätelämmöllä.

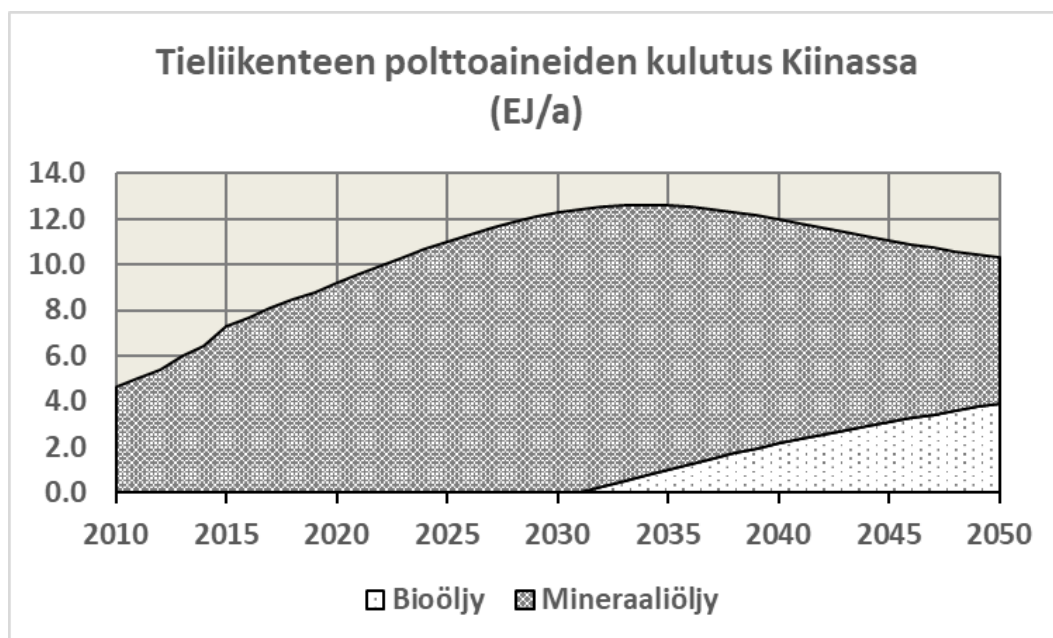


Kuva 9.3.4 Kiinan henkilöautojen polttoaineiden kulutus (EJ/a).

Raskaiden ajoneuvojen polttoaineen kulutus Kiinassa kasvaa edelleen selvästi ja vuoden 2030 jälkeen polttoaineiden mukaan tulevat bioöljy ja synteettiset polttoaineet (Kuva 9.3.5). Tieliikenteen polttoainekäyttö saavuttaa huippunsa vuonna 2035, mutta mineraaliöljyn kulutus alkaa laskea bioöljyn takia jo aiemmin (Kuva 9.3.6).

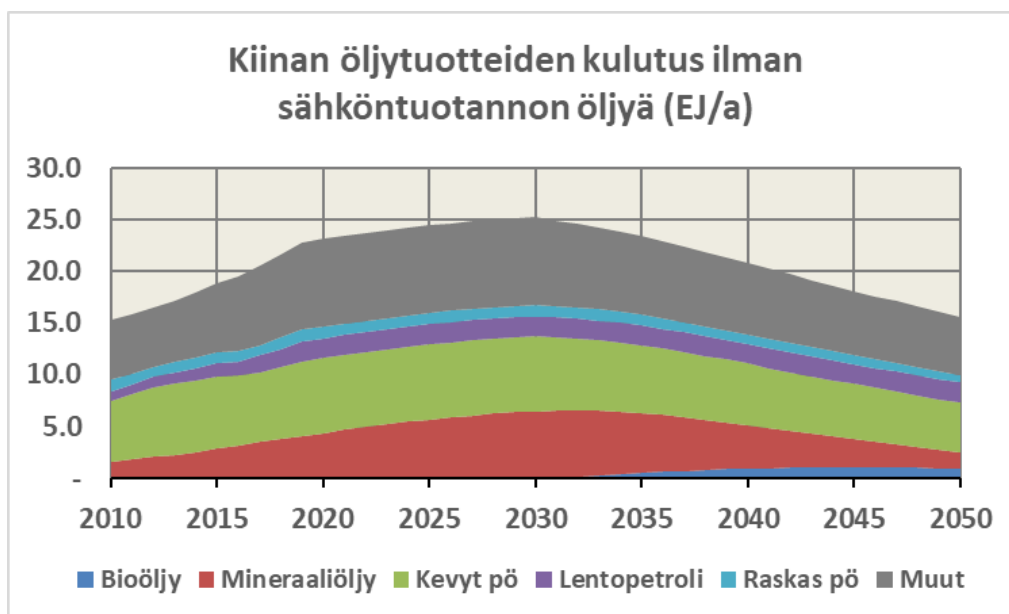


Kuva 9.3.5 Raskaiden ajoneuvojen polttoaineenkulutus Kiinassa (EJ/a).

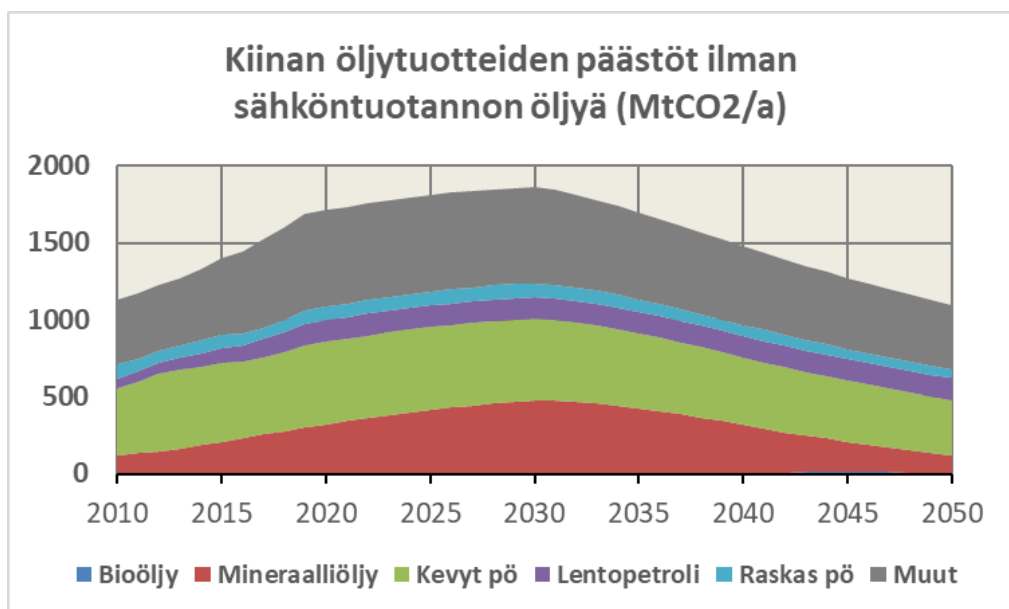


Kuva 9.3.6 Tieliikenteen polttoaineiden kulutus Kiinassa (EJ/a).

Kiinan öljytuotteiden kulutus ilman sähköntuotannon öljyä saavuttaa huippunsa vuonna 2030, jolloin öljyä käytetään 25 eksajoulea vuodessa (Kuva 9.3.7). Siitä kulutus laskee noin 16 eksajouleen vuoteen 2050 mennessä. Öljynkulutuksen aiheuttamat CO₂-päästöt nousevat vuonna 2030 huippuunsa 1,8 GtCO₂/a, josta ne laskevat arvoon 1.1 GtCO₂/a vuoteen 2050 mennessä (Kuva 9.3.8).



Kuva 9.3.7 Kiinan öljytuotteiden kulutus ilman sähköntuotannon öljyä (EJ/a).

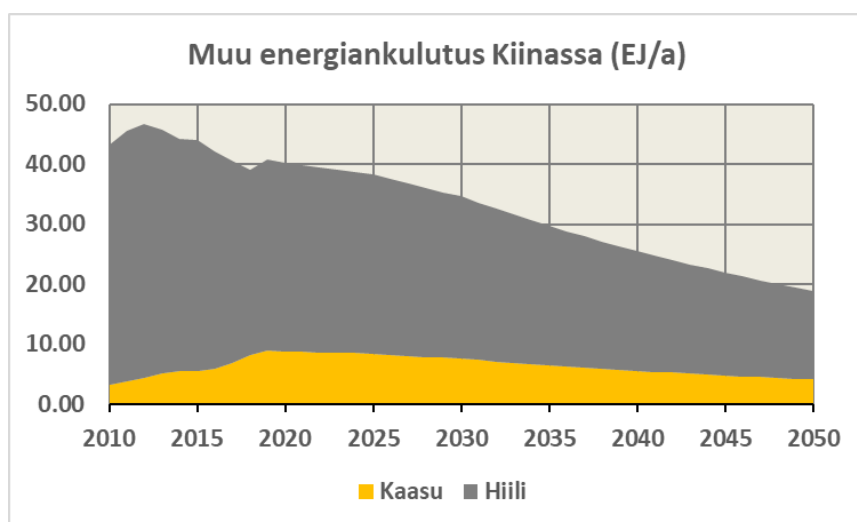


Kuva 9.3.8 Kiinan öljytuotteiden aiheuttamat CO₂-päästöt ilman sähköntuotannon öljyä (MtCO₂/a).

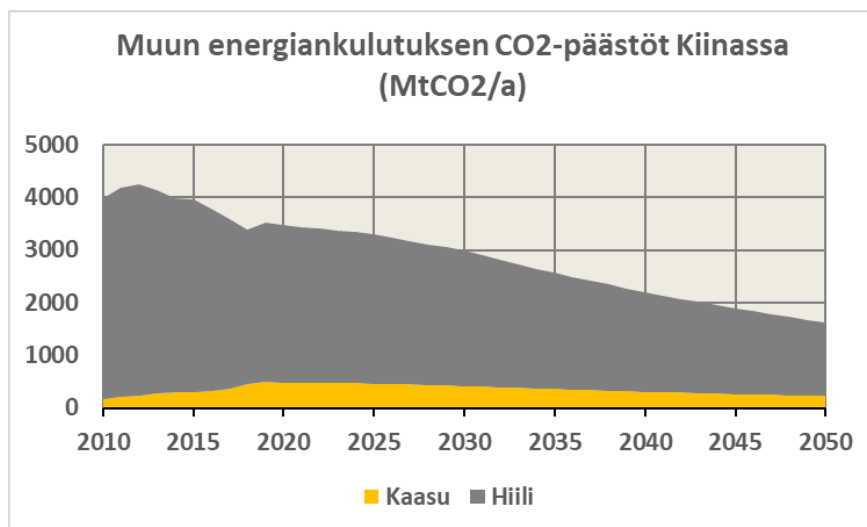
9.4 Kiinan muu energiankulutus

Muu energiankulutus on pääasiassa maakaasua ja kivihiiltä (Kuva 9.4.1). Kiinan kaupungeissa talot lämmitetään useammin kaukolämmöllä, jota kului vuonna 2016 noin 460 TWh (1,7 EJ/a). Tulevaisuudessa osa kaukolämmöstä tehdään kivihiilen sijasta ydinvoiman jätelämmöllä ja lämpöpumpuilla. Haiyang kaupungin lämmitys ydinvoimalasta aloitettiin vuonna 2019. Pientalojen lämmityksessä yleistyvät aurinkolämmittimet, joita on jo 20 miljoonassa kodissa.

Myös raudan valmistuksessa käytetään kivihiiltä. Muun energiankulutuksen CO₂-päästöt Kiinassa laskevat nykyisestä 3500 miljoonasta tonnista noin 1600 miljoonaan tonniin vuoteen 2050 mennessä (Kuva 9.4.2).



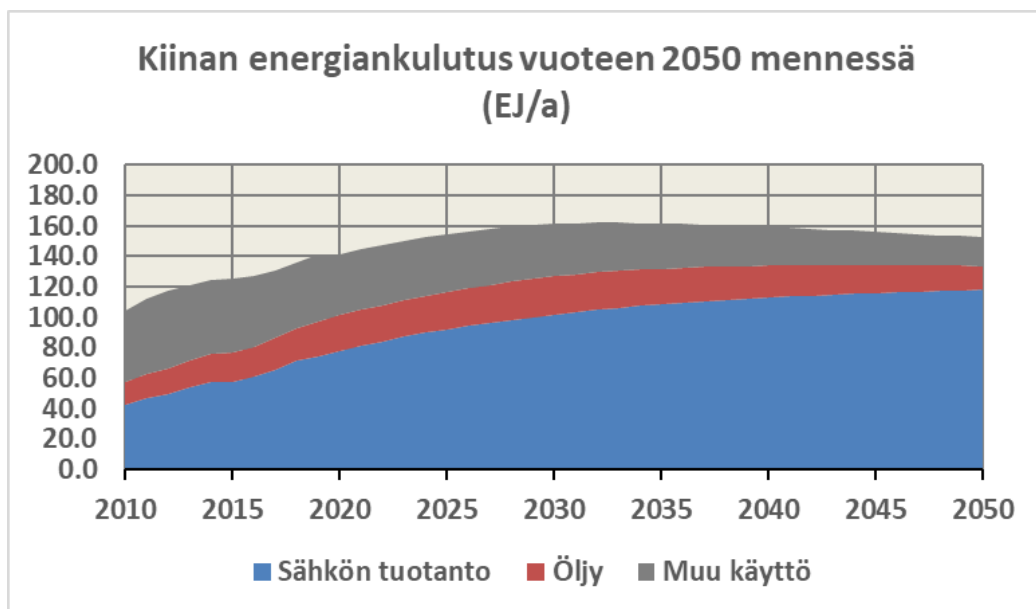
Kuva 9.4.1 Muu energiankulutus sähkön ja öljyn lisäksi Kiinassa (EJ/a).



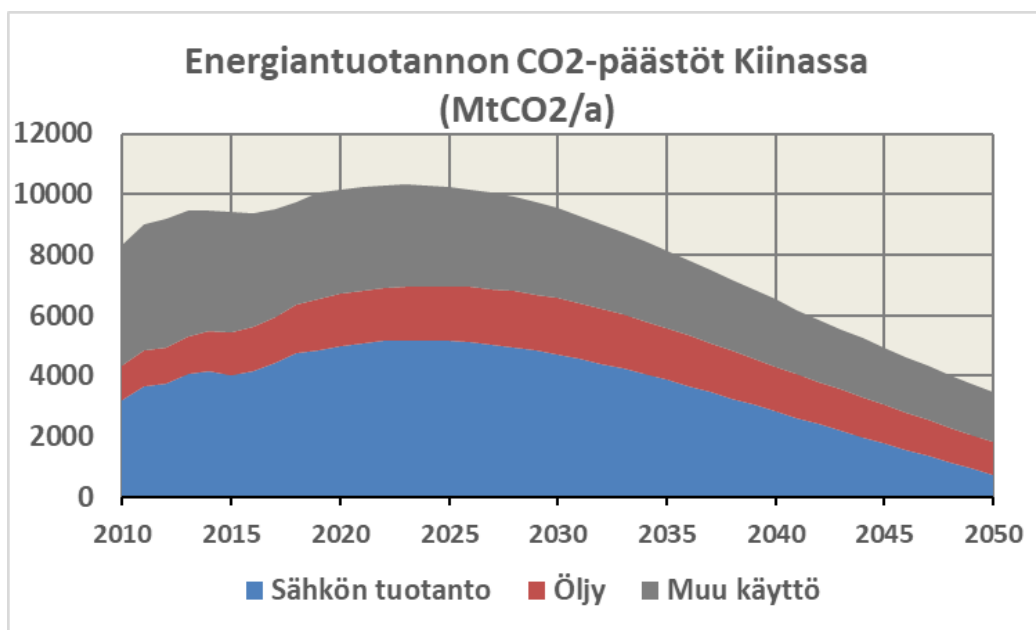
Kuva 9.4.2 Muun energiankulutuksen aiheuttamat CO₂-päästöt Kiinassa (MtCO₂/a).

9.5 Yhteenveto Kiinasta

Kiinan primäärienergian kulutus kasvaa nykyisestä 141 eksjoulesta noin 160 eksajouluun vuoteen 2035 mennessä ja laskevat sen jälkeen 150 eksajouluun vuoteen 2050 mennessä (Kuva 9.5.1). Kasvu kohdistuu pelkästään sähkön kulutukseen, kun öljyn ja muun energian käyttö vähenee.



Kuva 9.5.1 Kiinan energiankulutus (EJ/a).

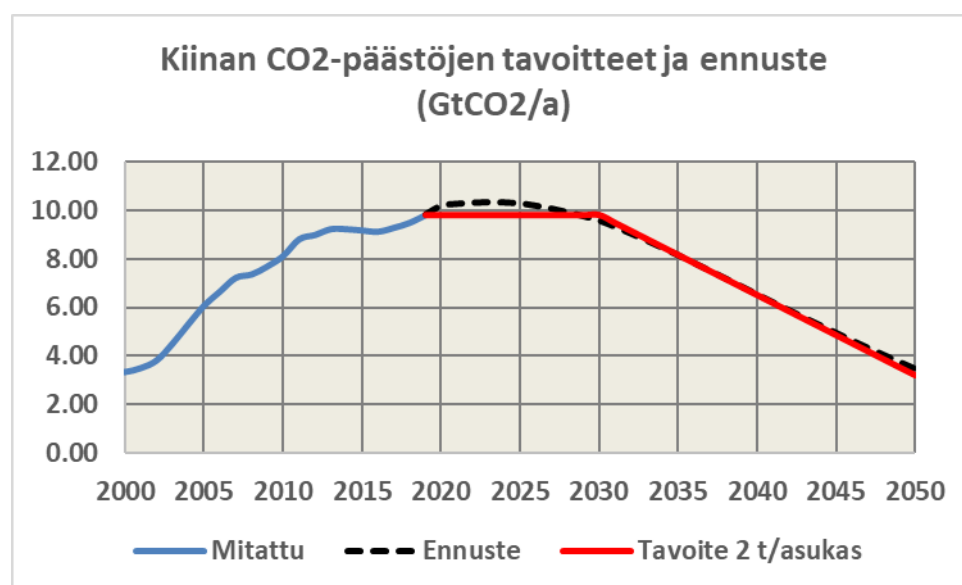


Kuva 9.5.2 Kiinan CO₂-päästöt energiantuotannosta (MtCO₂/a).

CO₂-päästöt laskevat nykyisestä 10 GtCO₂/a arvoon 3,5 GtCO₂/a eli noin 66 % (Kuva 9.5.2 ja Taulu 9.5.1). Eniten vähenevät sähköntuotannon päästöt (85 %). Öljyn käytöstä aiheutuvat päästöt ovat olleet pieniä verrattuna muiden maiden osuuksiin ja siksi niiden osuus päästöistä kasvaa. Kiinan päästöjen kehityksen ennuste vastaa Tavoite 2 t/asukas -skenaariota, jossa päästöjen väheneminen alkaa vasta vuoden 2030 jälkeen (Kuva 9.5.3).

Taulu 9.5.1 Kiinan CO₂-päästöt energian kulutuksesta (MtCO₂/a).

Kiina	Päästöt		Päästöt			Osuudet		
	2019	2050	Muutos	Muutos/a	Muutos	2019	2050	Muutos
Lähde	MtCO ₂	MtCO ₂	MtCO ₂	MtCO ₂ /a	%	%	%	%-yks.
Sähkö	4864	736	-4129	-133	-84.9%	48.3%	21.3%	-27.1%
Öljy	1690	1098	-592	-19	-35.0%	16.8%	31.8%	15.0%
Muu käyttö	3508	1623	-1884	-61	-53.7%	34.9%	47.0%	12.1%
Yhteensä	10062	3457	-6605	-213	-65.6%	100.0%	100.0%	0.0%



Kuva 9.5.3 Kiinan CO₂-päästöjen skenaariot ja ennuste (GtCO₂/a).

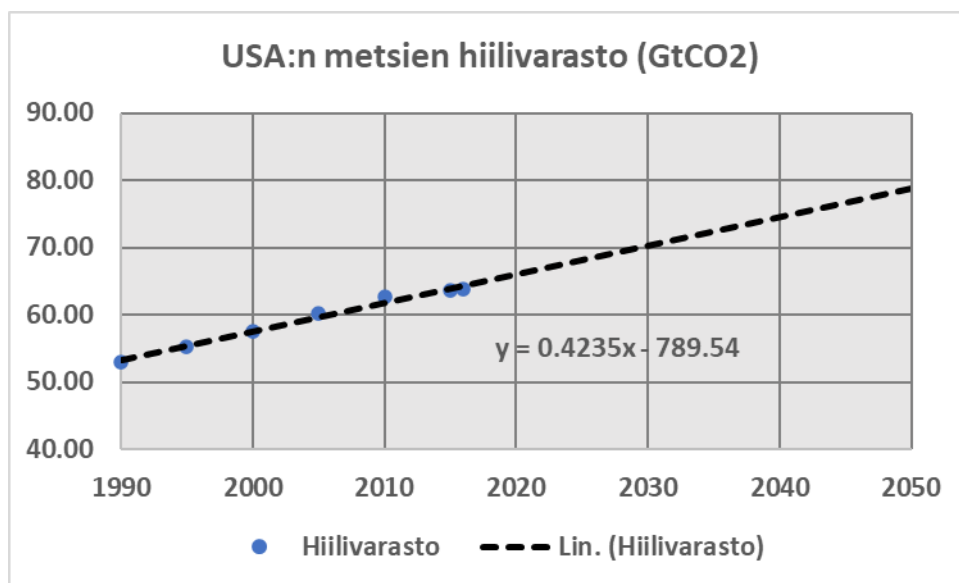
Kiina voi vähentää CO₂-päästöjä 68 % vuoteen 2050 mennessä, jos

- 1) Kiina rakentaa seuraavien vuosien aikana keskimäärin, joka vuosi 160 TWh aurinkovoimaa, 60 TWh tuulivoimaa ja 50 TWh ydinvoimaa ja vesivoimaa.
- 2) Liikenteen päästöjä vähennetään siten, että vuoden 2040 jälkeen myydään vain sähköautoja. Liikennepolttoaineiden sekaan lisätään bioöljyä tai biokaasua vuoden 2030 jälkeen.
- 3) Muun polttoaineiden käyttöä vähennetään rakentamalla kaukolämpöverkkoja ja muuttamalla kaukolämpö vähäpäästöiseksi esimerkiksi ydinkaukolämmön avulla.
- 4) Kiinaan asennetaan 200 miljoonaa lämpöpumppua vuoteen 2050 mennessä.
- 5) Pientalossa siirrytään käyttöveden lämmitykseen aurinkolämmittimien avulla.

10. TAVOITEOHJELMA USA:LLE

10.1 Tavoitteet USA:lle

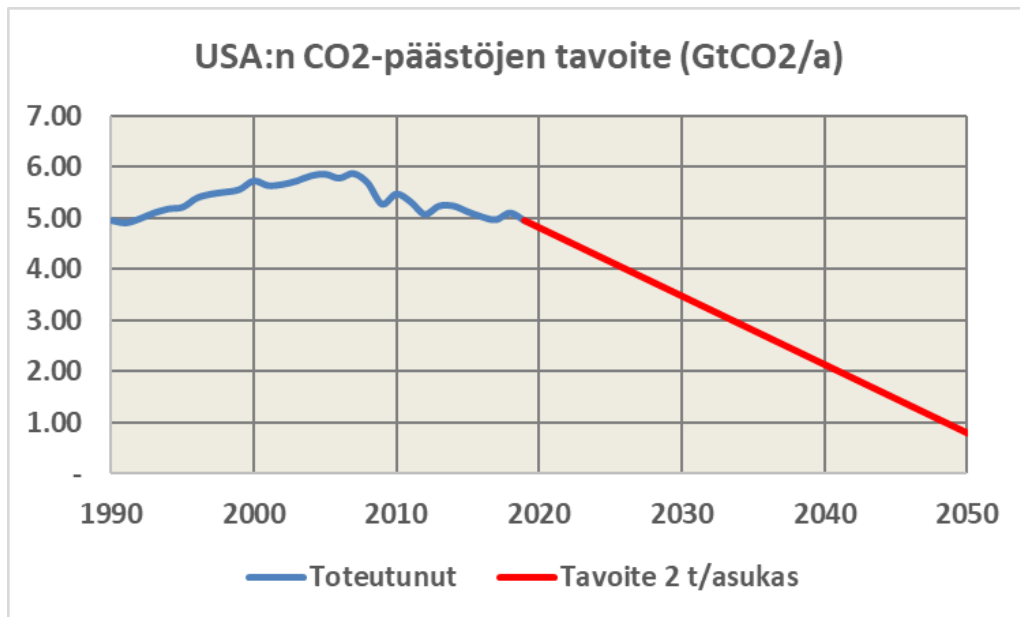
USA:lla ei presidentti Trumpin aikana ole ollut tavoitteita CO₂-päästöjen vähentämiselle muuten kuin osavaltiokohtaisesti. USA:n elävien metsien hiilivarasto vuosina 1990–2016 kasvanut noin 424 miljoonaa tonnia vuosittain (Kuva 10.1.1). Hiilivaraston kasvu on metsien hiilivarastoon verrattuna vain 0,6 % vuodessa, kun se on EU:ssa ollut noin 1,1 % vuodessa. Jos USA:ssa on vuonna 2050 noin 407 miljoonaa asukasta, hiilinielu on noin 1,0 tonnia CO₂ asukasta kohti.



Kuva 10.1.1 Elävien metsien hiilivarasto USA:ssa (GtCO₂, Lähde Fao).

USA:n tavoitteena tulee olla laskea CO₂-päästöt vuoteen 2050 mennessä tasolle 2 tonnia per asukas. USA:ssa on vuonna 2050 noin 407 miljoonaa asukasta, jolloin CO₂-päästöjä saa olla korkeintaan 814 miljoonaa tonnia eli 0,8 GtCO₂ (Kuva 10.1.2).

Tavoiteohjelma USA:lle on vaativa, mutta ei mahdoton. USA on rikas valtio, joka pystyy investoimaan puhtaisiin energialähteisiin, jos haluaa tosissaan. Toisaalta USA:ssa on vahva öljy- ja kaasulobby, jotka vastustavat toimialansa alasajoa. Niin on vain tehtävä, jotta ilmastonmuutos voidaan rajoittaa kahteen asteeseen. Onneksi presidentiksi tulee vuoden 2021 alussa **Joe Biden**, joka on ryhtymässä tosi toimiin päästöjen vähentämiseksi. Ensimmäisiä toimia hänellä on viedä USA takaisin Pariisin ilmastopöytäkirjan velvoitteisiin.



Kuva 10.1.2 Tavoiteohjelma USA:n päästöille (GtCO₂/a).

USA:n tavoitteen toteutuminen ei jää resursseista eikä osaamisesta kiinni. USA:lla on mahtava tuulivoiman ja aurinkovoiman potentiaali. Sillä on edistyneitä sähköautojen valmistajia kuten **Tesla**. Sillä on myös edistyksellisiä sähkön ostajia, kuten Google, joka ostaa jatkossa Haminan datakeskuksen tarvitseman sähkönsä Suomessakin Ilmattaren tuulivoimaloista.

10.2 USA:n sähköntuotanto

USA:n sähköntuotanto on kasvanut vuodesta 1990 vuoteen 2019 mennessä noin 36 % (Taulu 10.2.1). Eniten on kasvanut maakaasusähkön tuotanto (1300 TWh), kun kivihiilen tuotanto on vähentynyt samalla aikavälillä 670 TWh.

Taulu 10.2.1 USA:n sähköntuotanto energialähteittäin (TWh).

USA Lähde	Energiamäärä		Energiamäärä			Osuudet		
	1990 TWh	2019 TWh	Muutos TWh	Muutos/a TWh/a	Muutos %	1990 %	2019 %	Muutos %
Kivihiili	1725	1054	-672	-23.2	-39%	53.4%	23.9%	-29.4%
Maakaasu	401	1701	1300	44.8	324%	12.4%	38.6%	26.2%
Öljy	136	20	-116	-4.0	-85%	4.2%	0.5%	-3.8%
Ydinvoima	607	852	245	8.4	40%	18.8%	19.4%	0.6%
Vesivoima	292	271	-21	-0.7	-7%	9.0%	6.2%	-2.9%
Tuulivoima	3	303	300	10.4	10661%	0.1%	6.9%	6.8%
Aurinko	0	108	108	3.7	29123%	0.0%	2.5%	2.5%
Muut	68	92	24	0.8	35%	2.1%	2.1%	0.0%
Yhteensä	3233	4401	1169	40.3	36%	100.0%	100.0%	
Uusiutuvat	364	775	411	14.2	113%	11.2%	17.6%	6.4%

Toiseksi eniten on kasvanut tuulivoiman tuotanto (300 TWh). Se on kuitenkin vähemmän kuin EU:ssa, jossa tuulivoiman tuotanto kasvoi samana aikana 430 TWh. Kolmanneksi eniten on kasvanut ydinvoiman tuotanto (245 TWh), joka vastaa yhden ydinvoimalaitoksen valmistumista vuosittain.

Vuonna 2019 USA:n tärkeimmät sähköntuotannon lähteet olivat maakaasu (39 %), kivihiili (24 %) ja ydinvoima (19 %). Nämä kolme vastaavat 82 % USA:n sähköntuotannosta 2019. Uusiutuvien lähteiden osuus oli vastaavasti 18 %.

Tavoiteohjelma vuodelle 2050 tarkoittaisi, että sähköntarve kasvaisi nykyisestä 4400 terawattitunnista 5600 terawattituntiin (Kuva 10.2.1 ja Taulu 10.2.2). Ominaiskulutus olisi vuonna 2050 noin 14 MWh per asukas, kun Suomen kulutus on tänään noin 15 MWh/asukas.

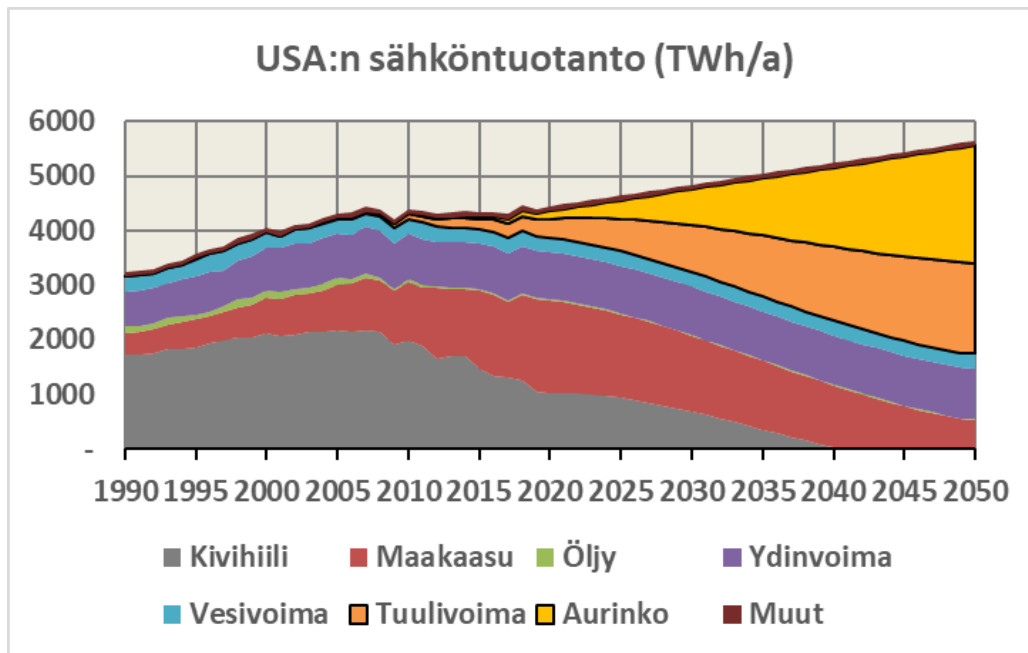
Sähköautoja on ennusteen mukaan USA:ssa vuonna 2050 noin 300 miljoonaa kappaletta ja niiden sähköntarve on noin 600 TWh. Uusia lämpöpumppuja voisi siellä olla 200 miljoonaa kappaletta ja niiden sähkötarve voisi olla 400 TWh. Lisäksi sähkön tarve kasvaisi teollisuudessa noin 200 TWh. Näistä muodostuisi 1200 TWh kasvu vuosille 2019–2050.

Noin 18 % sähköstä tehdään tänään uusiutuvilla lähteillä, mutta vuonna 2050 niiden osuus olisi noin 74 % (Taulu 10.2.2). Ydinvoiman osuus olisi 16 % ja fossiiliin lähteisiin perustuvaa sähköä olisi vain 10 %. Aurinkovoima kattaisi sähköstä 38 % ja tuulivoima 29 %.

Eniten rakennetaan aurinkovoimaa 71 TWh/a ja tuulivoimaa 47 TWh/a. Aurinkovoiman rakentaminen nousee 20-kertaseksi vuosiin 1990–2018 verrattua. Tuulivoiman rakentaminen kasvaa 10-kertaiseksi. Ydinvoimaa rakennetaan kylläkin paljon, mutta USA:n nykyisin käytöstä olevien ydinvoimalaitosten keski-ikä on jo 39 vuotta ja puolet ydinvoimalaitoksista poistetaan käytöstä vuoteen 2050 mennessä.

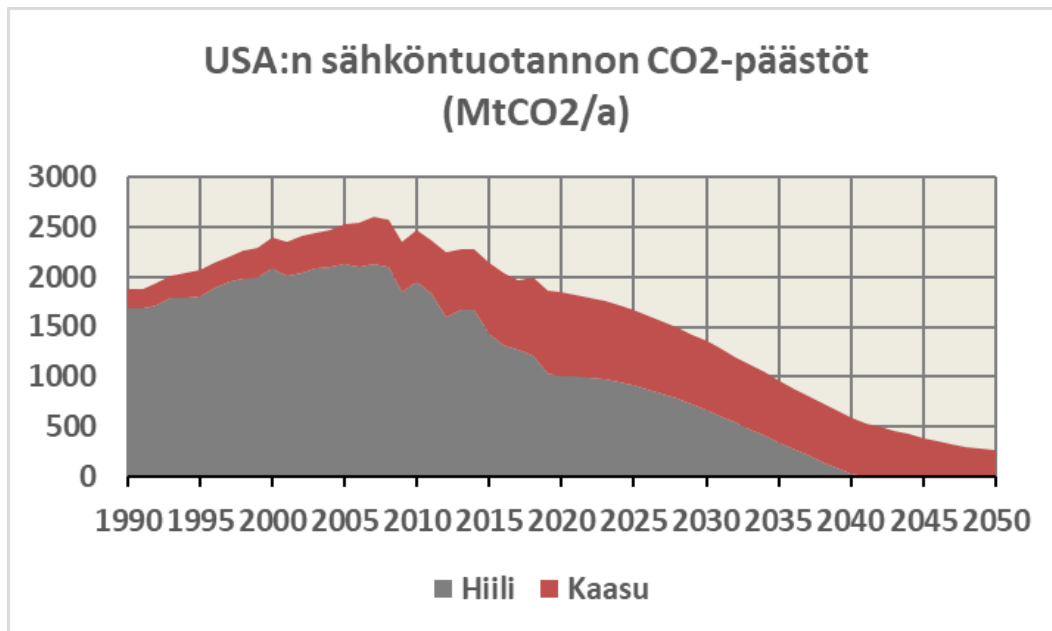
Taulu 10.2.2 USA:n sähköntuotannon lähteet vuosina 2019 ja 2050 (TWh).

USA Lähde	Energiamäärä		Energiamäärä			Osuudet		
	2019 TWh	2050 TWh	Muutos TWh	Muutos/a TWh/a	Muutos %	2019 %	2050 %	Muutos %-yks.
Kivihiili	1054	0	-1054	-36	-100%	23.9%	0.0%	-23.9%
Maakaasu	1701	533	-1168	-40	-69%	38.6%	9.4%	-29.2%
Öljy	20	11	-9	0	-47%	0.5%	0.2%	-0.3%
Ydinvoima	852	928	76	3	9%	19.4%	16.4%	-2.9%
Vesivoima	271	271	0	0	0%	6.2%	4.8%	-1.4%
Tuulivoima	303	1659	1356	47	447%	6.9%	29.4%	22.5%
Aurinko	108	2154	2045	71	1887%	2.5%	38.2%	35.7%
Muut	92	86	-6	0	-7%	2.1%	1.5%	-0.6%
Yhteensä	4401	5641	1240	43	28%	100.0%	100.0%	
Uusiutuvat	775	4170	3395	117	438%	17.6%	73.9%	56.3%

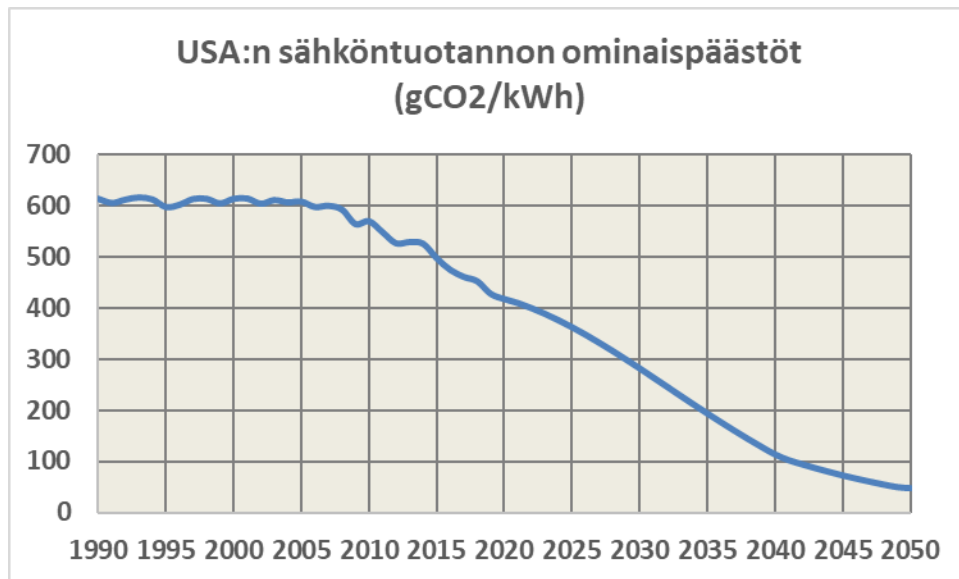


Kuva 10.2.1 USA:n sähköntuotanto vuoteen 2050 mennessä (TWh/a).

Samaan aikaan USA:n sähköntuotannon CO₂-päästöt kuitenkin vähenevät nykyisestä 1890 miljoonasta tonnista 290 miljoonaan tonniin eli 85 % (Kuva 10.2.2). Vastaavasti sähköntuotannon ominaispäästöt tuotettua kilowattituntia kohti vähenisivät nykyisestä noin 400 g/kWh arvoon 50 g/kWh vuoteen 2050 mennessä (Kuva 10.2.3). USA saavuttaisi Suomen nykytason (100 g/kWh) vuonna 2040.



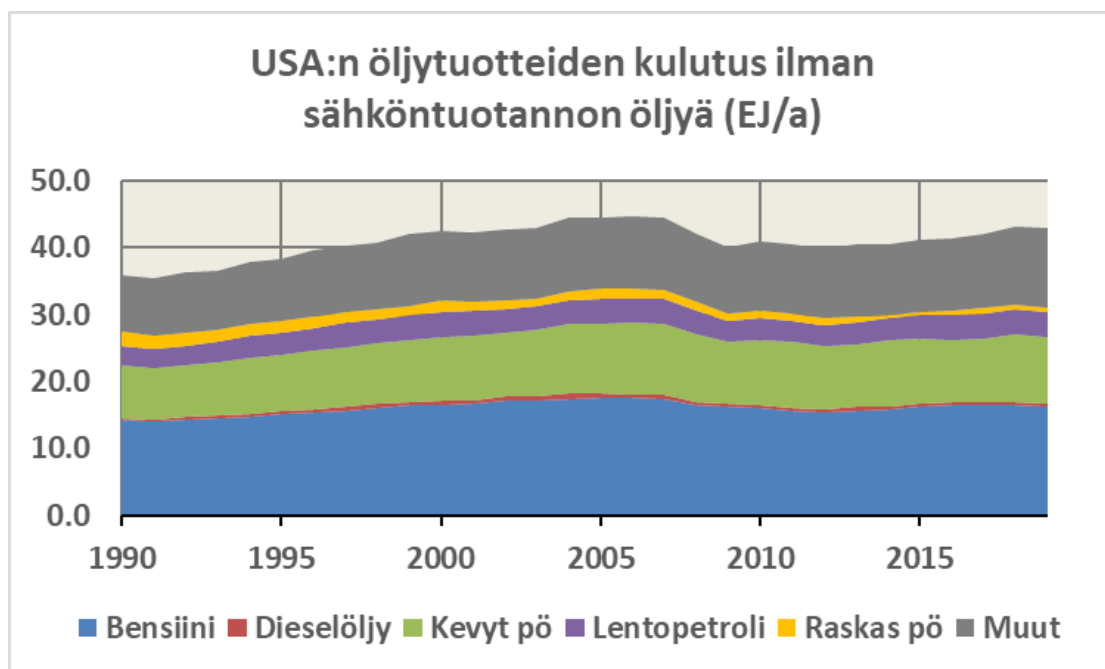
Kuva 10.2.2 USA:n sähköntuotannon CO₂-päästöt (MtCO₂/a).



Kuva 10.2.3 USA:n sähköntuotannon ominaispäästöt (gCO₂/kWh).

10.3 USA:n öljynkulutus

USA:n öljynkulutus kasvoi tasaisesti vuoteen 2008 asti, jolloin oli finanssikriisi (Kuva 10.3.1 ja Taulu 10.3.1). Sen jälkeen kulutus on vuoden 2010 jälkeen kasvanut 5 %, mutta bensiinin kulutus on kasvanut vain 2 % ja lentopetrolin kulutus on kasvanut 24 %.



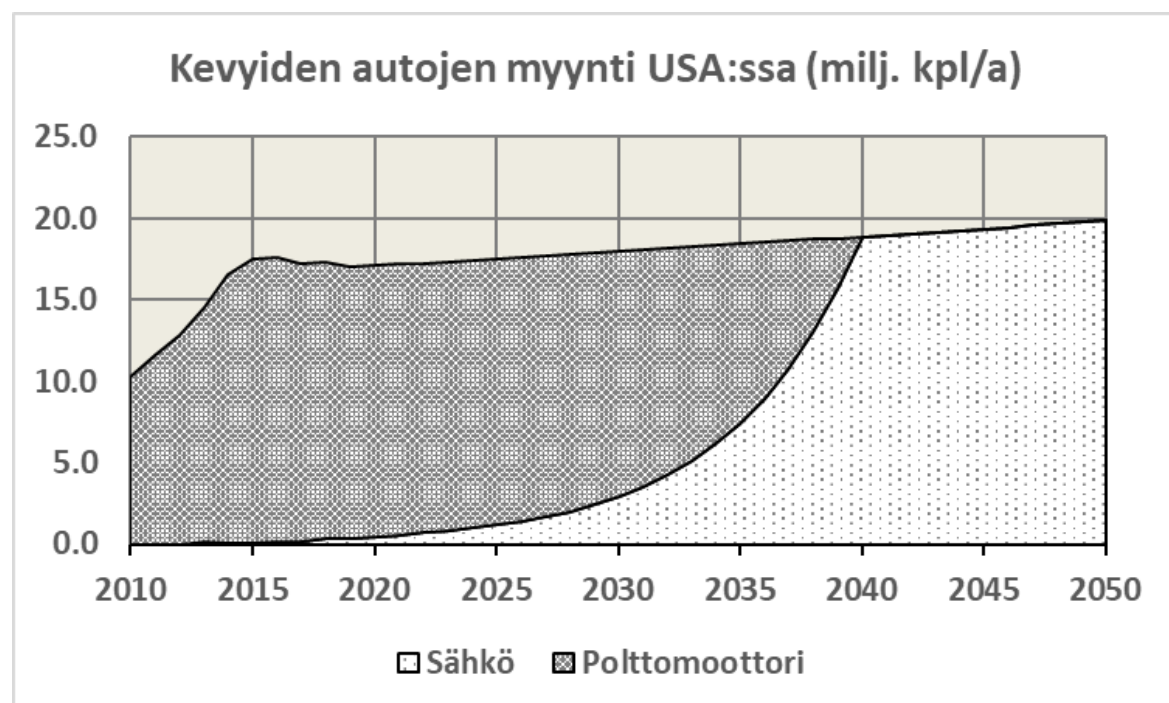
Kuva 10.3.1 USA:n öljytuotteiden kulutus ilman sähköntuotannon öljyä (EJ/a).

Vuonna 2019 eniten öljytuotteista kulutettiin bensiiniä (38 %), kevyttä polttoöljyä (23 %) ja muita öljytuotteita (28 %). Vain lentopetrolin ja muiden öljytuotteiden markkinaosuus on kasvanut.

Taulu 10.3.1 USA:n öljytuotteiden kulutus ilman sähköntuotannon öljyä (EJ/a).

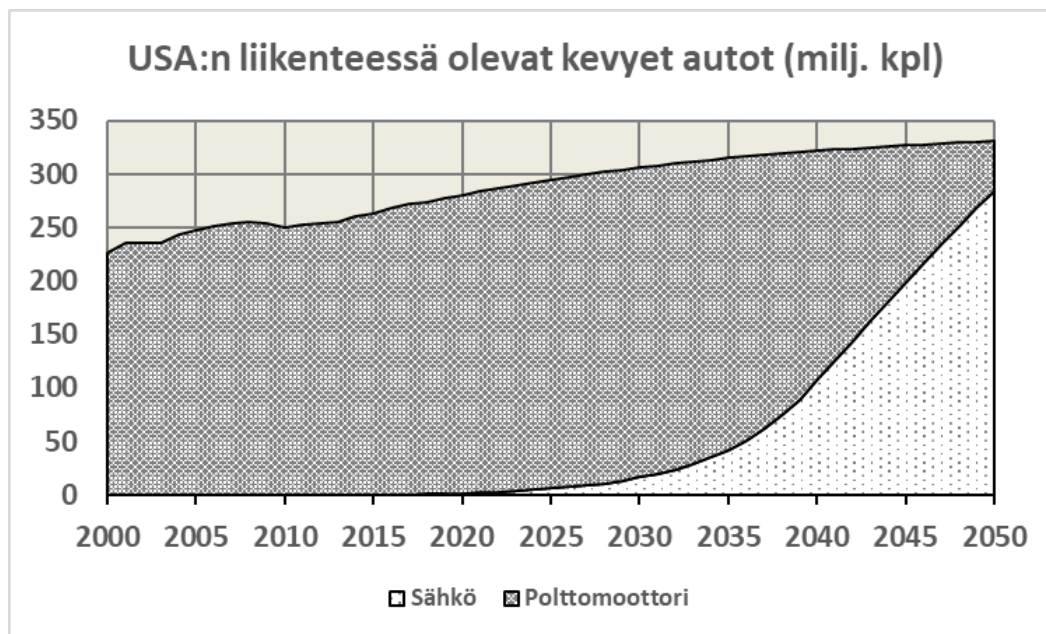
USA Tuote	Energiamäärä		Energiamäärä			Osuudet		
	2010 EJ	2019 EJ	Kasvu EJ	Kasvu/a EJ/a	Kasvu-% %	2010 %	2019 %	Muutos %-yks.
Bensiini	16.04	16.38	0.33	0.04	2.1%	39.2%	38.2%	-1.0%
Dieselöljy	0.50	0.41	-0.10	-0.01	-19.2%	1.2%	0.9%	-0.3%
Kevyt polttoöljy	9.68	9.76	0.08	0.01	0.8%	23.7%	22.8%	-0.9%
Lentopetroli	3.18	3.95	0.77	0.09	24.3%	7.8%	9.2%	1.4%
Raskas polttoöljy	1.18	0.60	-0.58	-0.06	-49.4%	2.9%	1.4%	-1.5%
Muut	10.32	11.80	1.48	0.16	14.4%	25.2%	27.5%	2.3%
Yhteensä	40.91	42.89	1.99	0.22	4.9%	100.0%	100.0%	

USA:n autojen myynti on viime vuosina ollut noin 17 miljoonaa autoa vuodessa (Kuva 10.3.2). Vuoteen 2040 mennessä polttomoottorikäyttöisten henkilöautojen myynti loppuu ja sen jälkeen myydään vain sähköautoja.

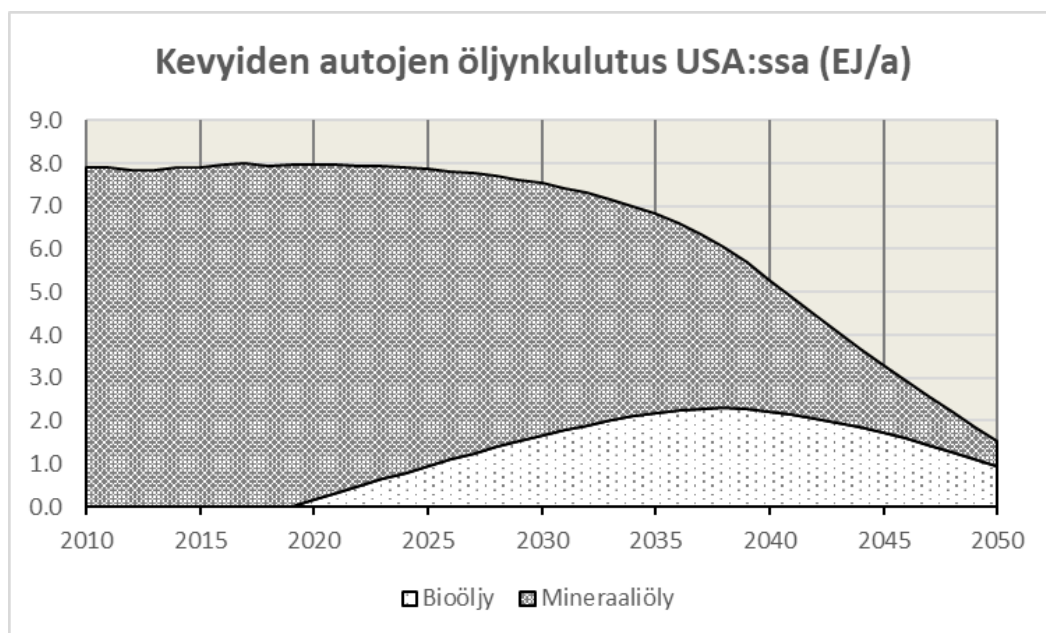


Kuva 10.3.2 Uusien autojen myynti USA:ssa (milj. kpl/a).

USA:n autokanta muuttuu siten, että vuonna 2050 liikenteessä olevista autoista 85 % olisi sähköautoja (Kuva 10.3.3). Kevyiden autojen öljyn kulutus vähenee sähköautojen tullessa markkinoille ja osa autojen käyttämästä öljyä on bioöljyä tai synteettistä polttoainetta (Kuva 10.3.4).

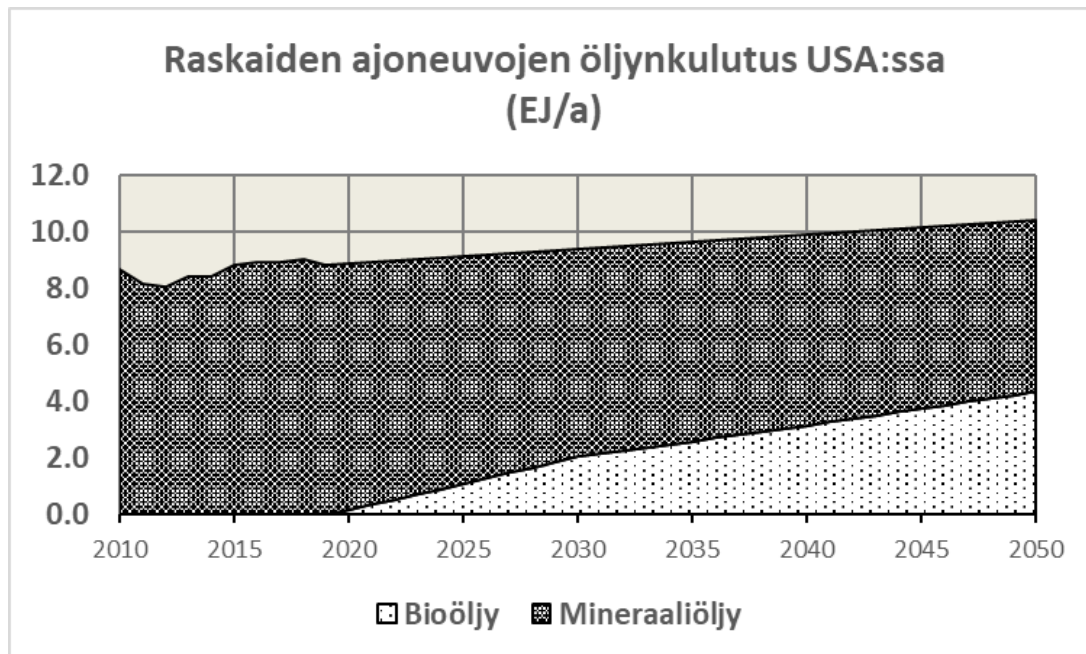


Kuva 10.3.3 USA:n liikenteessä olevat kevyet autot (milj. kpl).

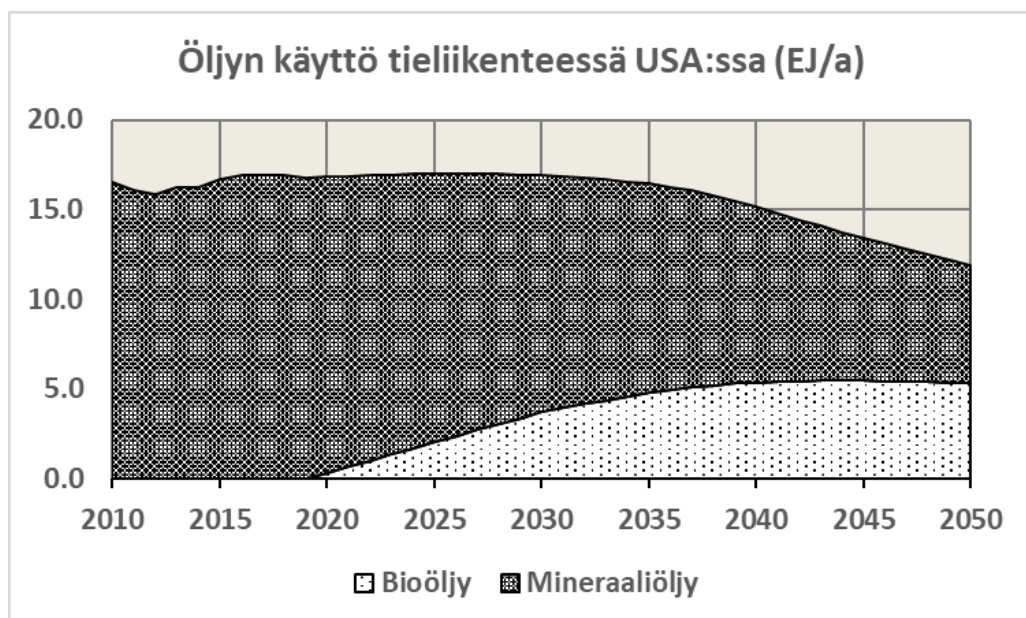


Kuva 10.3.4 Kevyiden autojen öljynkulutus USA:ssa (EJ/a).

Myös raskaan liikenteen autot siirtyvät biopolttoaineiden tai synteettisten polttoaineiden käyttöön osittain (Kuva 10.3.5). Öljyn käyttö tieliikenteessä alkaa vähetä vuoden 2030 jälkeen, kun sähköautot tulevat markkinoille (Kuva 10.3.6). On odotettavissa, että bioöljyn tai synteettisten polttoaineiden käyttö yleistyy jo vuodesta 2020 alkaen.

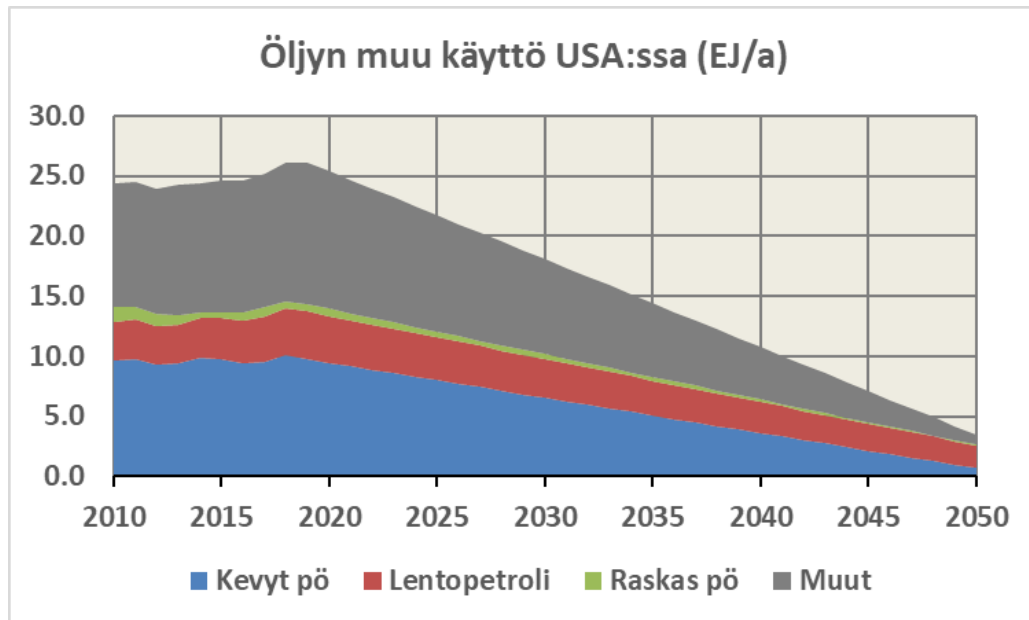


Kuva 10.3.5 Raskaiden ajoneuvojen öljynkulutus USA:ssa (EJ/a).

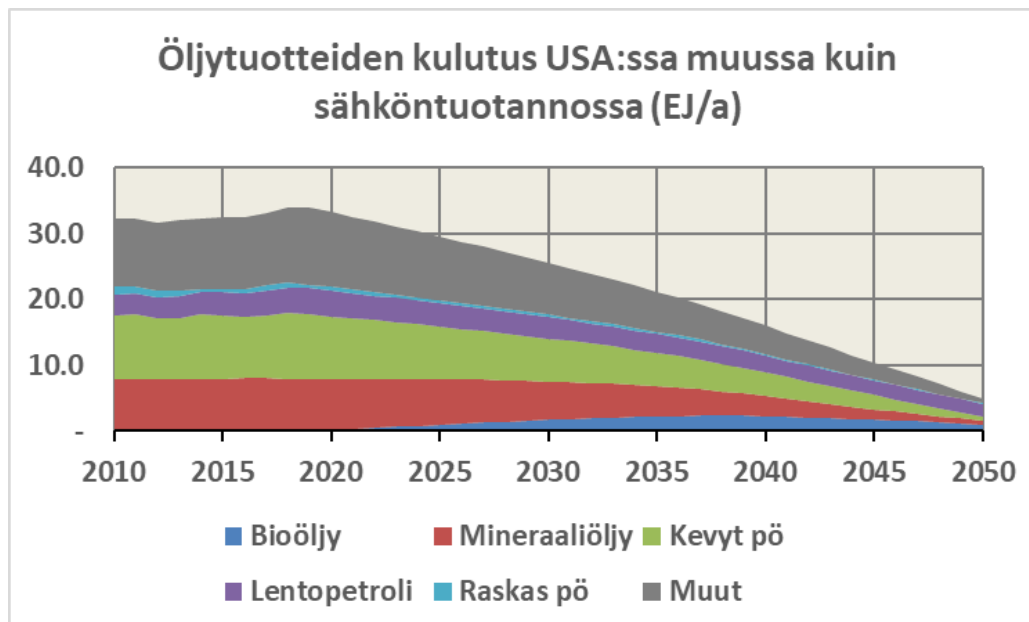


Kuva 10.3.6 Öljyn käyttö tieliikenteessä USA:ssa (EJ/a).

Öljyn käyttö muussa kuin tieliikenteessä vähenee 87 % vuoteen 2050 mennessä (Kuva 10.3.7). Se edellyttää, että kotitalouksissa siirrytään sähkön ja lämpöpumppujen käyttöön. Öljyn käyttö muussa kuin sähköntuotannossa vähenee nykyisestä noin 34 eksajoulesta viiteen eksajouleen (85 %) vuoteen 2050 mennessä (Kuva 10.3.8).

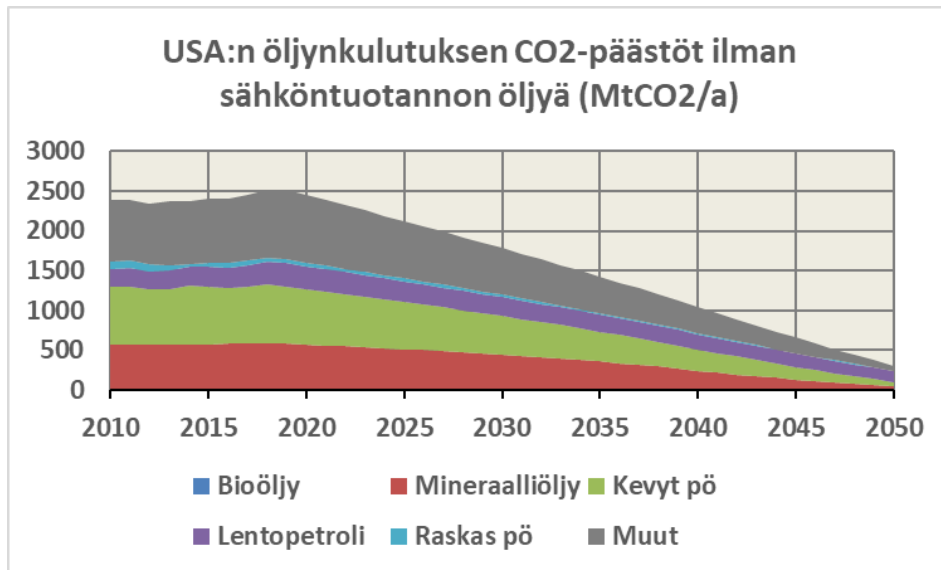


Kuva 10.3.7 Öljyn käyttö muualla kuin liikenteessä ja sähköntuotannossa USA:ssa (EJ/a).



Kuva 10.3.8 Öljyn kulutus USA:ssa muussa kuin sähköntuotannossa (EJ/a).

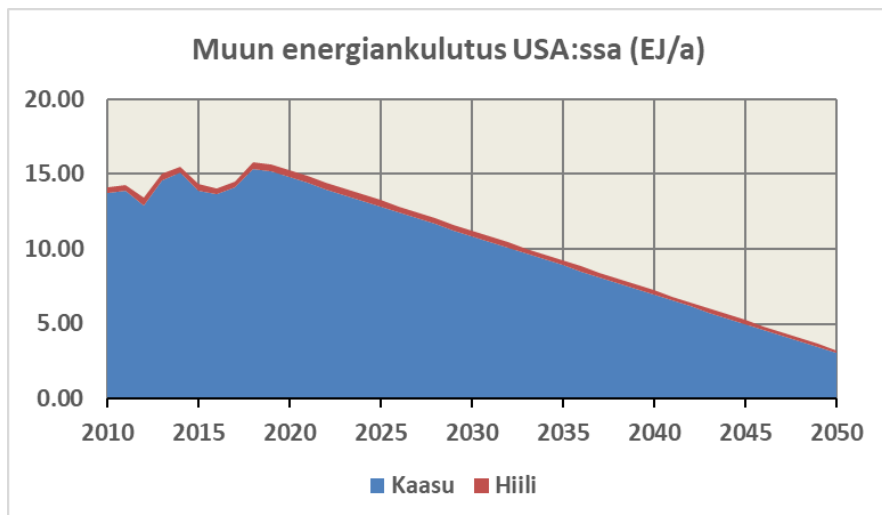
Öljyn CO₂-päästöt vähenevät samassa ajassa nykyisestä 2500 miljoonasta noin 300 miljoonaan tonniin CO₂ (Kuva 10.3.9).



Kuva 10.3.9 USA:n öljynkulutuksen aiheuttamat CO₂-päästöt ilman sähköntuotannon öljyä (MtCO₂/a).

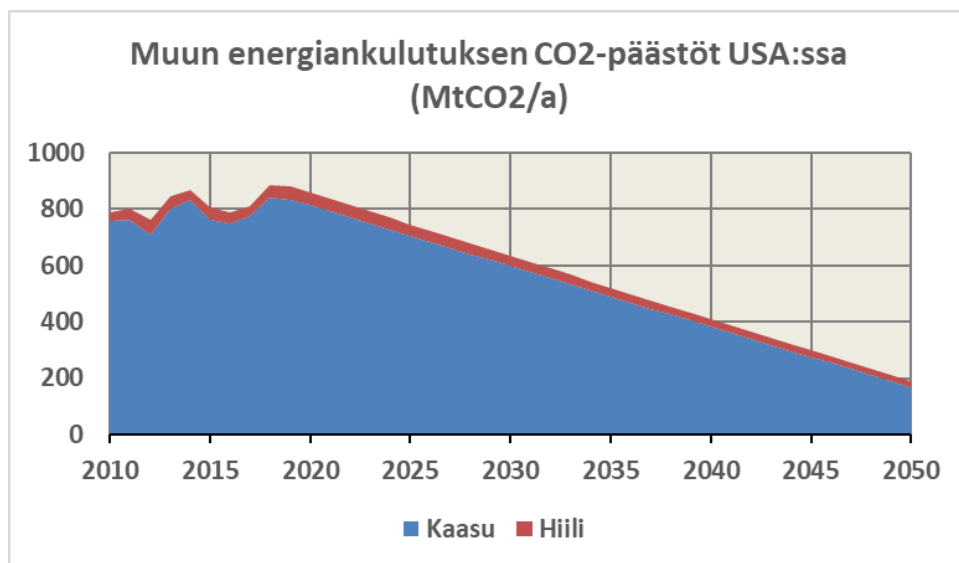
10.4 USA:n muu energiakäyttö

Muu energiankulutus on lähes pelkästään maakaasun käyttöä kotitalouksissa ja muissa kohteissa. Tämän kulutuksen odotetaan painuvan vuoteen 2050 mennessä tasolle 3,3 eksajoulea vuodessa eli vähentyvät 80 % nykyisestä (Kuva 10.4.1).



Kuva 10.4.1 Muun energian kulutus USA:ssa (EJ/a).

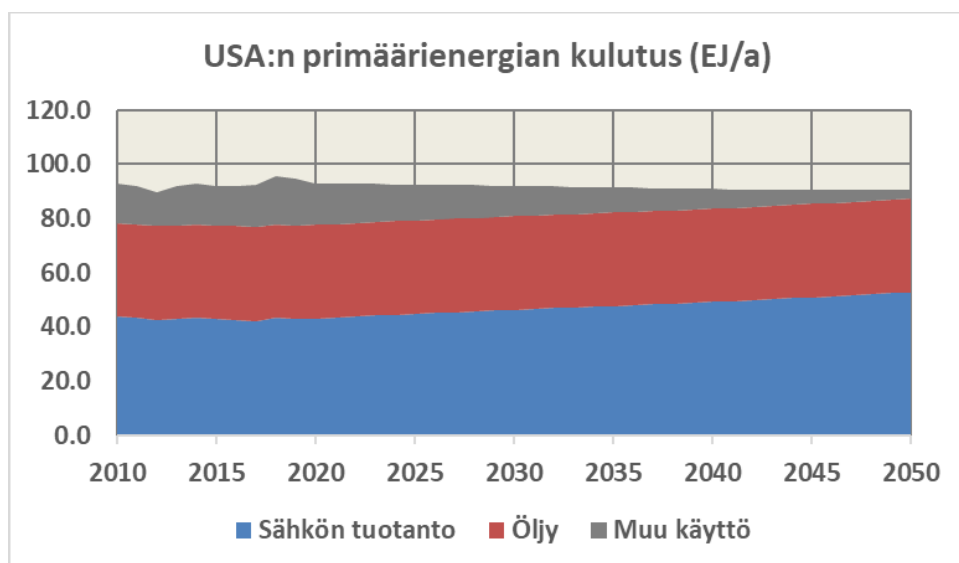
Muun energiankäytön CO₂-päästöt laskevat silloin nykyisestä 860 miljoonasta tonnista CO₂ arvoon 190 miljoonaa tonnia CO₂ eli 80 % (Kuva 10.4.2).



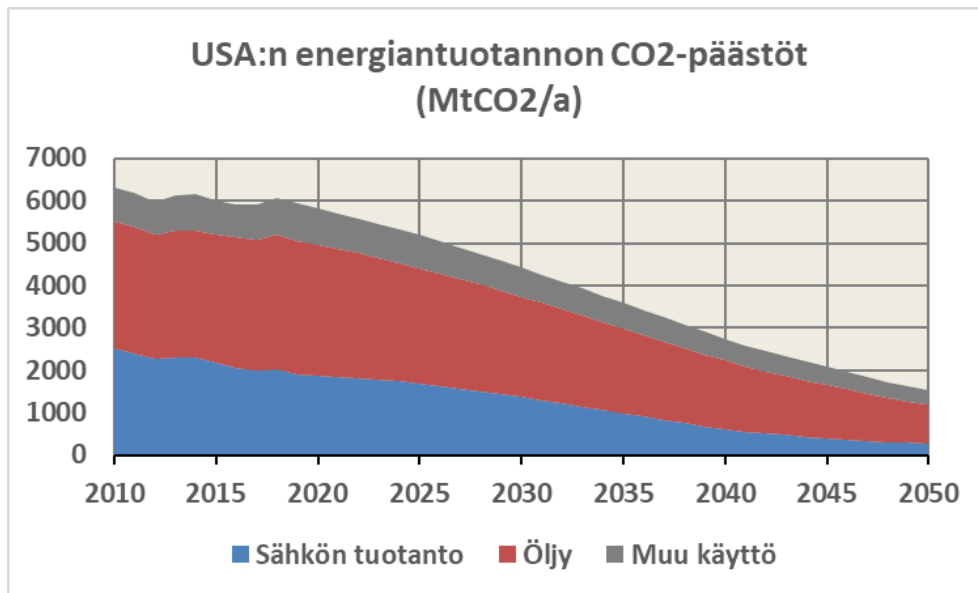
Kuva 10.4.2 Muun energiankulutuksen CO₂-päästöt (MtCO₂/a).

10.5 Yhteenveto USA:sta

USA:n primäärienergian kulutus säilyy lähes vakiona, mutta öljyn ja muun energian osuutta korvataan sähköllä (Kuva 10.5.1). Kuitenkin USA:n CO₂-päästöt pienenevät nykyisestä noin 5300 miljoonasta tonnista noin 1530 miljoonaa tonniin vuoteen 2050 mennessä (Kuva 10.5.2).



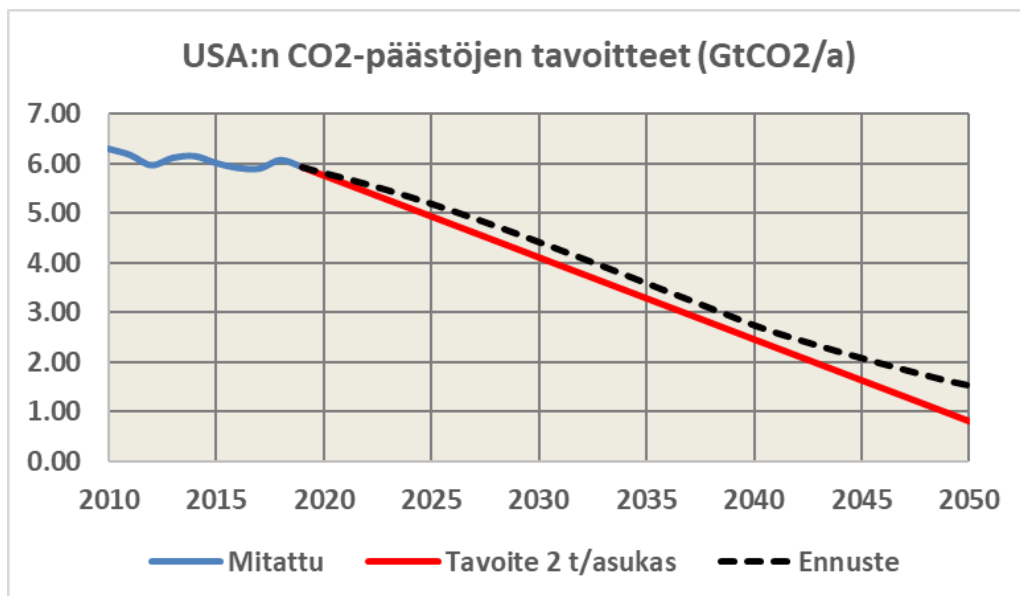
Kuva 10.5.1 USA:n primäärienergian kulutus (EJ/a).



Kuva 10.5.2 USA:n energiantuotannon CO₂-päästöt (MtCO₂/a).

USA:n CO₂-päästöt vähenevät 74 % vuodesta 2019 vuoteen 2050 mennessä (Taulu 10.5.1). Eniten tulee vähentää sähkön (86 %) ja öljyn (71 %) käytöstä aiheutuvia päästöjä. Öljy on aiheuttanut 53 % USA:n CO₂-päästöistä ja vielä vuonna 2050 se aiheuttaa 60 % päästöistä.

Ennuste vuodelle 2050 (1500 MtCO₂/a) jää selvästi vuoden 2050 tavoitteesta 810 Gt. Päästöt vähenevät vain 120 MtCO₂ vuodessa, jolloin 910 Mt/a-tavoite saavutetaan vasta vuonna 2055 (Kuva 10.5.3).



Kuva 10.5.3 USA:n CO₂-päästöjen Tavoite 2 t/asukas ja ennuste (GtCO₂/a).

Taulu 10.5.1 USA:n energiantuotannon CO₂-päästöt (MtCO₂/a).

USA Lähde	Päästöt		Päästöt			Osuudet		
	2019 MtCO ₂	2050 MtCO ₂	Muutos MtCO ₂	Muutos/a MtCO ₂ /a	Muutos %	2019 %	2050 %	Muutos %-yks.
Sähkö	1887	272	-1615	-52	-86%	32%	18%	-14%
Öljy	3158	911	-2247	-72	-71%	53%	60%	6%
Muu käyttö	882	344	-538	-17	-61%	15%	23%	8%
Yhteensä	5927	1527	-4400	-142	-74%	100%	100%	

Vaikuttaa siltä, että USA ei pääse tavoitetulle tasolle 2 tonnia per asukas vuoteen 2050 mennessä. Se olisi mahdollista, jos:

- 1) USA rakentaa seuraavien vuosien aikana keskimäärin vuosittain noin 50 TWh tuulivoimaa ja 70 TWh aurinkovoimaa.
- 2) Lopettaa polttomoottorikäyttöisten henkilöautojen myynnin vuoteen 2040 mennessä ja nostaa bioöljyosuuden 40 %:iin muissa autoissa.
- 3) Vähentää kotitalouksien kaasun ja öljyn käyttöä siirtymällä sähköön ja lämpöpumppulämmitykseen kotitalouksissa ja muissa rakennuksissa.
- 4) Nostaa metsien hiilinielun yhteen gigatonniin CO₂ vuoteen 2050 mennessä.
- 5) Aloittaa CO₂-päästöjen hinnoittelun ja laajentaa sen koskemaan myös liikennepolttoaineita.

11 MAAILMAN TAVOITTEET ALUEITTAIN

14.1 Sähkön tuotannon tavoitteet alueittain

Sähkön tuotanto kasvaa alueittain siten, että vuonna 2050 maailmassa kulutetaan sähköä noin 47.000 TWh eli 4,8 MWh per asukas (Kuva 11.1.1 ja Taulu 11.1.1). Tuotannon kasvusta noin 25 % tapahtuu Kiinassa (163 TWh/a), 10 % Intiassa (62 TWh/a) ja 43 % muissa maissa, joita tässä ei ole analysoitu tarkemmin.

Taulu 11.1.1 Sähkön tuotanto maailmassa alueittain vuoteen 2050 mennessä (TWh/a).

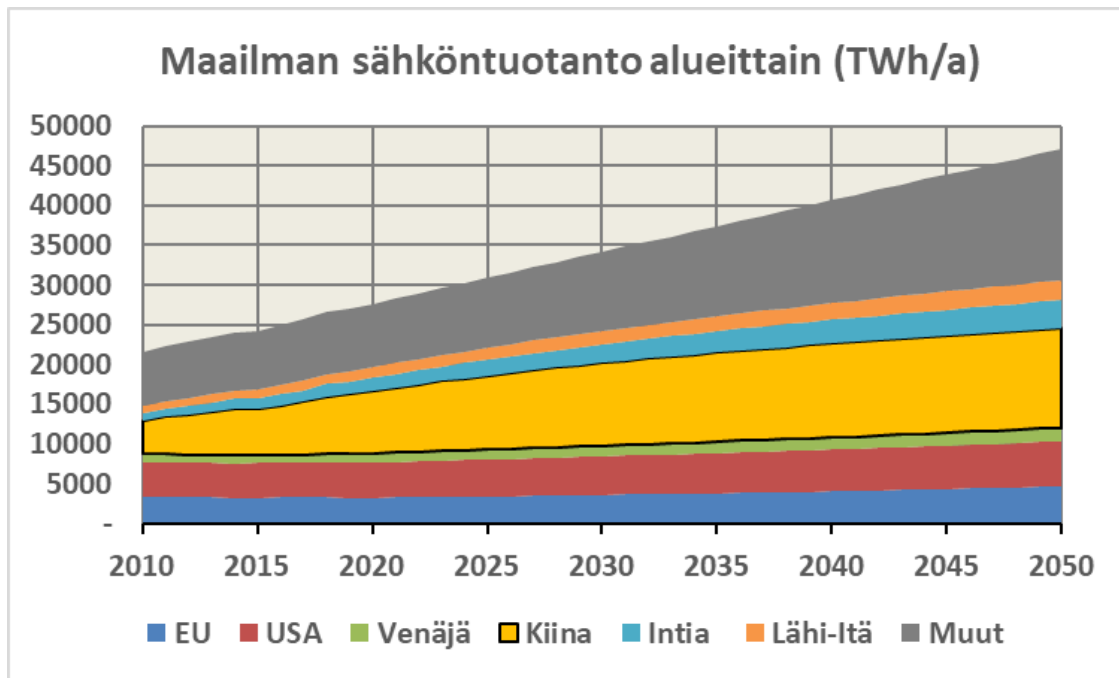
Maailma Alue	Sähkön tuotanto		Sähkön tuotanto			Osuudet		
	2019 TWh	2050 TWh	Kasvu TWh	Kasvu/a TWh/a	Kasvu %	2019 %	2050 %	Kasvu %-yks.
EU	3215	4673	1457	47	45.3%	11.9%	9.9%	-2.0%
USA	4401	5641	1240	40	28.2%	16.3%	12.0%	-4.3%
Venäjä	1118	1738	620	20	55.4%	4.1%	3.7%	-0.5%
Kiina	7503	12567	5064	163	67.5%	27.8%	26.7%	-1.1%
Intia	1559	3469	1910	62	122.5%	5.8%	7.4%	1.6%
Lähi-Itä	1265	2505	1240	40	98.1%	4.7%	5.3%	0.6%
Muut	7943	16562	8619	278	108.5%	29.4%	35.1%	5.7%
Yhteensä	27005	47155	20150	650	74.6%	100.0%	100.0%	

Sähkön tuotannon aiheuttamat CO₂-päästöt puolestaan vähenevät nykyisestä 13,3 gigatonnista noin 3,4 gigatonniin vuoteen 2030 mennessä ja ovat 75 % pienemmät kuin vuonna 2019 (Kuva 11.1.2 ja Taulu 11.1.2).

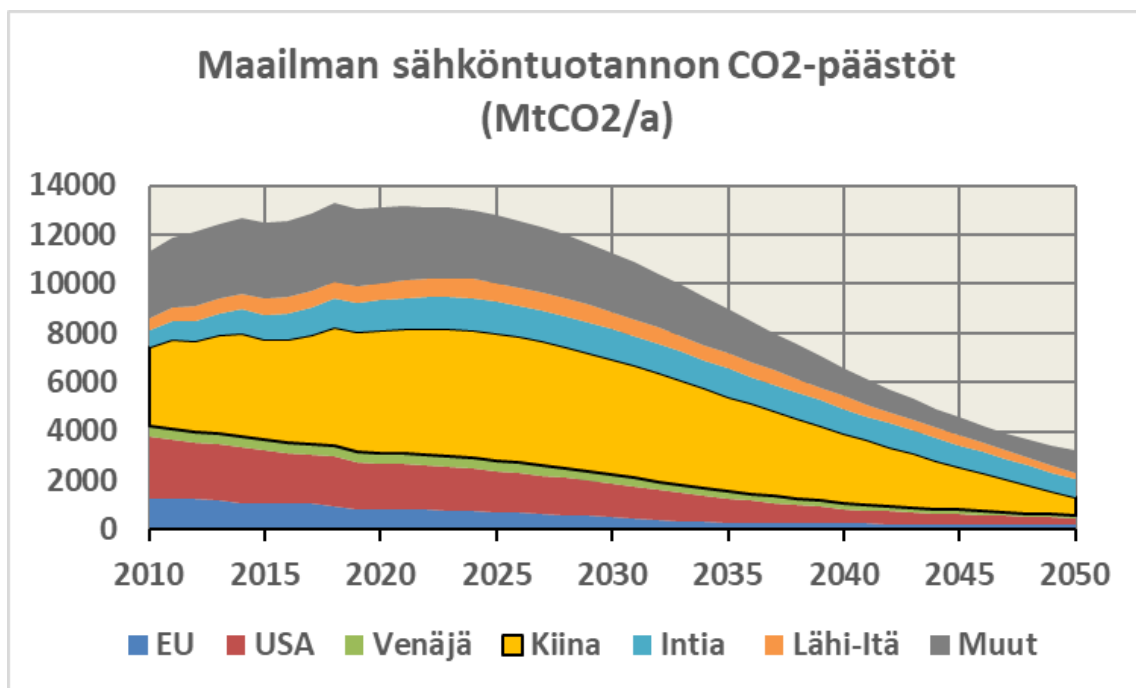
Taulu 11.1.2 Maailman CO₂-päästöt sähkön tuotannossa alueittain (MtCO₂/a).

Maailma Alue	Päästö määrä		Päästö määrä			Osuudet		
	2019 MtCO ₂	2050 MtCO ₂	Muutos MtCO ₂	Muutos/a MtCO ₂ /a	Muutos %	2019 %	2050 %	Muutos %-yks.
EU	857	207	-650	-21.0	-76%	6.6%	6.4%	-0.1%
USA	1887	272	-1615	-52.1	-86%	14.4%	8.5%	-6.0%
Venäjä	440	121	-320	-10.3	-73%	3.4%	3.8%	0.4%
Kiina	4864	736	-4129	-133.2	-85%	37.2%	22.9%	-14.3%
Intia	1153	747	-405	-13.1	-35%	8.8%	23.3%	14.5%
Lähi-Itä	716	248	-468	-15.1	-65%	5.5%	7.7%	2.2%
Muut	3144	880	-2264	-73.0	-72%	24.1%	27.4%	3.3%
Yhteensä	13062	3210	-9851	-317.8	-75%	100.0%	100.0%	

Taulusta voi havaita, että Kiina tuotti vuonna 2019 noin 37 % maailman sähkön tuotannon CO₂-päästöistä ja sen osuus on aivan ratkaiseva ilmastonmuutoksen kannalta. Kiinan osuus päästöistä putoaa 23 %:iin vuoteen 2050 mennessä, kun sen sähkön tuotannon kasvu perustuu jatkossa lähes pelkästään uusituvien lähteisiin ja ydinvoimaan. Eniten kasvavat Intian ja muun maailman päästöt, jotka nousevat yli 50 % osuuteen kokonaispäästöistä.



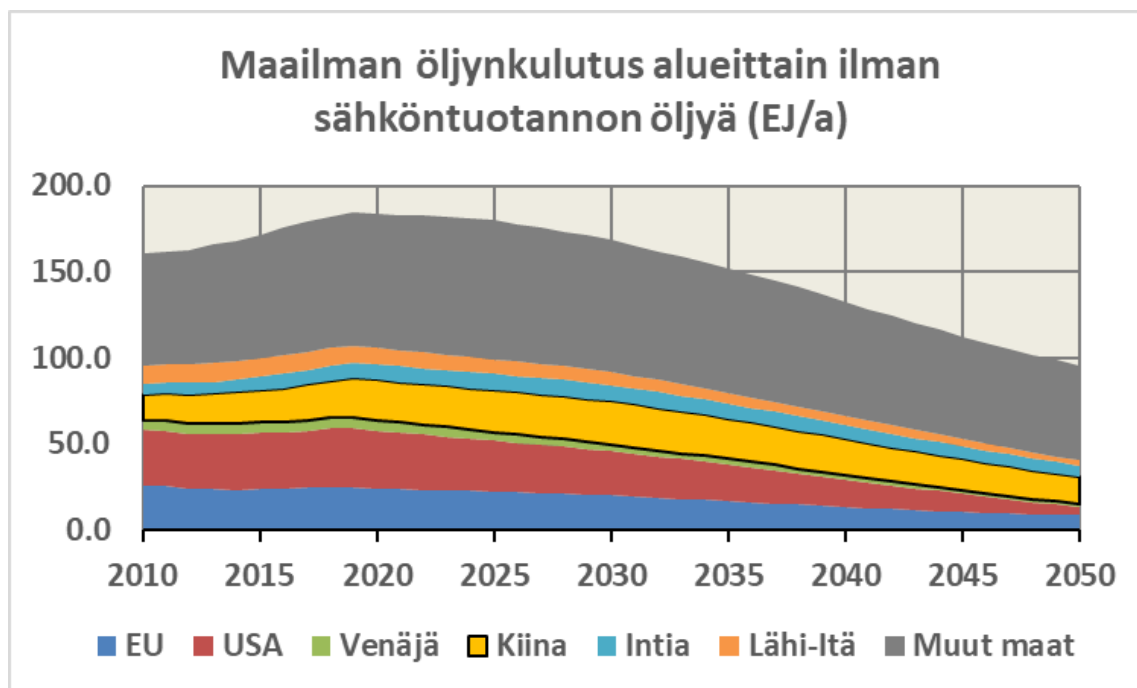
Kuva 11.1.1 Sähköntuotanto maailmassa alueittain vuoteen 2050 mennessä (TWh/a).



Kuva 11.1.2 Maailman CO₂-päästöt sähköntuotannossa alueittain (MtCO₂/a).

11.2 Maailman öljynkulutus alueittain

Maailman öljynkulutus vähenee nykyisestä 180 eksajoulesta noin 96 eksajouleeseen vuoteen 2050 mennessä eli melkein 50 % (Kuva 11.2.1 ja Taulu 11.2.1). Suurin muutos tapahtuu tutkittujen alueiden ja varsinkin EU:n, USA:n, Venäjän ja Lähi-idän öljynkulutuksessa, jotka vähenevät noin 68–75 %. Sen sijaan muiden maiden öljynkulutus säilyy melkein samana kuin vuonna 2019.



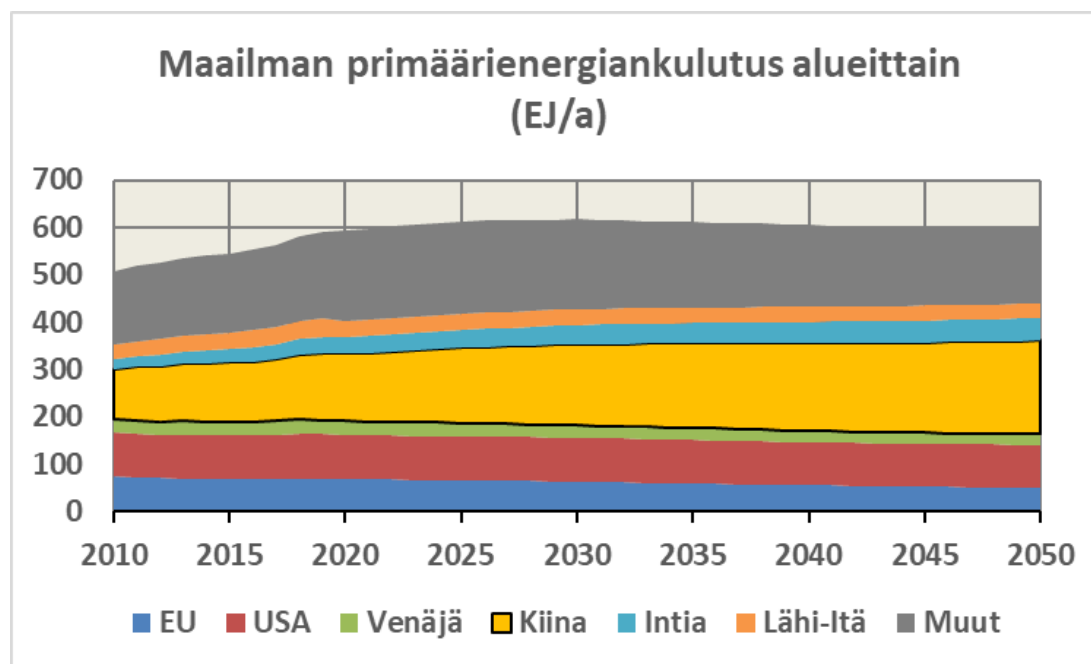
Kuva 11.2.1 Maailman öljynkulutus alueittain ilman sähköntuotannon öljyä (EJ/a).

Taulu 11.2.1 Maailman öljynkulutus alueittain ilman sähköntuotannon öljyä (EJ/a).

Maailma	Energiamäärä		Energiamäärä			Osuudet		
	2019 EJ	2050 EJ	Muutos EJ	Muutos/a EJ/a	Muutos % %	1990 %	2050 %	Muutos %-yks.
EU	32.0	10.1	-21.9	-0.71	-68.4%	17.4%	10.6%	-6.8%
USA	34.1	5.0	-29.1	-0.94	-85.3%	18.5%	5.2%	-13.2%
Venäjä	6.5	1.6	-4.9	-0.16	-75.7%	3.5%	1.7%	-1.9%
Kiina	22.8	15.6	-7.2	-0.23	-31.5%	12.4%	16.4%	4.0%
Intia	9.1	6.7	-2.4	-0.08	-26.3%	4.9%	7.0%	2.1%
Lähi-Itä	9.9	3.1	-6.9	-0.22	-69.2%	5.4%	3.2%	-2.2%
Muut maat	70.1	53.6	-16.5	-0.53	-23.6%	38.0%	56.0%	18.0%
Yhteensä	184.5	95.7	-88.9	-2.87	-48.2%	100.0%	100.0%	

11.3 Maailman primäärienergiankulutus alueittain

Maailman primäärienergian kulutus säilyy suunnilleen vakiona vuoteen 2050 asti, mutta kulutus muuttuu siten, että EU:n, USA:n ja Venäjän osuudet kokonaiskulutuksesta putoaa nykyisestä 33 %:sta noin 27 %:iin (Kuva 11.3.1 ja Taulu 11.3.1). Vastaavasti Kiinan osuus nousee noin 33 %:iin vuonna 2050.

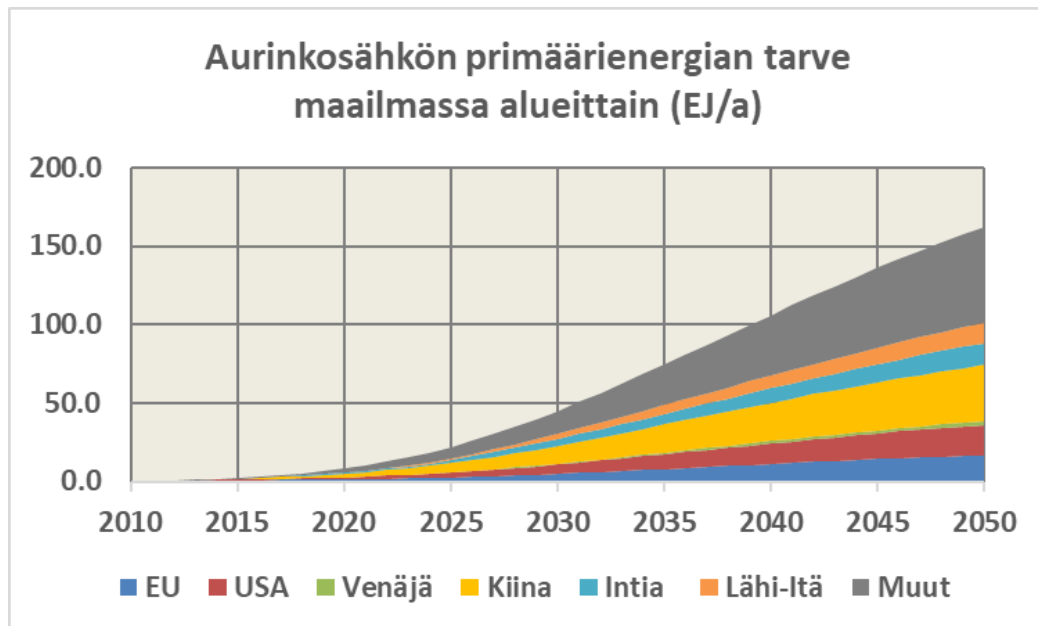


Kuva 11.3.1 Maailman primäärienergian kulutus alueittain (EJ/a).

Taulu 11.3.1 Maailman primäärienergian kulutus alueittain (EJ/a).

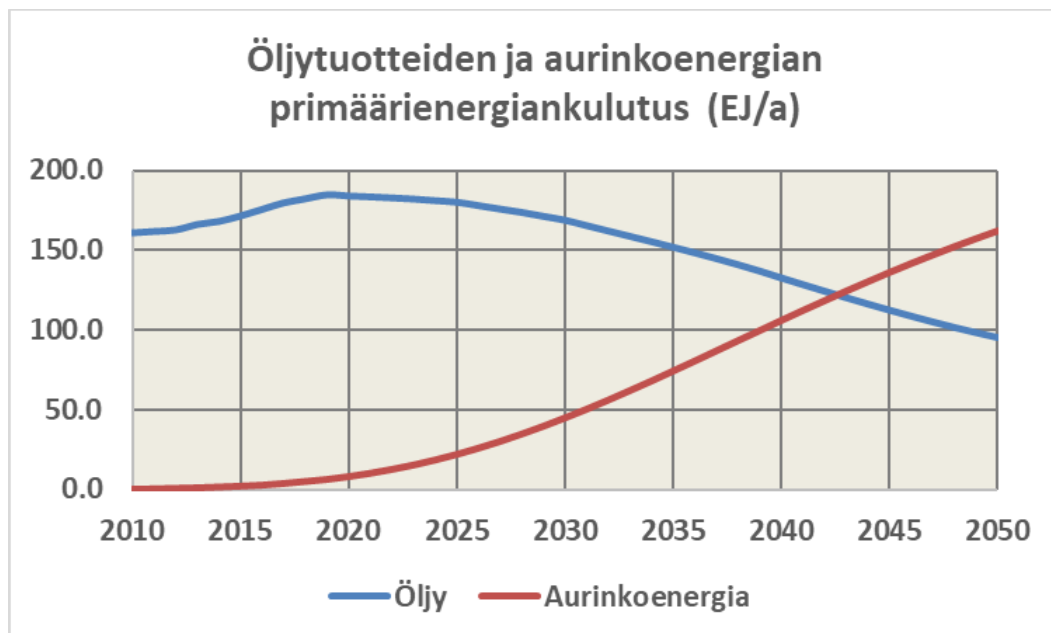
Maailma Alue	Energiamäärä		Energiamäärä		Osuudet		
	2019 EJ	2050 EJ	Muutos EJ	Muutos %	2019 %	2050 %	Muutos %-yks.
EU	69	51	-18	-26.3%	11.7%	8.4%	-3.2%
USA	95	91	-4	-4.4%	16.1%	15.1%	-1.0%
Venäjä	31	22	-8	-26.6%	5.2%	3.7%	-1.5%
Kiina	142	197	55	39.1%	24.1%	32.8%	8.8%
Intia	34	48	14	40.4%	5.8%	8.0%	2.2%
Lähi-Itä	39	30	-8	-21.5%	6.6%	5.1%	-1.5%
Muut	181	162	-19	-10.4%	30.7%	26.9%	-3.7%
Yhteensä	589	601	12	2.0%	100.0%	100.0%	

Suurimmaksi primäärienergian lähteeksi nousee 2050 mennessä aurinkoenergia, jonka käyttämä energiamäärä nousee arvoon 160 EJ/a (Kuva 11.3.2). Se vastaa neljäsosaa käytöstä noin 600 EJ/a energiamäärästä. Tässä arvioidaan, että puolet aurinkoenergian käytöstä kohdistuu muihin maihin kuten Afrikkaan ja Etelä-Amerikkaan, joiden sähköntuotanto tehdään sen avulla.



Kuva 11.3.2 Aurinkoenergian primäärienergian kulutus alueittain (EJ/a).

Öljytuotteet menettävät paikkansa aurinkoenergialle vuoden 2043 paikkeilla tärkeimpänä energianlähteenä maailmassa (Kuva 11.3.3). Voisi sanoa, että vuonna 2043 siirrytään öljyn aikakaudesta aurinkoenergian aikaan. Saudi-Arabian shekki **Ahmed Zaki Yamani** sanoi, että #kivikausi ei loppunut siihen, että kivet loppuivat vaan, että löydettiin uusia materiaaleja”. Sama pätee öljyn suhteen.

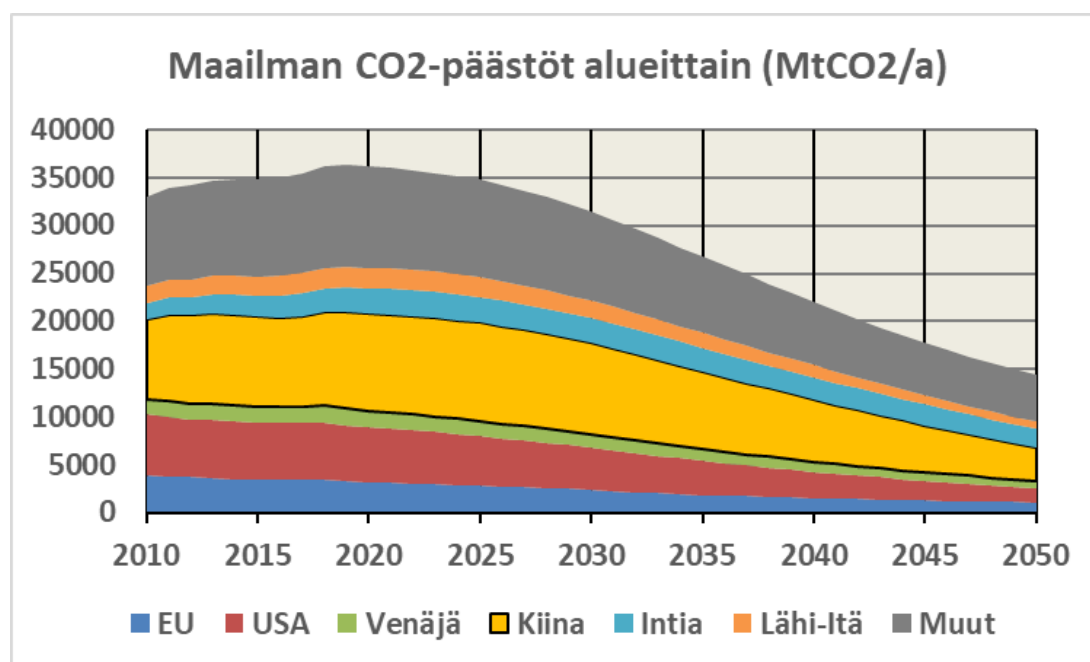


Kuva 11.3.3 Öljytuotteiden ja aurinkoenergian osuus maailman primäärienergiasta (EJ/a).

11.4 Maailman CO₂-päästöt alueittain

Ennusteen mukaan maailman CO₂-päästöt laskevat nykyisestä noin 36 gigatonnista noin 14 gigatonniin vuoteen 2050 mennessä eli noin 60 % (Kuva 11.4.1 ja Taulu 11.4.1). Suhteellisesti eniten (yli 60 %) CO₂-päästöjen tulee vähentää Lähi-Idässä, USA:ssa, Kiinassa ja EU:ssa.

Vastaavasti pienimmät vähennykset tarvitaan Intiassa ja muissa maissa, koska niiden öljyn käyttö on alemmalla tasolla jo tänään. EU ja USA saavat laskettua päästönsä alle kahden tonnin per asukas. Kiina, Venäjä ja Lähi-Itä jäävät hieman sen yläpuolella. Intia ja muut maat ovat jo tänään alle kahden tonnin tasossa per asukas.



Kuva 11.4.1 Maailman CO₂-päästöt alueittain (MtCO₂/a)

Taulu 11.4.1 Maailman CO₂-päästöt alueittain (MtCO₂/a)

Maailma	CO ₂ -päästöt		CO ₂ -päästö			Osuus			
Alue	2019 MtCO ₂	2050 MtCO ₂	Muutos MtCO ₂	Muutos/a MtCO ₂ /a	Muutos % %	2019 %	2050 %	Muutos %-yks.	2050 tCO ₂ /as.
EU	3221	1071	-2150	-69	-67%	8.9%	7.4%	-1.5%	2.02
USA	5927	1527	-4400	-142	-74%	16.3%	10.6%	-5.8%	3.47
Venäjä	1730	749	-981	-32	-57%	4.8%	5.2%	0.4%	4.68
Kiina	10062	3457	-6605	-213	-66%	27.7%	23.9%	-3.8%	2.47
Intia	2565	1972	-594	-19	-23%	7.1%	13.7%	6.6%	1.31
Lähi-Itä	2164	688	-1477	-48	-68%	6.0%	4.8%	-1.2%	2.29
Muut	10621	4973	-5648	-182	-53%	29.3%	34.4%	5.2%	0.91
Yhteensä	36290	14436	-21854	-705	-60%	100.0%	100.0%		1.47

11.5 Yhteenveto

Maailman energiankäyttö kehittyy alueittain siten, että kehittyneimpien maiden EU:n, USA:n Kiinan ja Venäjän osuus energian tarpeesta vähenee tulevaisuudessa, mutta Intian ja muiden maiden osuus kasvaa. Kiina kuluttaa eniten energiaa maailmassa ja se säilyy suurimpana energiankuluttajana aina vuoteen 2050 asti. Toisena on USA, kolmantena EU ja neljäntenä Intia. Päästöjen määrässä Intia nousee toiseksi ohi USA:n ja EU:n.

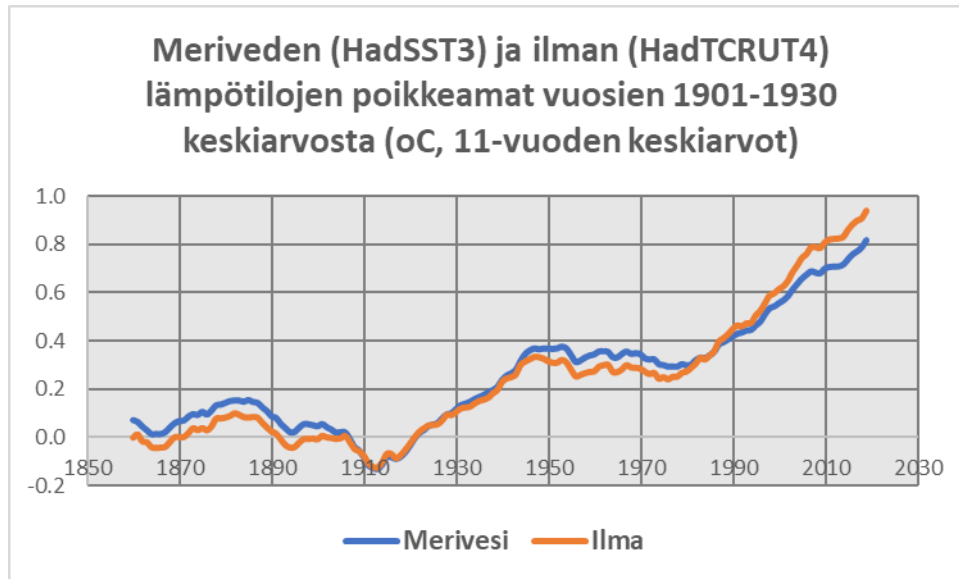
Aurinkoenergiasta tulee vuoteen 2043 mennessä tärkein primäärienergian lähde maailmassa, kun se ohittaa siihen asti tärkeimpänä olevan öljyn. Auringolla tuotettu sähkö on myös autojen tärkein energialähde tulevaisuudessa. Aurinkoenergian suurin potentiaali on Afrikassa, Etelä-Amerikassa sekä Intian ja Filippiinien tasolla Aasiassa, joissa aurinko paistaa parhaiten läpi vuoden.

Lähes kaikki tutkitut alueet voivat päästä vuoteen 2050 mennessä lähelle tavoitteena olevaa kaksi tonnia per asukas CO₂-päästöä. Vaikeinta se tulee olemaan USA:ssa, Venäjällä, Lähi-Idässä ja Kiinassa. Venäjällä ja Kiinassa vaikeutena on lämmityksen tekeminen päästöttömästi. Lähi-Idässä ongelmana on jäähdytys. Pohjoisimmissa maissa se onnistuu, jos ydinkaukolämpö otetaan laajemmin käyttöön.

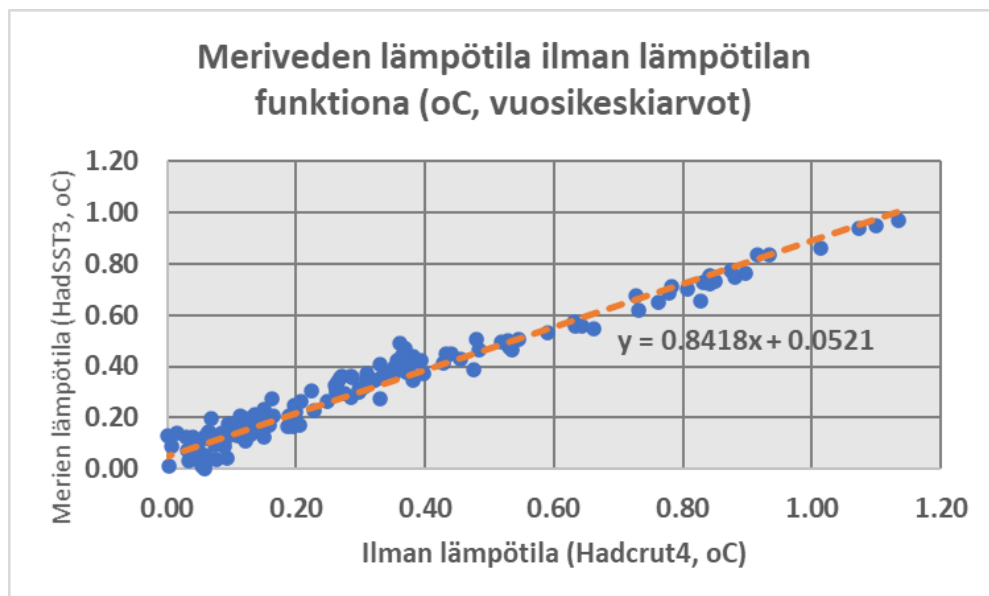
12 MERIEN VAIKUTUS ILMASTOON

12.1 Merien lämpeneminen

Merien lämpeneminen on tapahtunut samassa tahdissa ilmaston lämpenemisen kanssa (Kuva 12.1.1), mutta merien lämpeneminen suuresta veden lämpökapasiteetista on vain 84 % ilman lämpenemisestä (Kuva 12.1.2).

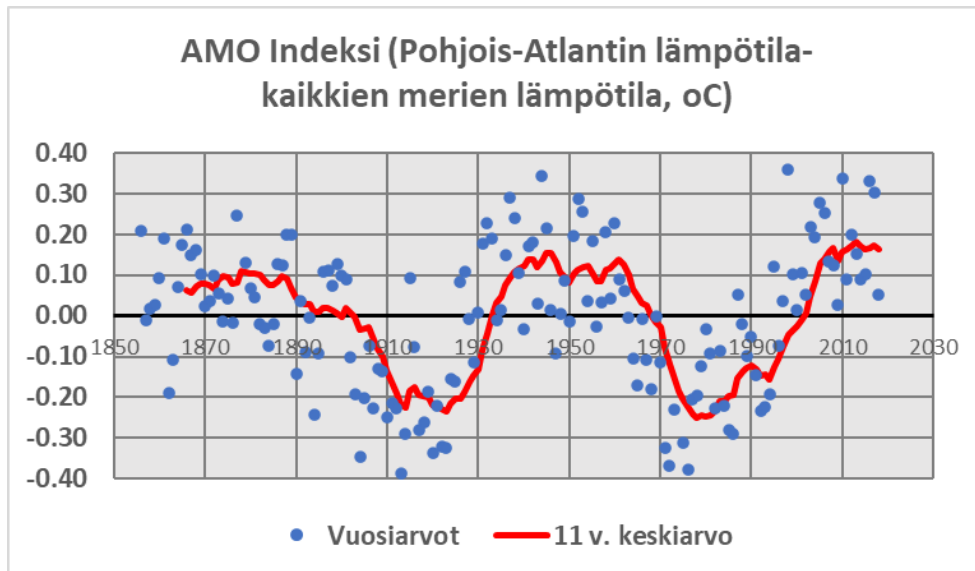


Kuva 12.1.1 Meriveden ja ilman lämpötilat (°C, 11 vuoden keskiarvoja).

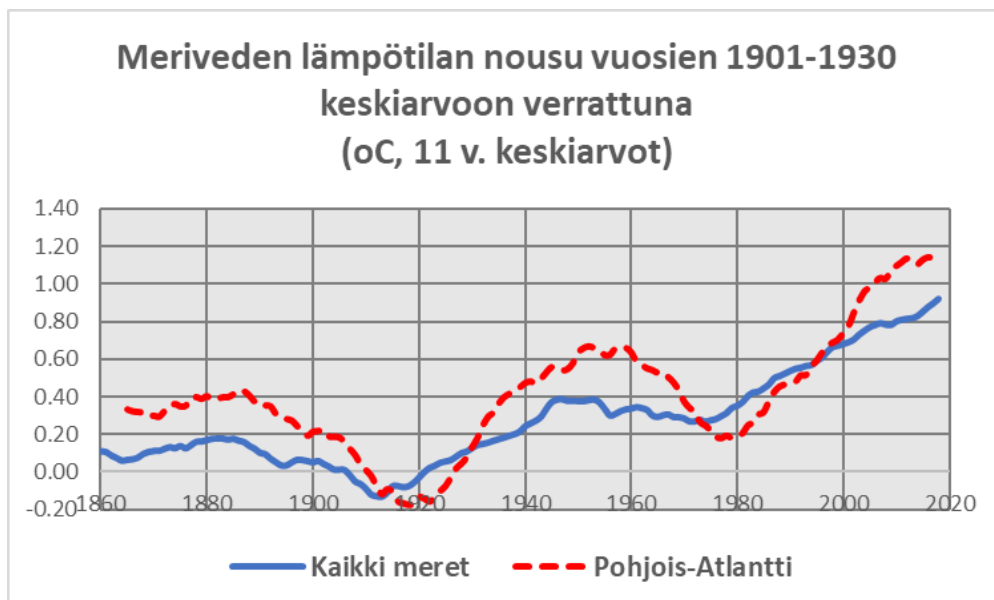


Kuva 12.1.2 Meriveden lämpötila ilman lämpötilan funktiona (°C, vuosikeskiarvot).

Merien lämpötilan vaihtelussa on havaittu myös syklisyyttä, jonka mukaan Pohjois-Atlantin meriveden lämpötila vaihtelee noin 60 vuoden syklissä (Kuva 15.1.3). Nyt ollaan vaiheessa, jossa Pohjois-Atlantin lämpötila on noin 0,2 astetta korkeampi kuin kaikkien merien keskilämpötila. Edellinen sama tilanne oli noin 60 vuotta aiemmin eli vuosina 1940–1960. Kun AMO- ilmiön lisää kaikkien merien lämpötilaa, havaitaan, että Pohjois-Atlantin merivesi on tänään noin 1,2 astetta lämpimämpää kuin vuosina 1901–1930 (Kuva 15.1.4).

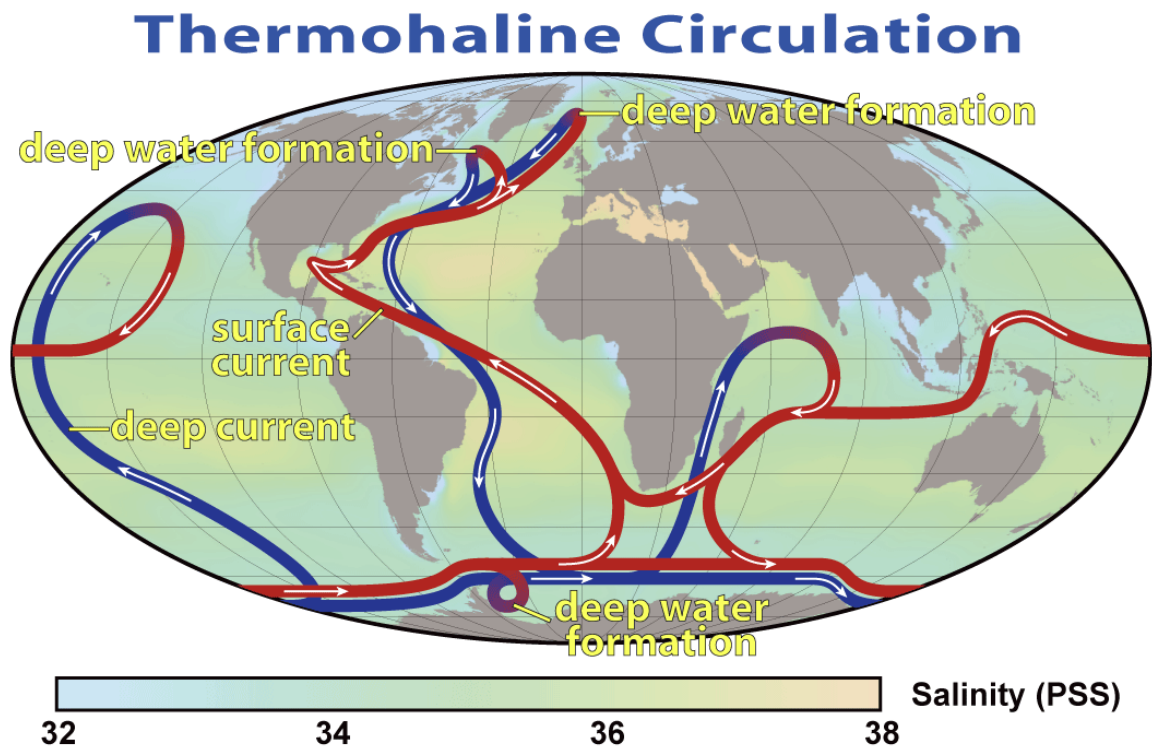


Kuva 12.1.3 Pohjois-Atlantin meriveden lämpötilan ero kaikkien merien lämpötilaan (AMO, °C).



Kuva 12.1.4 Kaikkien merien keskilämpötilan ja Pohjois-Atlantin lämpötilannousu vuosien 1901–1930 keskiarvosta (°C).

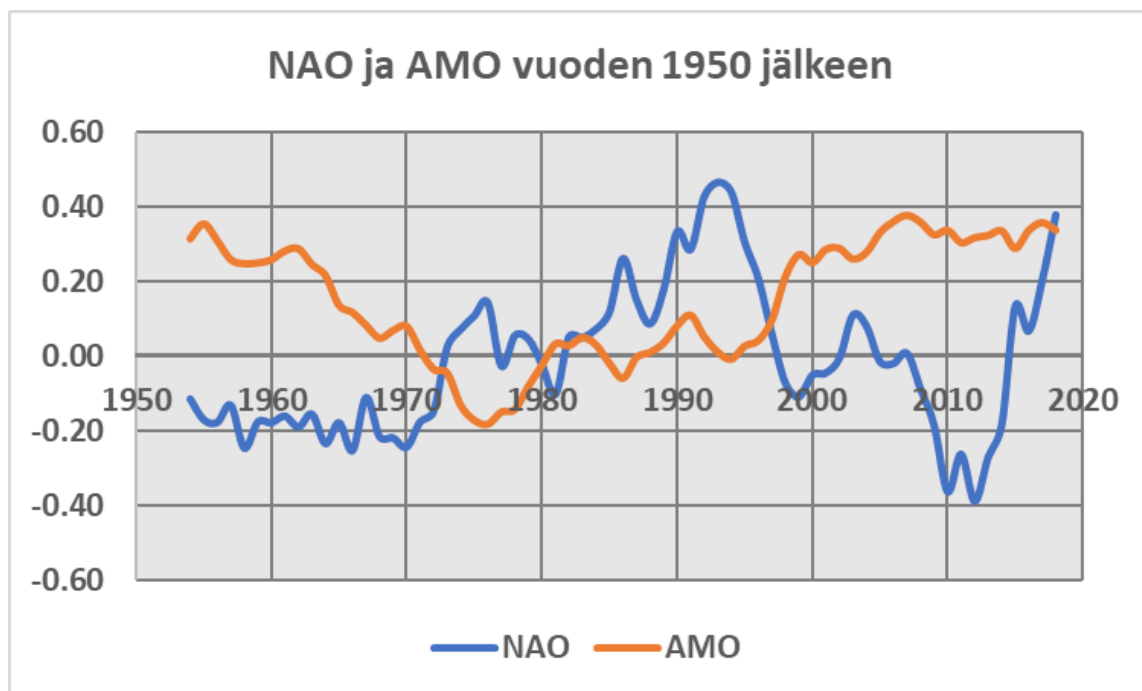
Yksi syy merien lämpötilojen vaihteluille voi olla merivirtojen kierto (Kuva 12.1.5), joka pumppaa lämmintä pintavettä Atlantilla etelästä pohjoiseen, josta se palaa kylmänä syvemmällä takaisin etelään. Etelässä tuulet puhaltavat jatkuvasti noin 40–50 asteen leveyspiirillä (Roaring Forties) lännestä itään, joka pyörittää varsinkin Tyynenmeren lämmennyt vettä maapallon ympäri. Siellä kiertäessään merivesi viilenee ja palaa kylmänä Tyynelle valtamerelle. Nämä -40° leveyspiirillä jatkuvasti idästä länteen puhaltavat kovat tuulet toimivat ilmeisesti meriveden kiertoliikkeen päämoottorina.



Kuva 12.1.5 Merivirtojen kiertosuunnat (Wikipedia)

12.2 Sään vaihtelut Atlantilla, NAO

Pohjois-Atlantilla on havaittu myös toinen ilmiö, joka on nimeltään Pohjois-Atlantin oskillaatio, NAO (North Atlantic Oscillation), joka mittaa paine-eroa Azoreitten ja Islannin välillä. Havaitaan, että ilmiö on käänteinen aiemmin mainitulle Pohjois-Atlantin meriveden lämpötilan oskillaatiolle, AMO:lle (Kuva 15.2.1). Kuvasta huomataan, että AMO ja NAO ovat nyt yhtä aikaa maksivaiheessa.

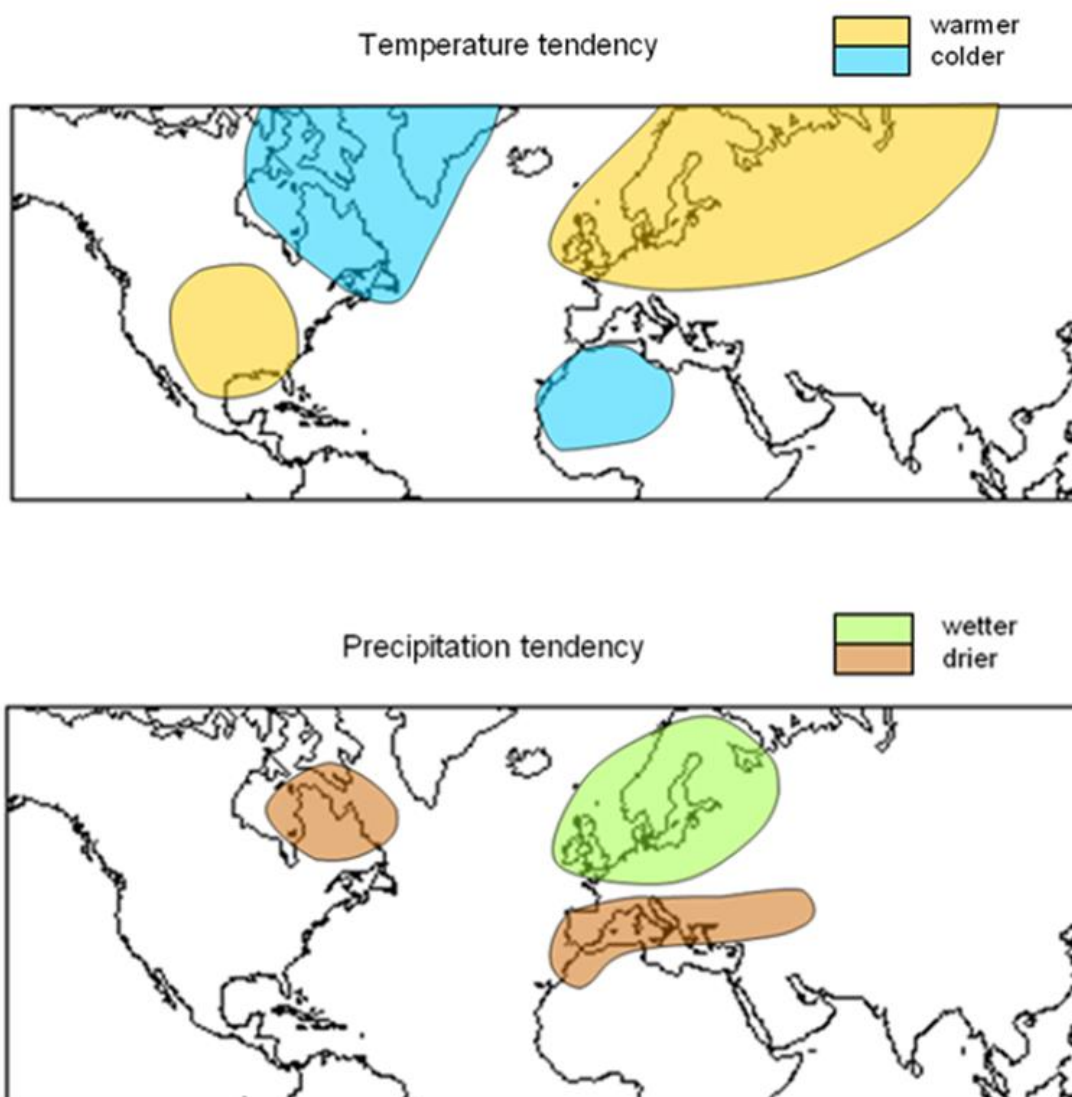


Kuva 12.2.1 NAO ja AMO vuoden 1950 jälkeen.

Kun NAO indeksi on selvästi nollan yläpuolella, Islannin luona on enemmän matalapaineita ja leudot lounaistuulet kohti Pohjoismaita lisääntyvät. Tämä aiheuttaa sen, että Pohjoismaissa on talvella tavallista lämpimämpää ja samalla Pohjoismaissa sataa enemmän vettä (Kuva 15.2.2). Vastaavasti Pohjois-Afrikan ja Välimeren seuduilla on kylmempää ja vettä sataa vähemmän.

Ilmiö vaikuttaa myös Pohjois-Amerikkaan, mutta päinvastoin. NAO:n ollessa korkealla tuulet puhaltavat Jäämereltä kohti Kanadaa ja ilma on siellä kylmempää. Vastaavasti USA:ssa on tavallista lämpimämpää. Samalla sateisuus Kanadassa vähenee.

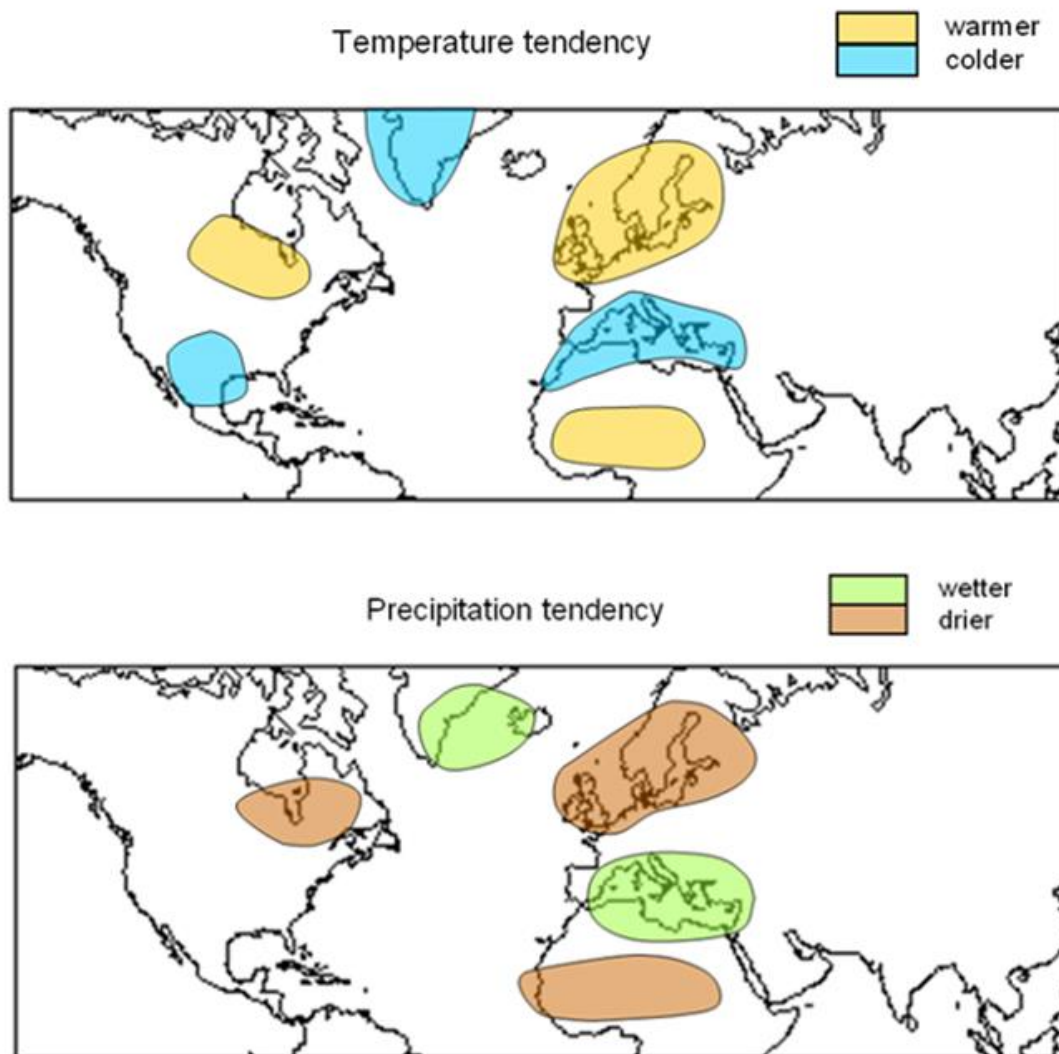
when the winter NAO index is well above zero



Kuva 12.2.2 Ilmasto, kun NAO-indeksi on talvella selvästi nollan yläpuolella (NOAA).

Kun NAO indeksi on selvästi nollan yläpuolella kesällä, Pohjoismaissa on tavallista lämpimämpää ja kuivempaa (Kuva 12.2.3). Vastaavasti myös Pohjois-Afrikassa ilma on lämpimämpää ja kuivempaa, jolla voi olla vaikutuksia viljelyyn. Kanadassa ilma on puolestaan tavallista lämpimämpää ja kuivempaa, mutta Meksikossa tavallista kylmempää. Näin NAO:n vaihtelu vaikuttaa myös Pohjois-Amerikan ilmastoon.

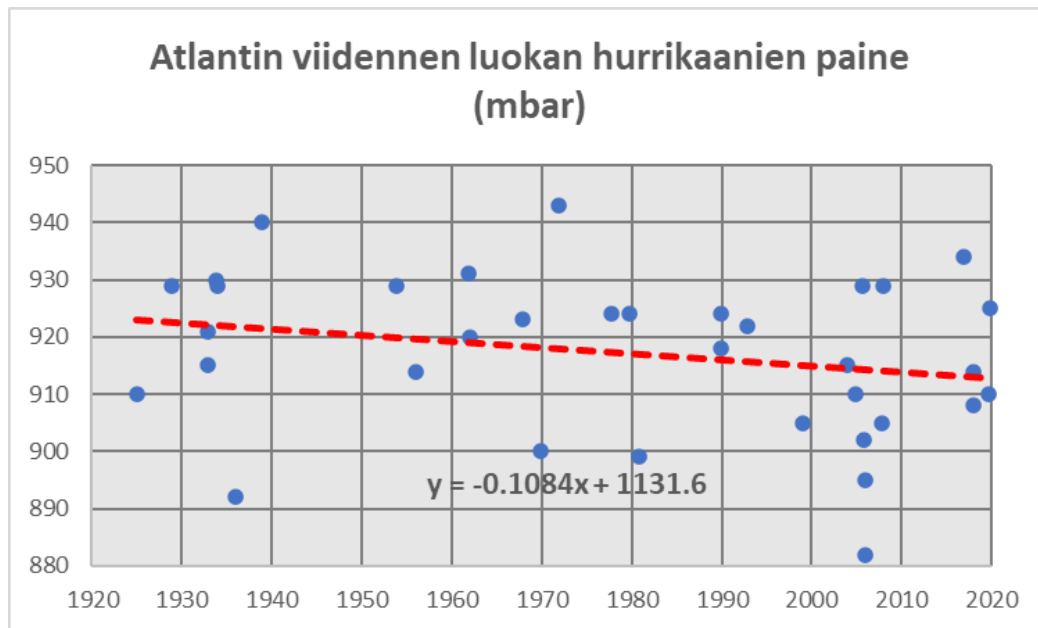
when the summer NAO index is well above zero



Kuva 12.2.3 Ilmasto, kun NAO-indeksi on kesällä selvästi nollan yläpuolella (NOAA).

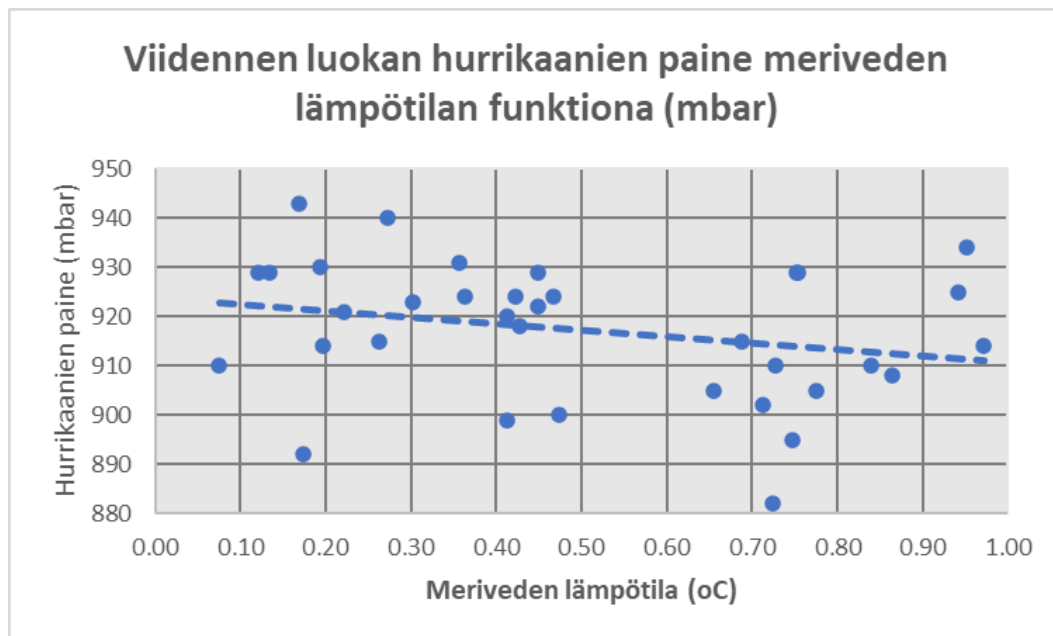
12.3 Hurrikaanit

Meriveden lämmetessä myös hurrikaanit ja taifuunit lisääntyvät ja niiden voima kasvaa. Vuodesta 1920 lähtien Atlantilla on ollut 37 viidennen luokan hurrikaania, joista kahdeksan tapahtui ennen vuotta 1940 ja 13 vuoden 2000 jälkeen (Kuva 12.3.1). Samalla hurrikaanien voima on kasvanut, koska niiden keskiössä mitattujen paineiden arvot ovat pienentyneet.



Kuva 12.3.1 Atlantin viidennen luokan hurrikaanien matalin paine (mbar).

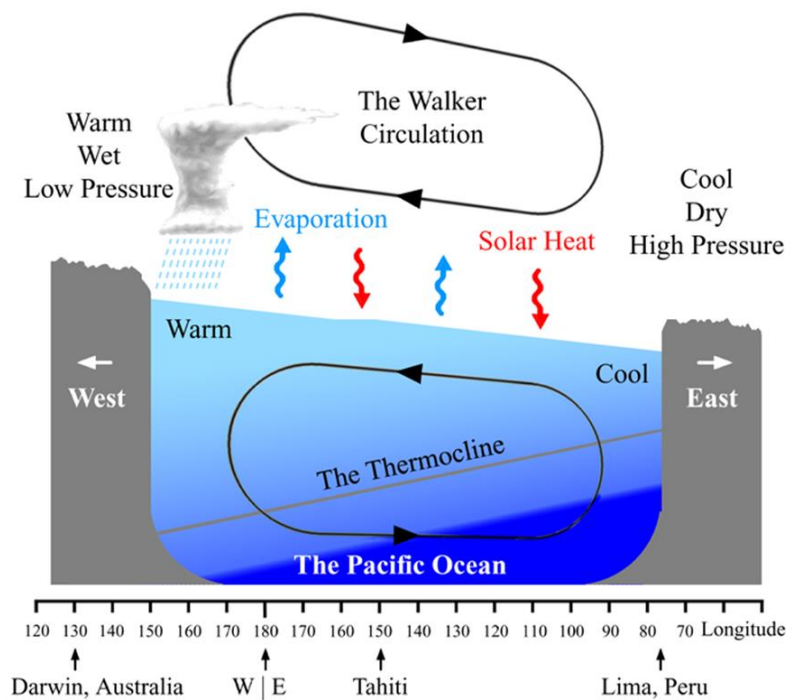
Kun hurrikaanien paine esitetään samassa kuvassa yhdessä meriveden lämpötilan kanssa, niin huomataan, että meriveden lämpötilan kasvaessa hurrikaanien paine laskee, jolloin hurrikaanit voimistuvat (Kuva 15.3.2).



Kuva 12.3.2 Viidennen luokan hurrikaanien matalin paine (mbar) meriveden lämpötilan funktiona.

12.5 Tyynenmeren lämpeneminen

Tyynellämerellä vaikuttaa myös sama tilanne kuin Atlantilla. Tuulet puhaltavat yleensä idästä länteen ja merivesi lämpenee, kun se lähestyy Filippiinien saaria (Kuva 15.5.1). Merivesi kulkee länteen ja aiheuttaa välillä taifuuneja aivan samalla tavalla kuin hurrikaaneja syntyy Atlantilla.

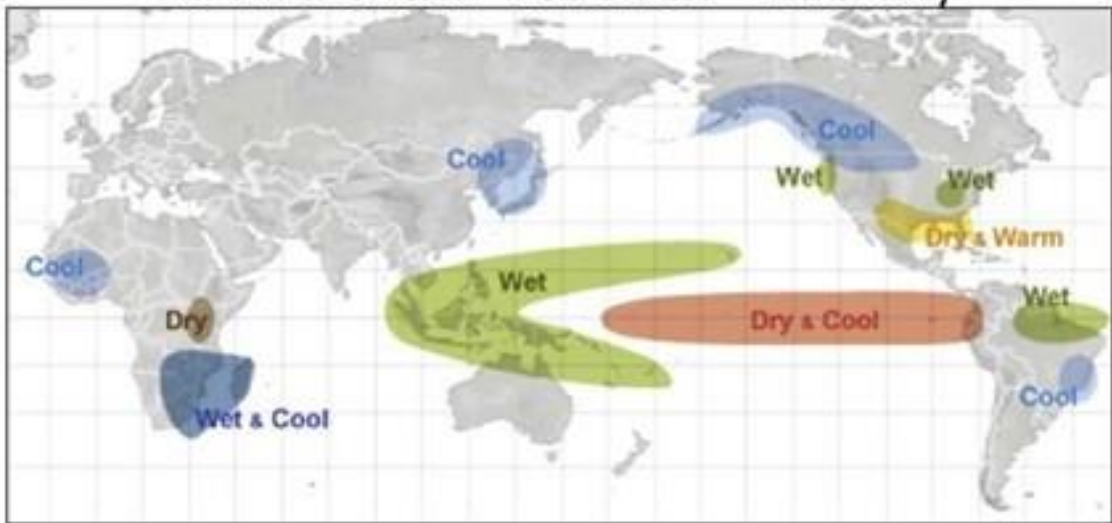


Kuva 12.5.1 Tyynen meren tuulet noudattavat yleensä Walker-kiertoa, jolloin lämmin vesi pakkautuu Filippiinien ja Australian rannikoille. Tätä vaihetta kutsutaan myös nimellä La Nina-vaiheeksi, jota pidetään normaalitilana.

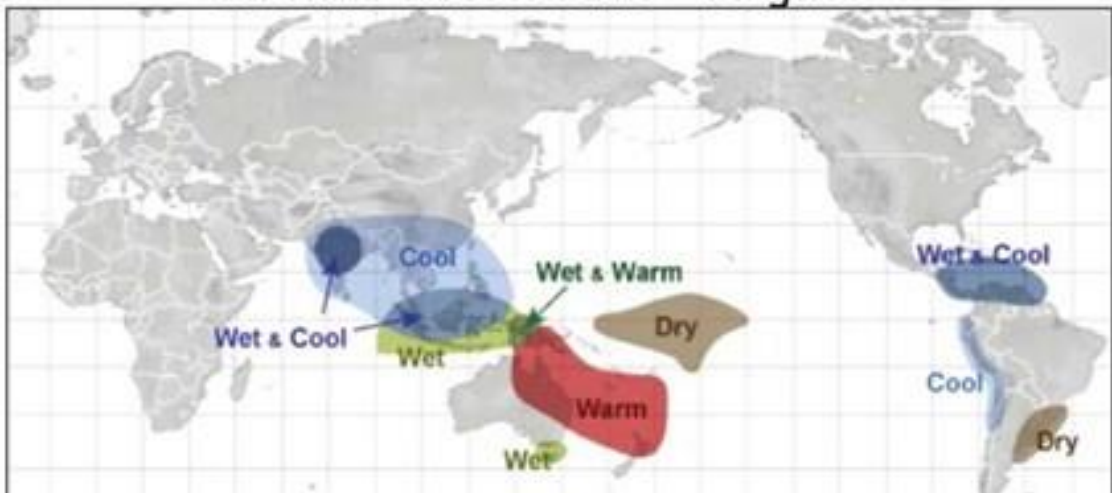
Aasiassa merivesi painuu syyvyyyksiin ja palaa kylmänä takaisin kohti Chilen rannikkoa. Vesi on ravinnerikasta ja houkuttelee kalastajia Perun ja Chilen rannikoilla. Ilmiötä on kutsuttu kalastajien keskuudessa La Nina-ilmiöksi.

La Nina vaiheessa Etelä-Amerikassa on korkeapaine ja tuulet käyvät Amerikasta kohti Aasiaa ja puskevat lämmintä vettä Filippiinien ympäristöön. Samalla siellä on kosteampaa ja sateisempaa. Myös metsäpalot saadaan Aasiassa silloin paremmin hallintaan. La Nina lisää sateita myös Itä-Afrikassa ja siellä saadaan parempia satoja. Pohjois-Amerikassa on taas tavanomaista kuivempaa ja metsäpalot lisääntyvät sen vuoksi (Kuva 15.5.2).

La Niña effects December - February



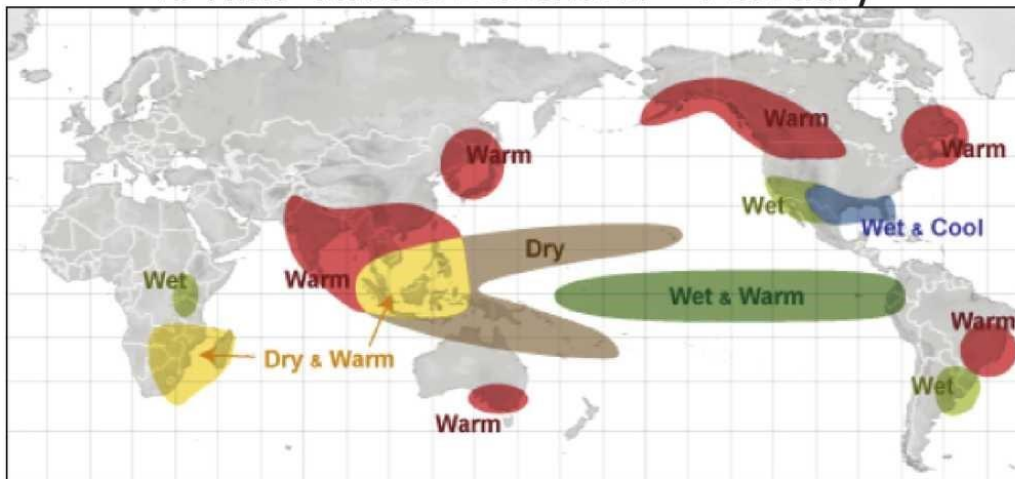
La Niña effects June - August



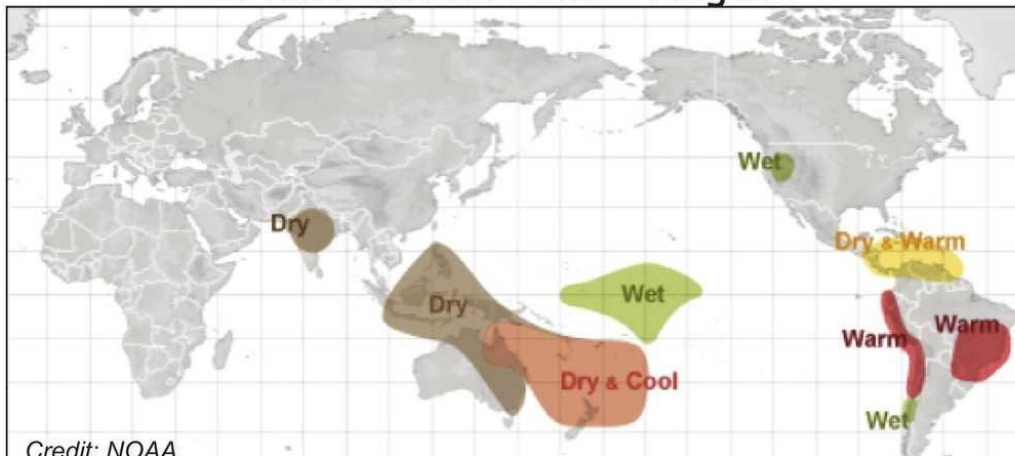
Kuva 12.5.2 La Nina vaiheessa tuulet puhaltavat Tyynellämerellä lännestä itään (Lähde NOAA).

El Nino -vaiheessa Filippiineillä on korkeapaine ja tuulet puhaltavat Aasiata kohti Amerikkaa. Tuulet puskevat lämmintä vettä Tyyneltämereltä Etelä-Amerikan rannikolle, josta se laskeutuu pohjalle. Kalat katoavat Chilen rannikolta. Vaikutukset ovat olleet monenlaisia läpi koko maailman (Kuva 12.5.3). Aasiassa on lämmintä ja kuivaa. Metsäpalot lisääntyvät. Pohjois-Amerikassa on kosteampaa ja metsäpalot vähenevät.

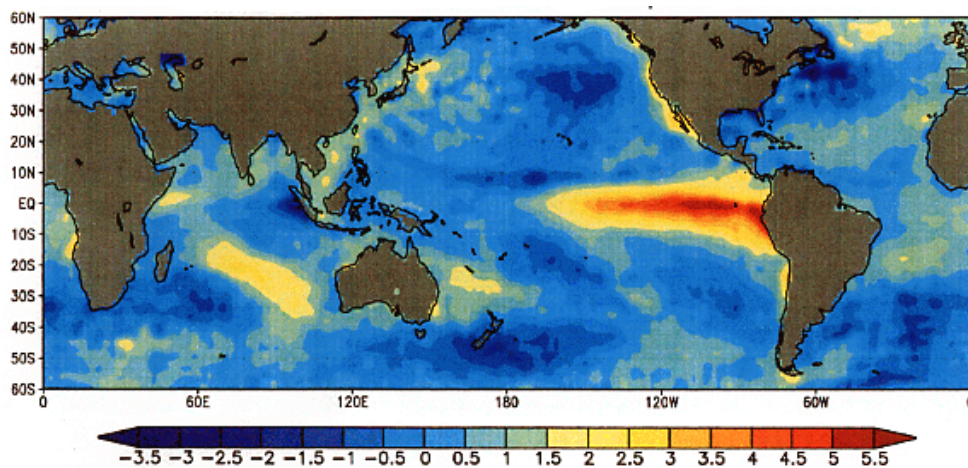
El Niño effects December - February



El Niño effects June - August



Credit: NOAA

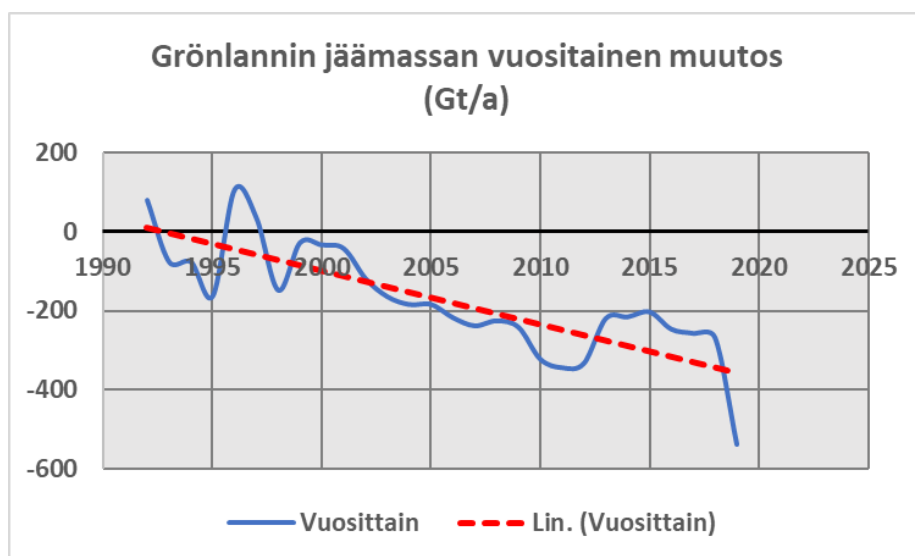


Kuva 12.5.3 El Nino vaiheessa tuulet puhaltavat Aasiasta Etelä-Amerikkaan (NOAA).

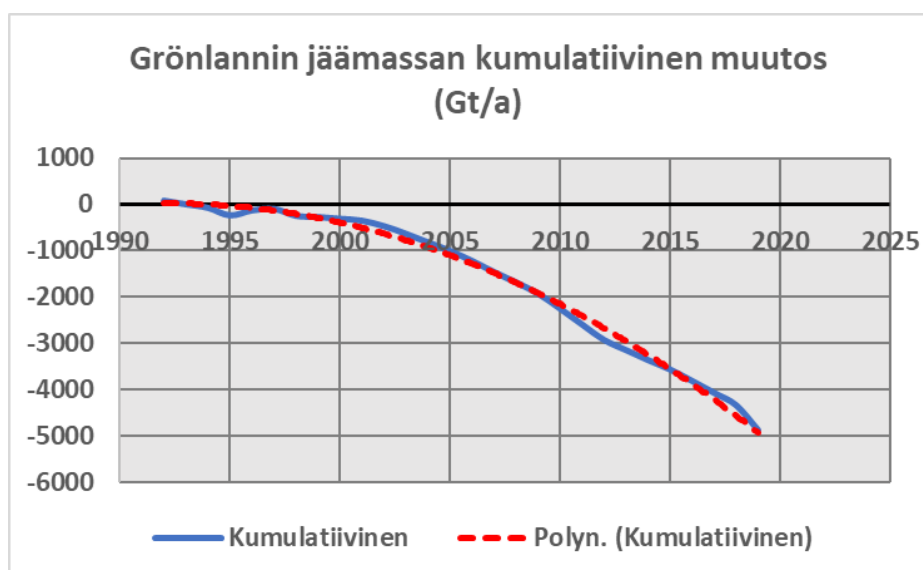
12.6 Jäätiköiden sulaminen

Grönlanti

Ilmaston lämpeneminen aiheuttaa mannerjäiden sulamista, joka merkitsee sulamisveden lisääntymistä maailman merissä ja samalla meriveden pinnan nousua. Grönlannin jäämassa on vähentynyt vuoden 1992 jälkeen yli 200 Gt vuodessa vuosina 2005–2019 (Kuva 15.6.1). Jään väheneminen on ollut yhteensä noin 5000 gigatonnia (Kuva 15.6.2). Se vastaa merenpinnan nousua 13,5 mm.



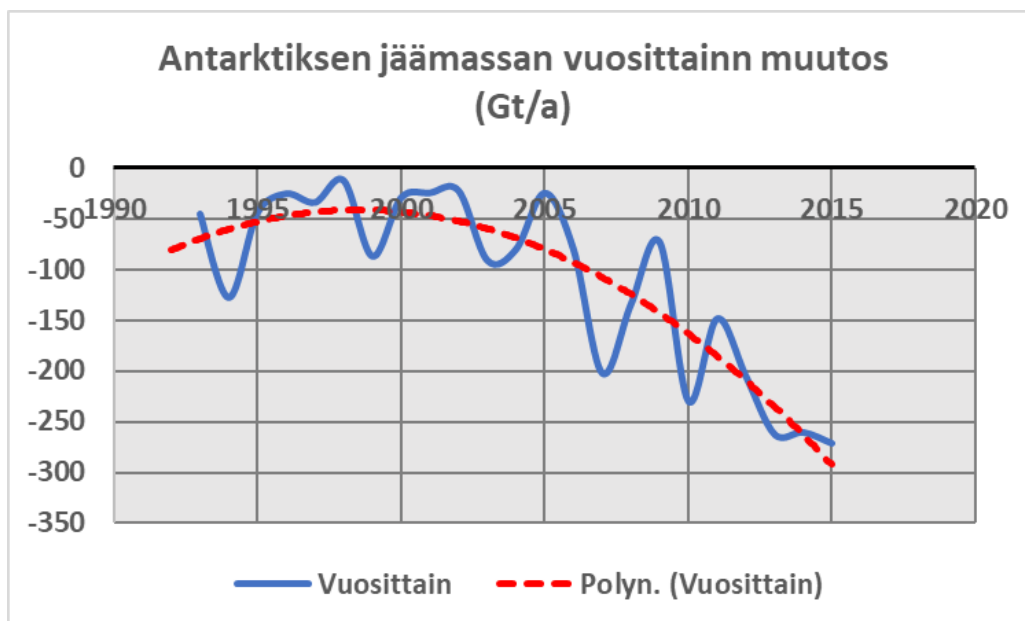
Kuva 12.6.1 Grönlannin jäämassan väheneminen vuosittain (Gt/a, Imbie 2019).



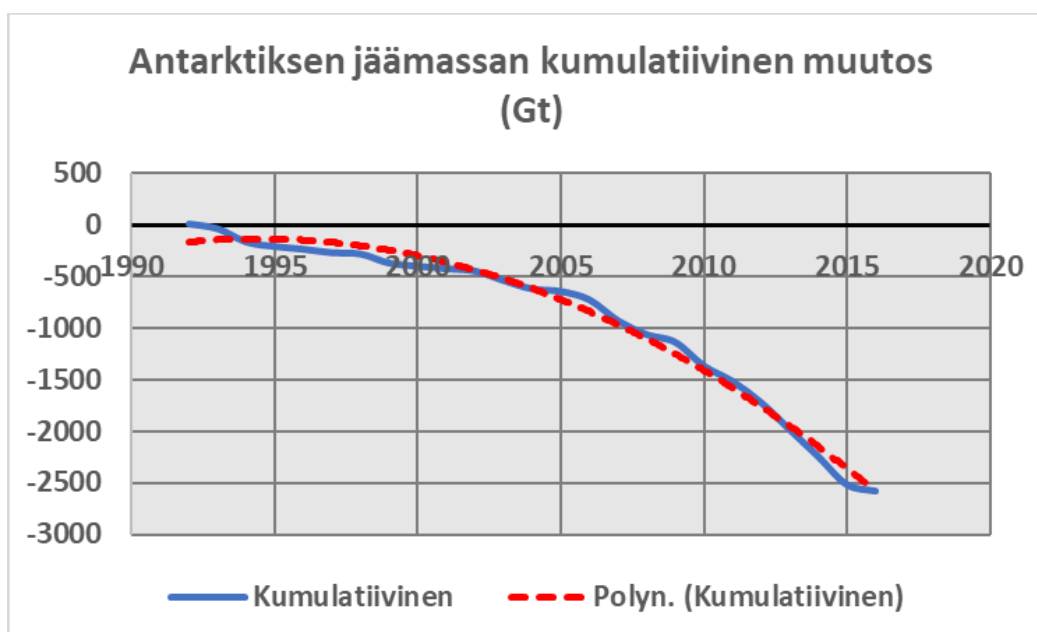
Kuva 12.6.2 Grönlannin kumulatiivinen jäämassan väheneminen (Gt).

Antarktis

Antarktiksien jäämassa on vähentynyt 200–300 gigatonnia vuodessa vuosina 2010–2015 (Kuva 15.6.3). Kumulatiivinen muutos vuoden 1992 jälkeen on ollut 2500 gigatonnia (Kuva 12.6.4). Se vastaa merenpinnan nousua 7 mm. Yhdessä Grönlannin sulamisen kanssa nämä kaksi jäätikköä ovat aiheuttaneet yhdessä noin 7500 gigatonnin sulamisen, joka on nostanut meren pintaa noin 20 mm merenpinnan nousun vuosien 1992 ja 2018 välillä. Vuoden 2015 kohdalla jäämassaa on hävinnyt keskimäärin 800 gigatonnia vuodessa, joka puolestaan vastaa merenpinnan nousua 2,1 mm vuodessa.



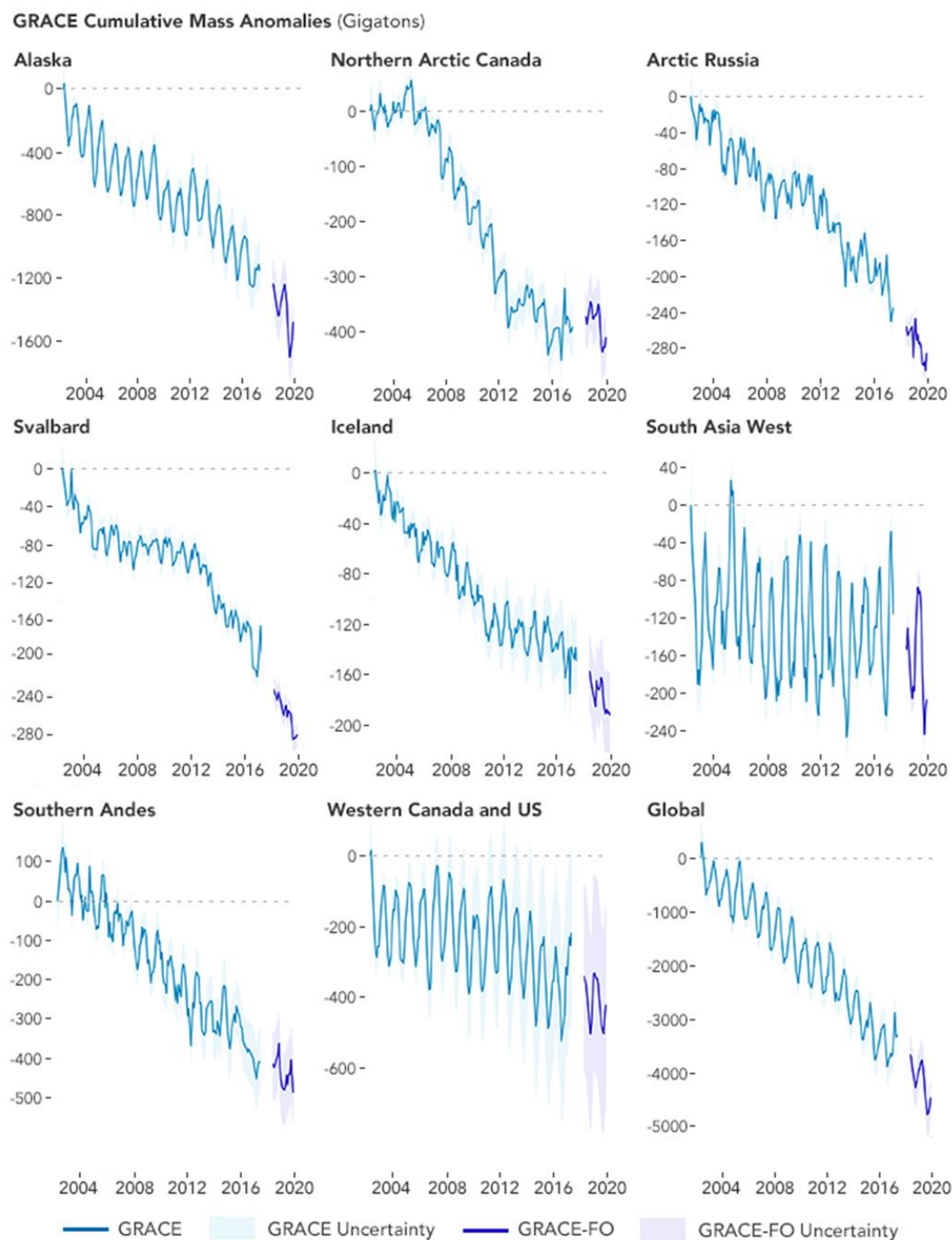
Kuva 12.6.3 Antarktiksien jäämassan vuosittainen muutos (Gt/a).



Kuva 12.6.4 Antarktiksien jäämassan kumulatiivinen muutos (Gt).

Jäätiköt

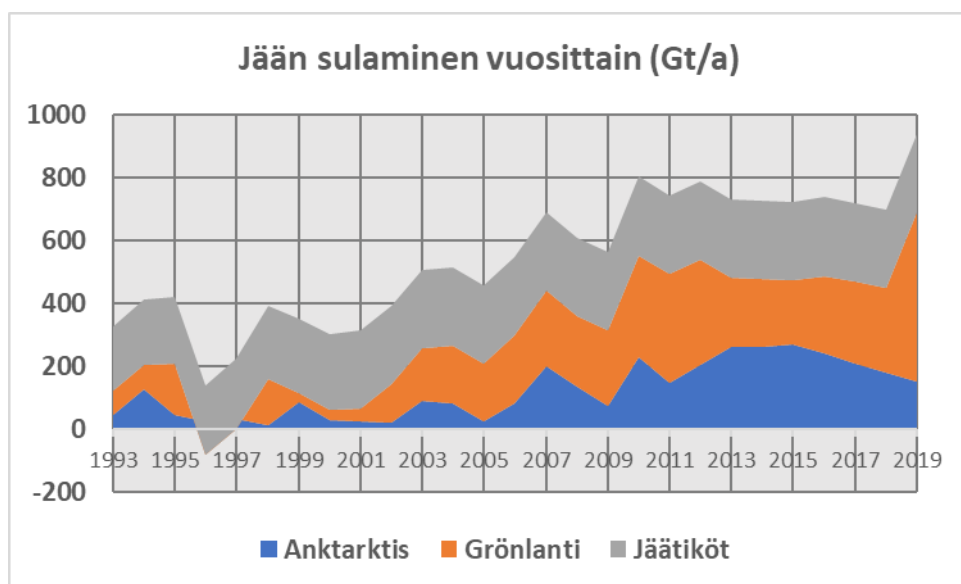
Nasan Grace-satelliittien mittausten avulla on havaittu jäätieköinen sulamista muualla kuin Grönlannissa ja Antarktiksella. Niiden yhteinen vaikutus on vuoden 2004 ja 2019 välillä ollut 5000 gigatonnia eli keskimäärin noin 330 gigatonnia vuodessa (Kuva 12.6.5).



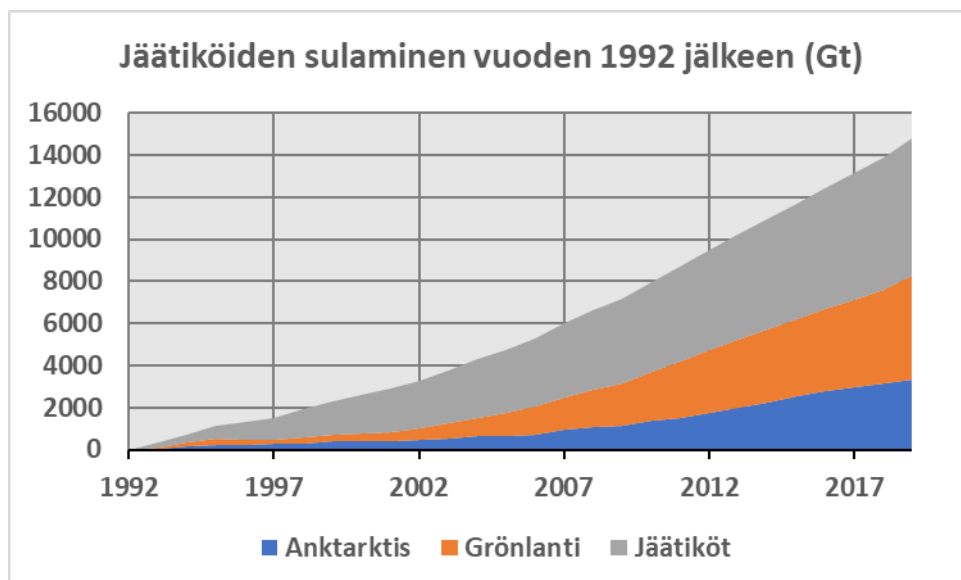
Kuva 12.6.5 Jäätiköiden jäämassan muutokset (Nasa: Grace satelliitti).

12.7 Merenpinnan nousu

Kun Grönlannin, Antarktisen ja jäätiekoiden jäämassojen väheneminen lasketaan yhteen, saadaan tulokseksi, että jäämassa väheneminen on nopeutunut noin 400 gigatonnista nykyiseen noin 900 gigatonnin vuodessa (2,2 mm/a) Grönlannin nopean sulamisen takia (Kuva 12.7.1). Yhteensä jäätä on sulanut tähän mennessä 15.000 gigatonnia vuoden 1992 jälkeen (Kuva 15.7.2).

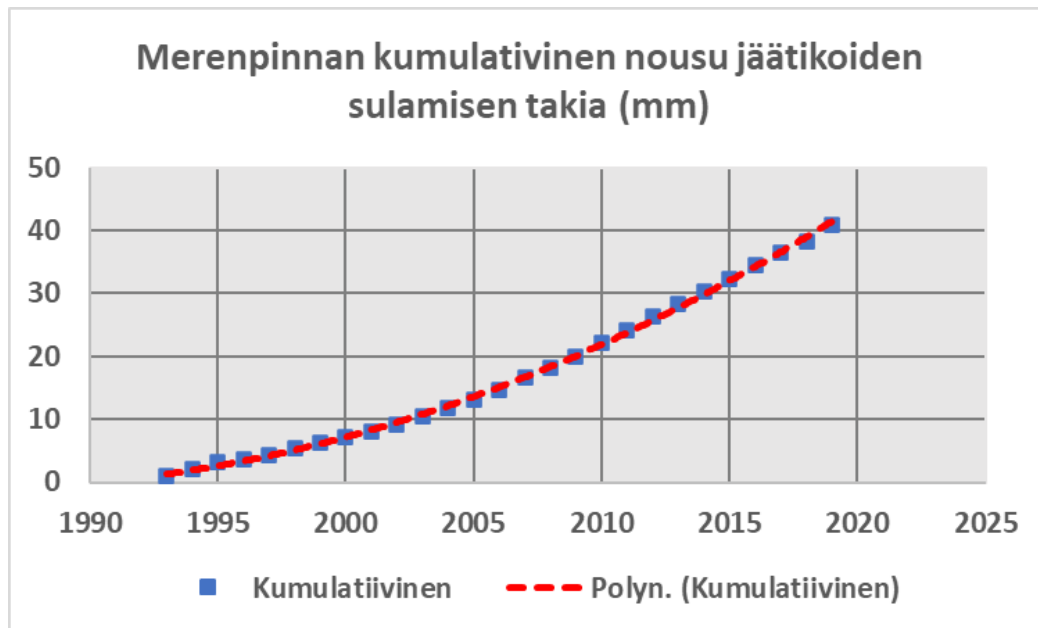


Kuva 12.7.1 Jään sulaminen vuosittain (Gt/a).

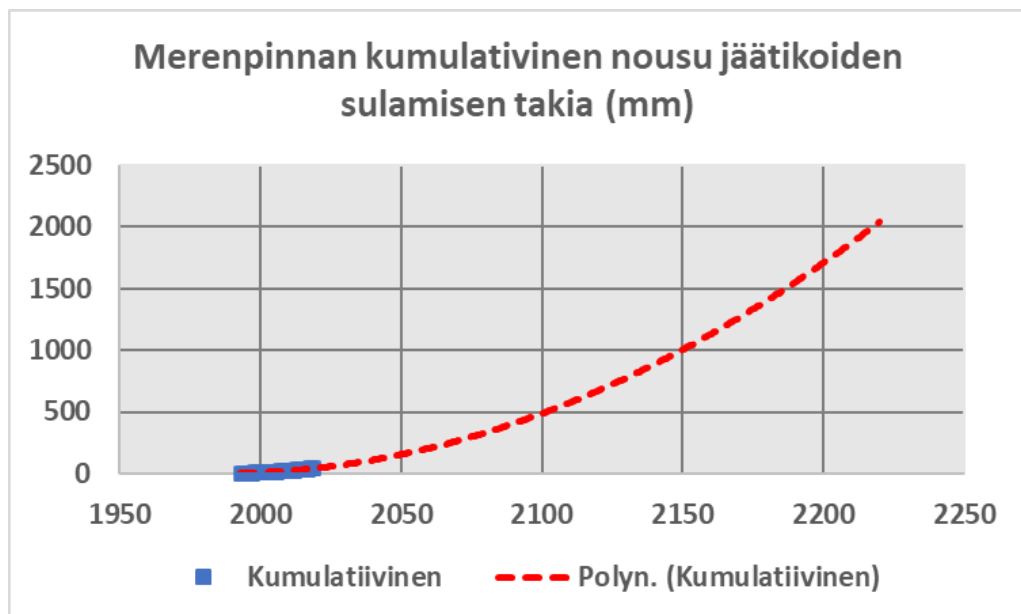


Kuva 12.7.2 Jään kumulatiivinen sulaminen vuoden 1992 jälkeen (Gt).

Jäätiköiden sulaminen on aiheuttanut vuoden 1992 jälkeen noin 40 mm merenpinnan nousun (Kuva 12.7.3). Jos sama trendi jatkuu vuoteen 2220 asti, merenpinta nousee noin kaksi metriä (Kuva 12.7.4).

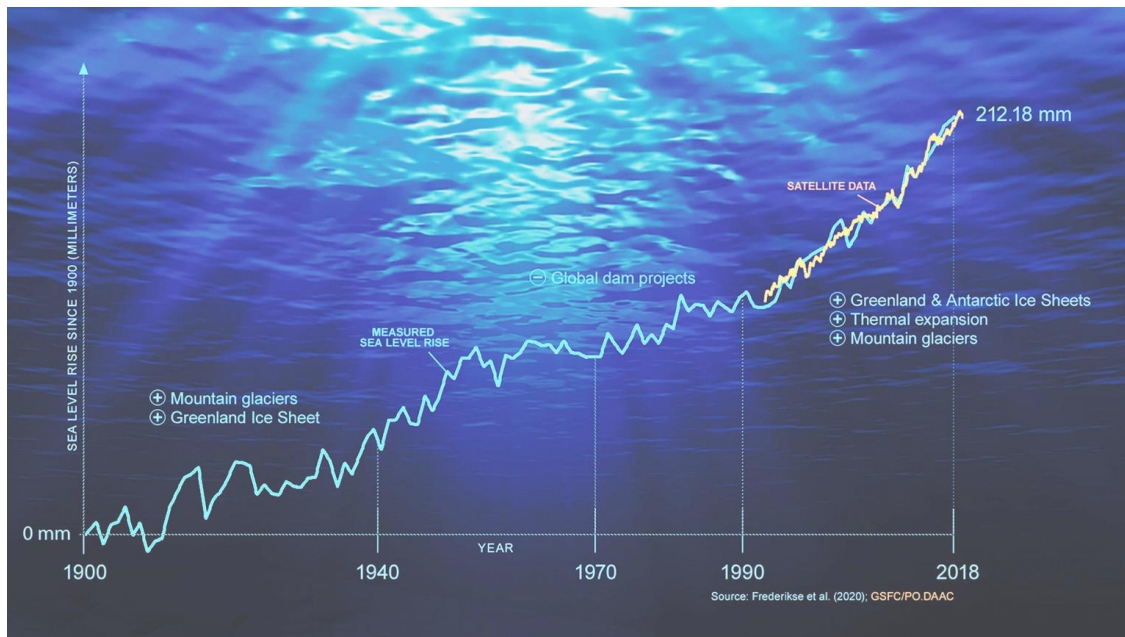


Kuva 12.7.3 Jäätiköiden sulamisen aiheuttama merenpinnan nousu vuoden 1992 jälkeen (mm).



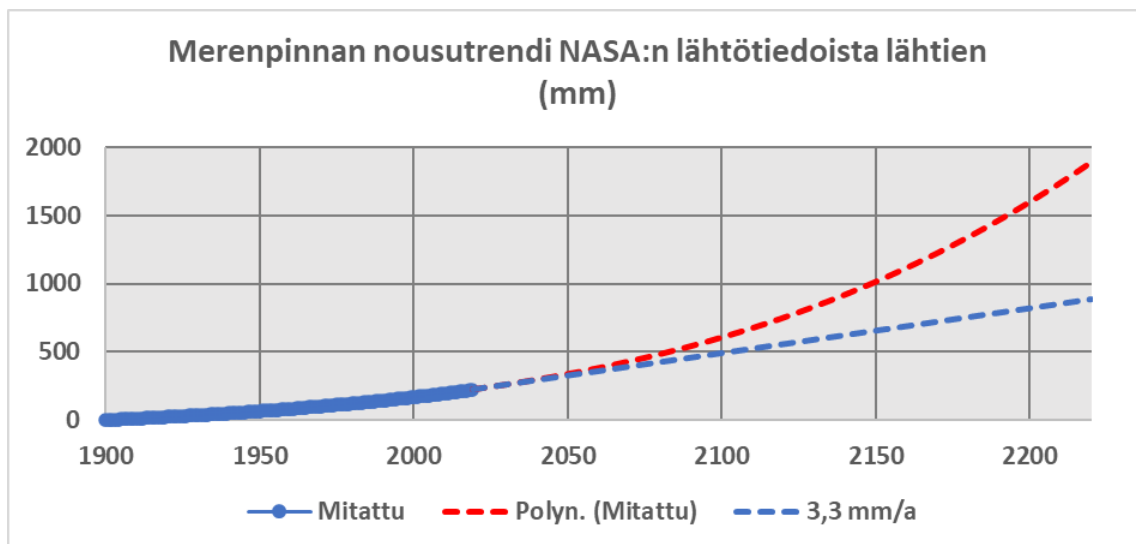
Kuva 12.7.4 Meren pinnan nousutrendi jäätiköiden sulamisen takia (mm).

Merenpinnan nousua tapahtuu myös merten lämpenemisen takia. Kun lasketaan merenpinnan nousu vuodesta 1900 lähtien, saadaan Nasan mukaan vuonna 2019 arvoksi 212 mm (Kuva 12.7.5). Kuvan mukaan merenpinta on noussut vuoden 1990 jälkeen noin 92 mm eli keskimäärin noin 3,2 mm vuodessa.



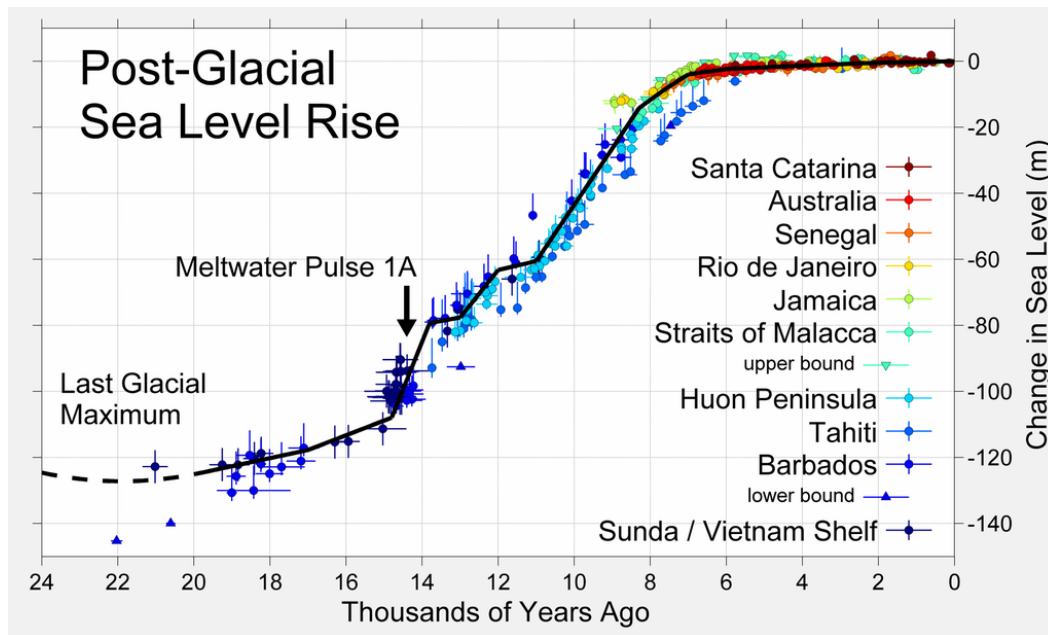
Kuva 12.7.5 Nasan arvio merenpinnan noususta vuodesta 1900 lähtien (mm).

Aivan viime vuosina NASA ilmoittaa nousun olevan luokkaa 3,3 mm vuodessa. Jos trendi jatkuu samanlaisena nousu olisi noin 900–1900 mm vuonna 2220 (Kuva 12.7.6) vuosisadan alkuun verrattuna. Tuleva noin 3,3 mm/a lineaarinen trendinousu 200 vuodessa tarkoittaisi merenpinnan nousu 660 mm. Polynomisen trendin mukaan nousu voisi olla noin 1600 mm eli noin 8 mm vuodessa.



Kuva 12.7.6 Merenpinnan nousutrendi Nasan tiedoista lähtien (mm).

Viime jääkauden jälkeen merenpinta nousi noin 120 metriä 10.000 vuodessa. Nousunopeus oli keskimäärin noin 12 millimetriä vuodessa (Kuva 15.7.7). Se oli nopeampaa kuin seuraavan kahdensadan vuoden aikana polynomisen trendin mukaan ennustettu nousu 8 mm vuodessa.

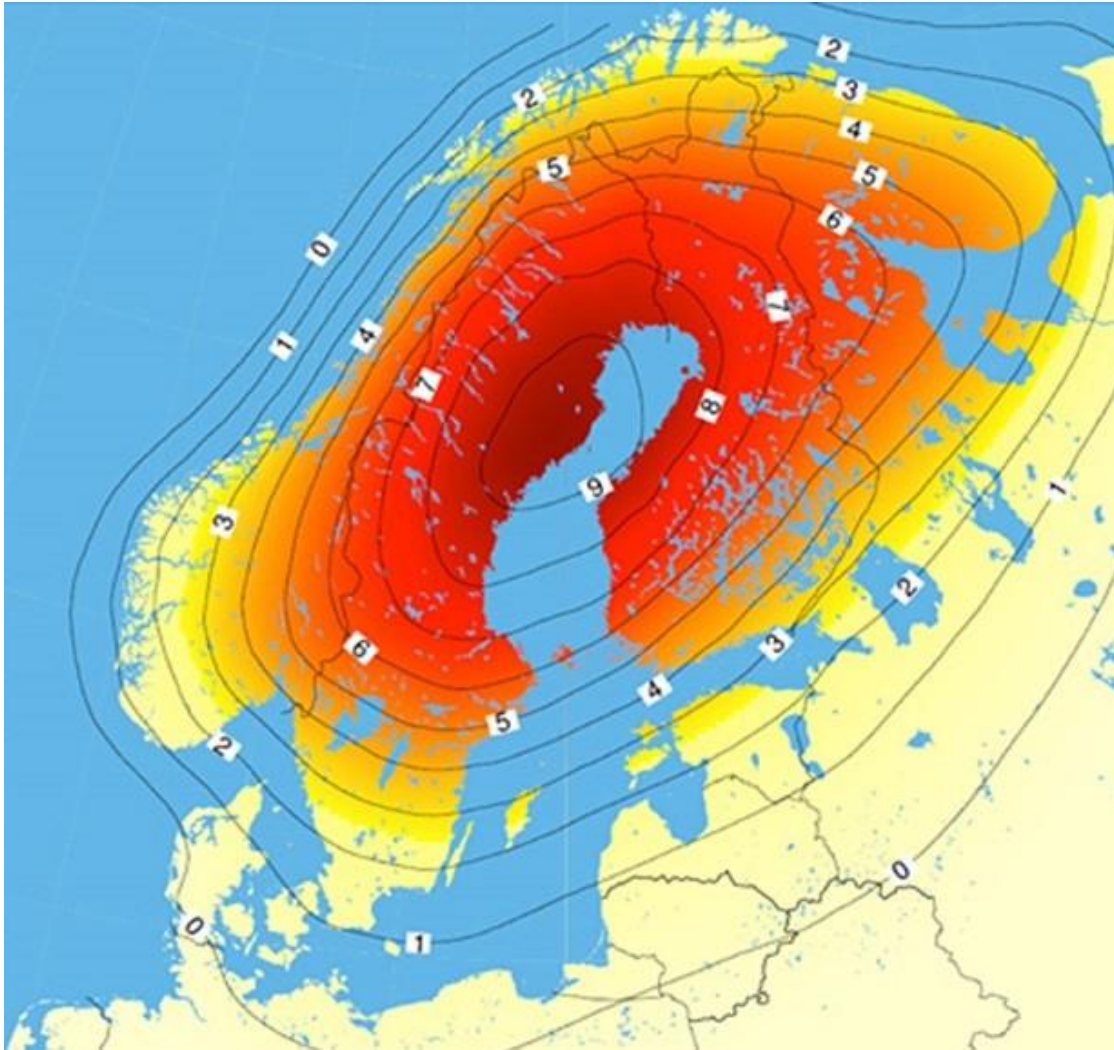


Kuva 12.7.7 Merenpinnan nousu viimeisen jääkauden jälkeen.

Suomen kannalta 3,3 mm merenpinnan nousu ei vielä ole vielä tällä nopeudella paha uhka, koska maanpinta nousee Suomessa kaikkialla vähintään 3 mm vuodessa (Kuva 12.7.8). Vaasan seudulla maa nousee jopa 9 mm vuodessa. Mutta merenpinta voi nousta Suomenlahden itäpäässä jopa yli 2 m tuulten vaikutuksesta. Sen vuoksi Pietarin suojaksi on rakennettu massiiviset turvapadot. Myös Loviisan ydinvoimalan tulvasuojia on korotettu.

Jos merenpinta nousee tulevaisuudessa Nasan mittauksen perusteella lasketun polynomisen trendin mukaan (Kuva 12.7.6) 1700 mm kahdessa sadassa vuodessa, siitä maan kohoaminen kompensoi Helsingissä noin 700 mm. Nettonousuksi tulee noin 1000 mm, joka pitää huomioida taloja ja teitä rakennettaessa. Suurin mitattu merenpinnan korkeus Helsingissä on kasvanut vuoden 1910 arvosta +1300 mm arvoon +1500 mm. Kun nettonousuun 1000 mm lisätään tähän mennessä mitattu suurin merenpinta myrskyjen aikana +1500 mm, saadaan ennustetuksi merenpinnaksi +2500 mm. Tässä oletetaan, että päästöjen kehitys jatkuu kasvavana. Tarkempi ennuste on tehty päästöjen mukaan kohdassa 13.1.

Merenpinnan nousu on vakava ongelma, koska ilmaston lämmetessä myös hirmumyrskyt lisääntyvät. Monien myrskyjen suurimmat tuhot aiheuttavat juuri vesimassojen noususta yli suojavallien. Tämän vuoksi suojavalleja joudutaan vahvistamaan ja rakentaminen siirtää pois alavilta seuduilta.



Kuva 12.7.7 Maan kohoaminen Pohjoismaissa (mm vuodessa), Lähde: Markku Poutanen, Maanmittauslaitos.

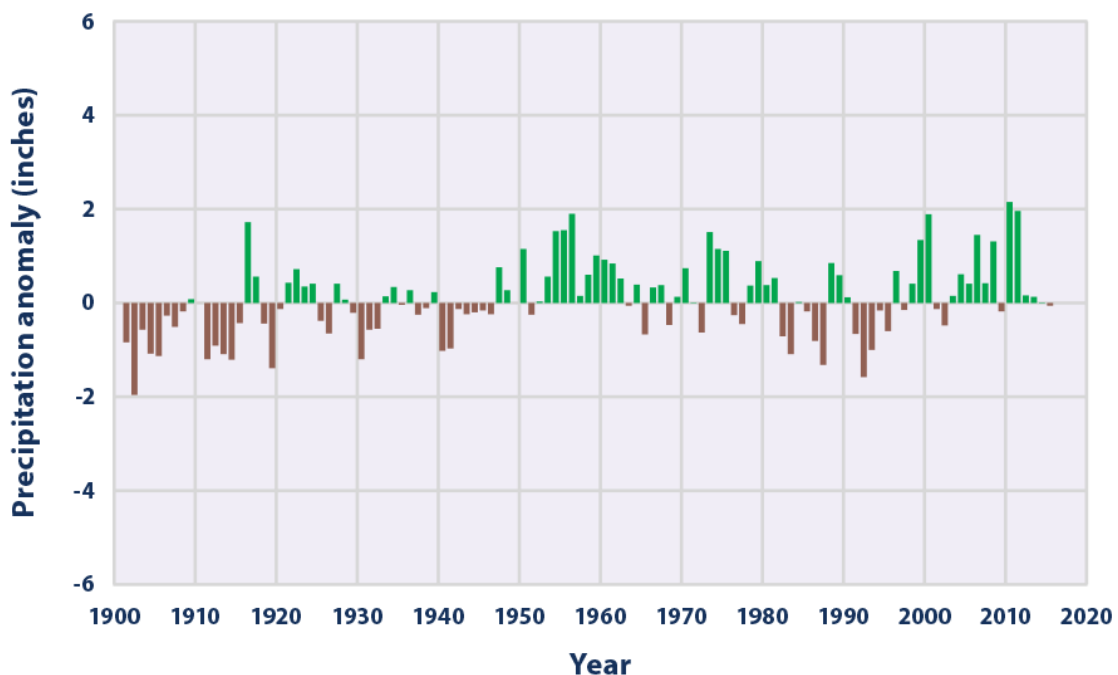
Maa ei kuitenkaan juuri enää kohoa Tanskan ja Saksan rannikoilla. Niissä ja niiden eteläpuolella olevissa maissa Hollannissa ja Ranskassa, joissa täytyy varautua noin 3000 mm merenpinnan nousuun. Ranskassa vuorovesi-ilmiö voi nostaa meren pintaa sen lisäksi useita metrejä, joten siellä merenpinnan nousu on jo tänään tuttu ilmiö.

Pahin tilanne on maissa, joissa taloja on rakennettu jokien suistoihin meren rantaan ilman suojia. Useina vuosina tulvat ja vesimassat vievät talot esimerkiksi Bangladeshin jokien suistoissa. Myös rankkasateet ovat aiheuttaneet suurtulvia myös USA:ssa, jossa Katrina-hurrikanin aikana joet tulvivat New Orleansin kaduille vuonna 2005.

12.8 Sademäärät

Ilmaston lämpenemisen seurauksena sateiden määrät ovat lievästi lisääntyneet (Kuva 12.8.1). Vuosina 2000–2015 sademäärät ovat olleet noin 25 mm suuremmat kuin keskimäärin ja vuosina 1900–1920 noin 25 mm pienemmät kuin keskimäärin.

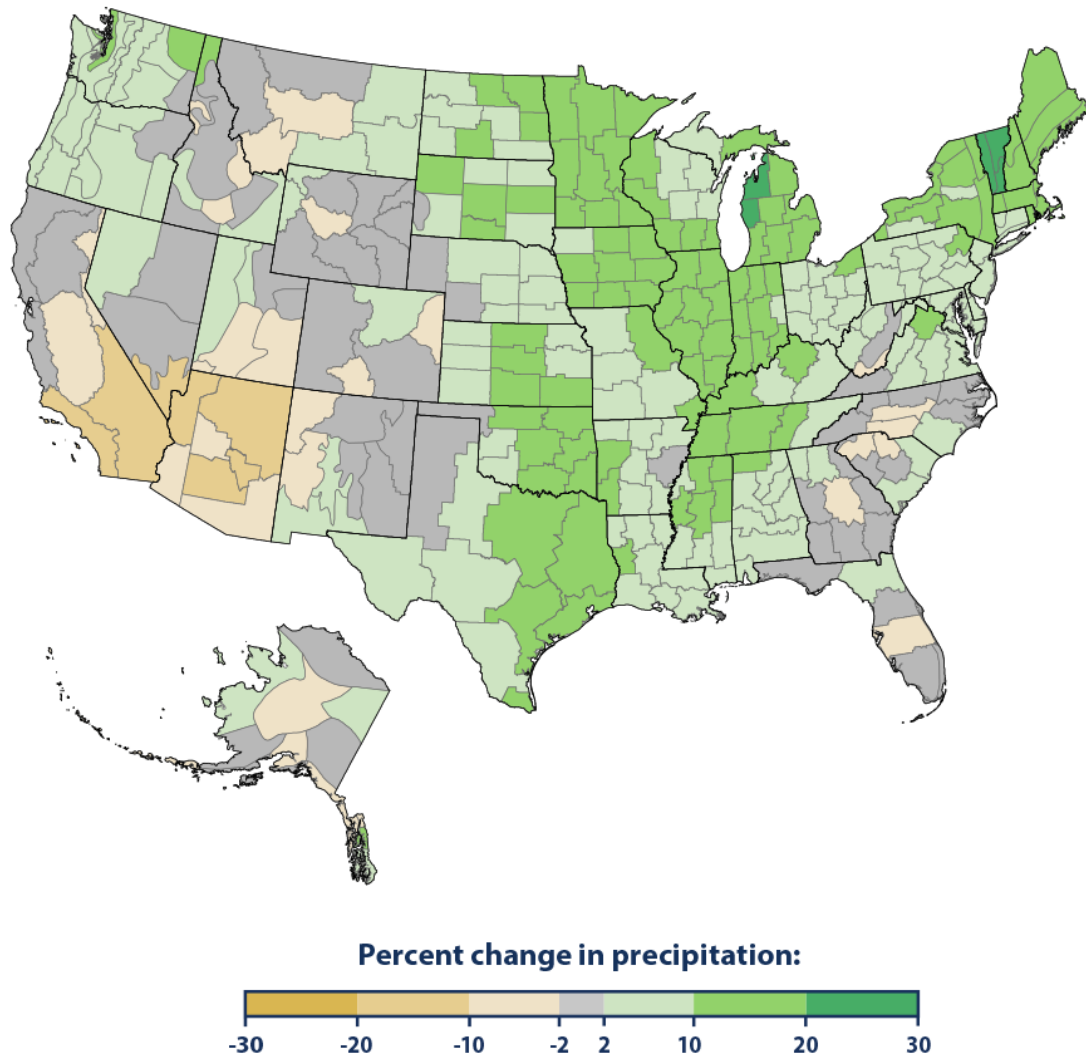
Kun ilma on samalla aikavälillä lämmennyt noin yhden asteen, jokainen aste on vastannut sademääränä noin 50 mm lisäystä. Kehitys ei kuitenkaan ole ollut lineaarista, koska esimerkiksi vuosina 1950–1980 sademäärät olivat myös normaalia korkeampia. Tämä saattoi aiheutua runsaista rikkipäästöistä noina vuosina. Vuonna 2050 sademäärä olisi luultavasti merien lämpenemisen takia edelleen 50 mm suurempi kuin tänään.



Kuva 12.8.1 Maailman keskimääräiset sademäärät vuosittain (NOAA).

Suuria ongelmia on aiheuttanut kaikkialla rankkasateiden lisääntyminen. Esimerkiksi vuonna 2020 kymmeniä ihmistä on kuollut rankkasateiden aiheuttamissa tulvissa ja maanvyöryissä Japanissa ja Kiinassa. Myös Espanjan aurinkorannikolla kuoli useita ihmisiä Välimeren rannikolla rankkasateiden ja maanvyörymien takia vuonna 2019.

Vaikka sademäärät ovat globaalisti kasvaneet, niin on alueita, jossa sademäärät ovat vähentyneet. Esimerkiksi Kaliforniassa ja Arizonassa sademäärät ovat vähentyneet noin 20–30 % (Kuva 12.8.2). Se on aiheuttanut muun muassa metsäpaloja viime vuosina.



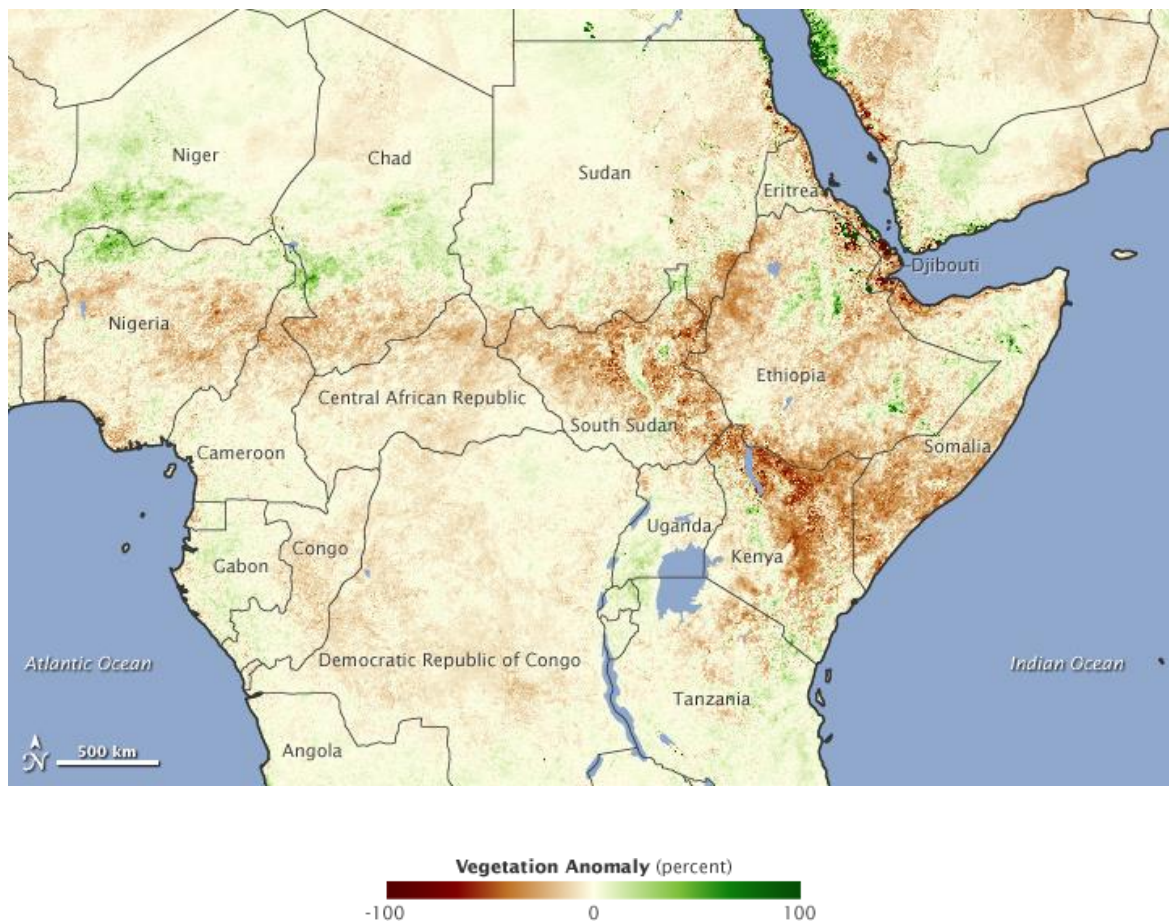
Kuva 12.8.2 Sateiden muutos USA:ssa (NOAA).

Afrikassa sademäärä on havaittavissa vihreistä alueista Nasan satelliittikuvissa (Kuva 12.8.3). Sademäärät vaihtelevat sen lisäksi vuosittain valtavasti ja noudattavat usein Tyynen valtameren La Nina- ja El Nino- ilmiöitä.



Kuva 12.8.3 Nasan satelliittikuva Afrikasta. Keltaiset alueet ovat hyvin vähäsateisia (alle 500 mm/a) (Lähde: Nasa).

Monina vuosina kuivuus koettelee pahasti Itä-Afrikkaa ja johtaa nälänhätiin, kun satoja ei saada. Vuonna 2011 kuivuus oli pahinta 20 vuoteen ja sen kerrottiin aiheutuvan La Nina - ilmiöstä (Kuva 12.8.4). Se aiheutti nälänhätää Keniassa, Somaliassa, Etiopiassa ja Etelä-Sudanissa, jolloin kuoli vuoden 2011 aikana noin 260.000 ihmistä pelkästään Somaliassa. Kuivuuteen voidaan vaikuttaa rakentamalla vesivarastoja, joita on tehty mm. Suomen ulkomaanavulla Itä-Afrikkaan. Kuivuuden takia myös muuttopaine Afrikasta Eurooppaan lisääntyy.



Kuva 12.8.4 Kasvillisuuden poikkeama normaalista 2011 huhtikuusta kesäkuuhun (NASA).

Yhteenveto

Merien lämpeneminen aiheuttaa monenlaisia muutoksia eri puolella maailmaa. Sateet lisääntyvät, mutta lämpenemiseen liittyvät sääilmiöt vaikuttavat moniin maihin siten, että välillä on kuivia kausia, jolloin sateet jäävät tulematta. Tämän vuoksi mm. Afrikassa on koettu pahoja nälänhätiiä, joiden vuoksi mm. Somaliassa vuonna 2011 noin 260.000 ihmistä kuoli nälkään.

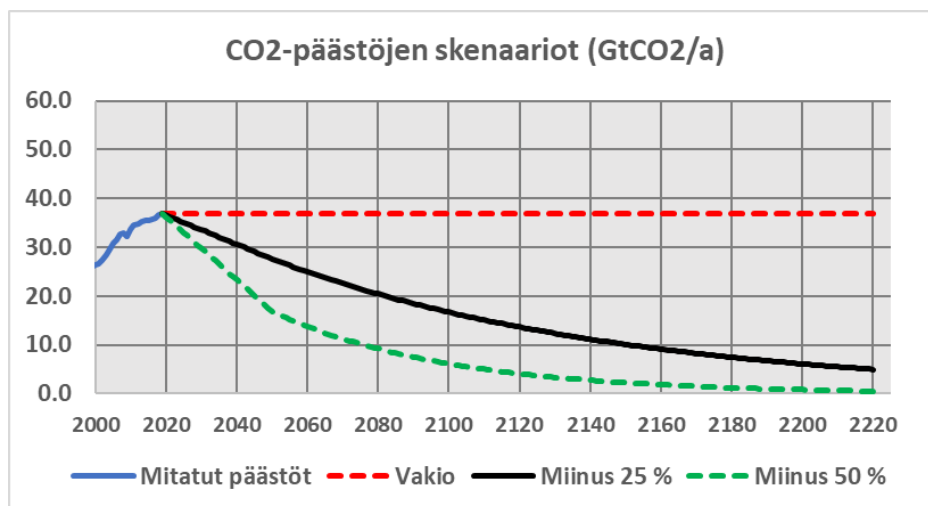
Merien pinta voi nousta seuraavien 200 vuoden aikana 1700 mm, josta maan pinnan nousu kompensoi noin 700 mm Helsingissä ja nettousuksi tulee noin 1000 mm. Helsingissä korkein havaittu meren pinnan nousu on myrskyjen takia 1500 mm. Näin talot tulisi rakentaa vähintään 2500 mmm nykyistä keskivedenpintaan korkeammalla. Sopiva perustuskorkeus taloille olisi +3000 mm, jolloin vedet voitaisiin johtaa pois rakennusten ympäriltä. Päästöjen perusteella voidaan tehdä tarkempi ennuste merenpinnan nousulle (luku 13.1).

13 PITKÄN AJAN LÄMPENEMINEN

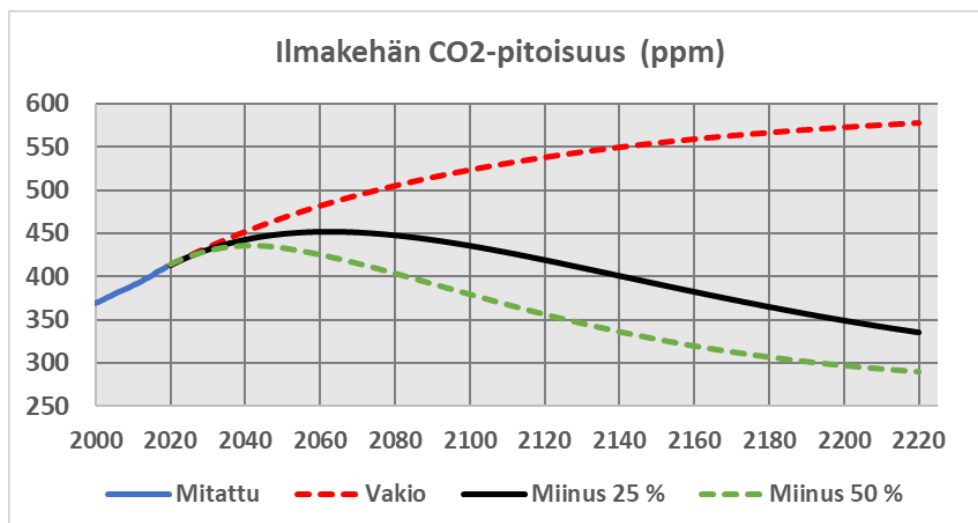
13.1 Seuraavat 200 vuotta

Luvussa 5.4 päädyttiin siihen, että Miinus 50 %- skenaarion avulla voidaan estää ilmaston lämpeneminen yli kahden asteen. Jos Vakio-, Miinus 25 %- ja Miinus 50 %- skenaariota jatketaan aina vuoteen 2220 asti, CO₂-päästöt laskevat alle 10 Gt/a Miinus 25 %-skenaariossa vuonna 2080 tai Miinus 25 %- skenaariossa vuonna 2150 (Kuva 13.1.1).

Ilmakehän CO₂-pitoisuus laskee alle 400 ppm Miinus 25 %- skenaariossa vuonna 2080 ja Miinus 25 %- skenaariossa vuonna 2140 (Kuva 13.1.2). Jos päästöt jatkuvat vakioina, CO₂-pitoisuus nousee arvoon 580 ppm.

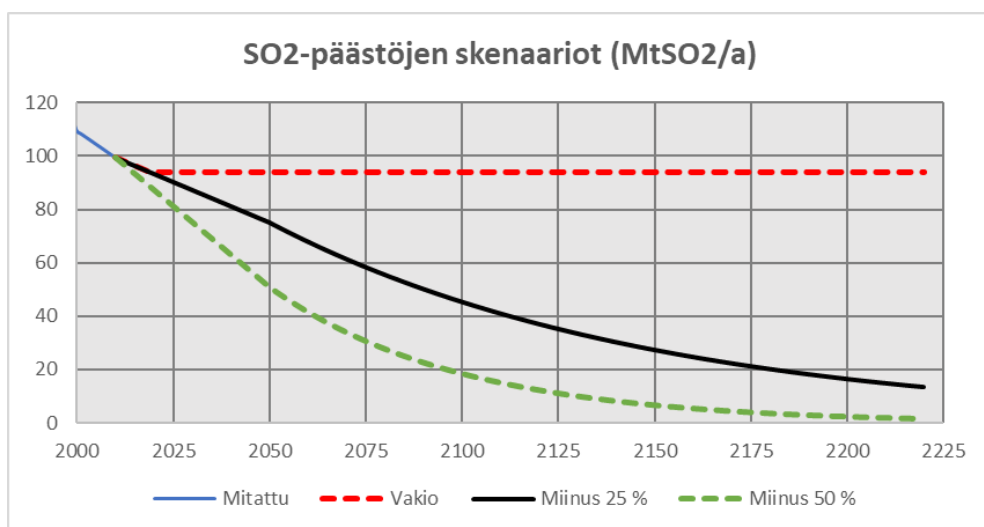


Kuva 13.1.1 CO₂-päästöjen kehitys (GtCO₂/a).



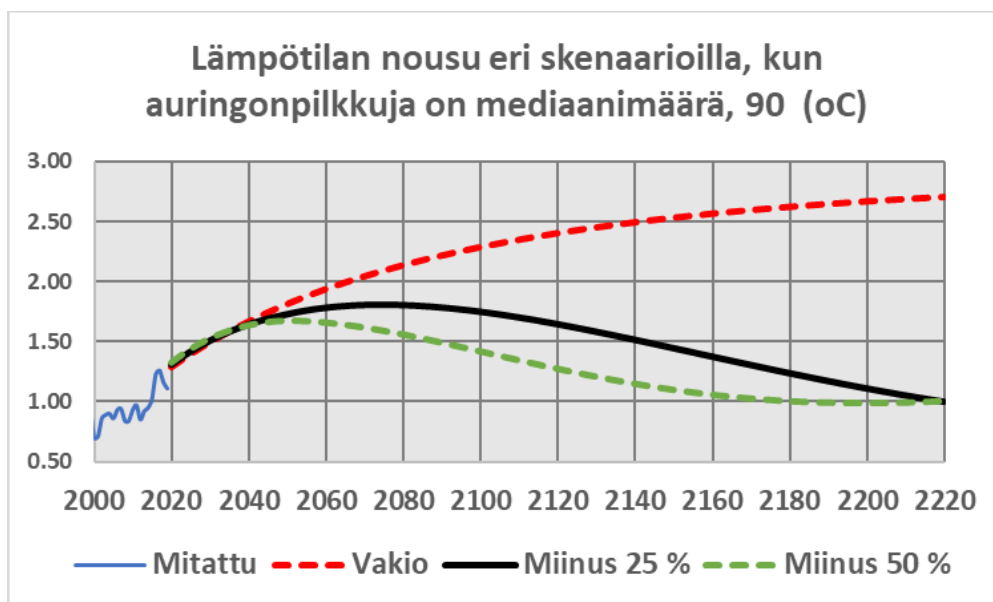
Kuva 13.1.2 Ilmakehän CO₂-pitoisuuden kehitys (ppm).

Rikkipäästöjen skenaariot vuoteen 2220 asti tarkoittavat, että päästöt vähenevät alle 20 miljoonan tonnin Miinus 50 %- skenaariossa vuonna 2100 ja Miinus 25 %- skenaariossa vuonna 2160 (Kuva 13.1.3).



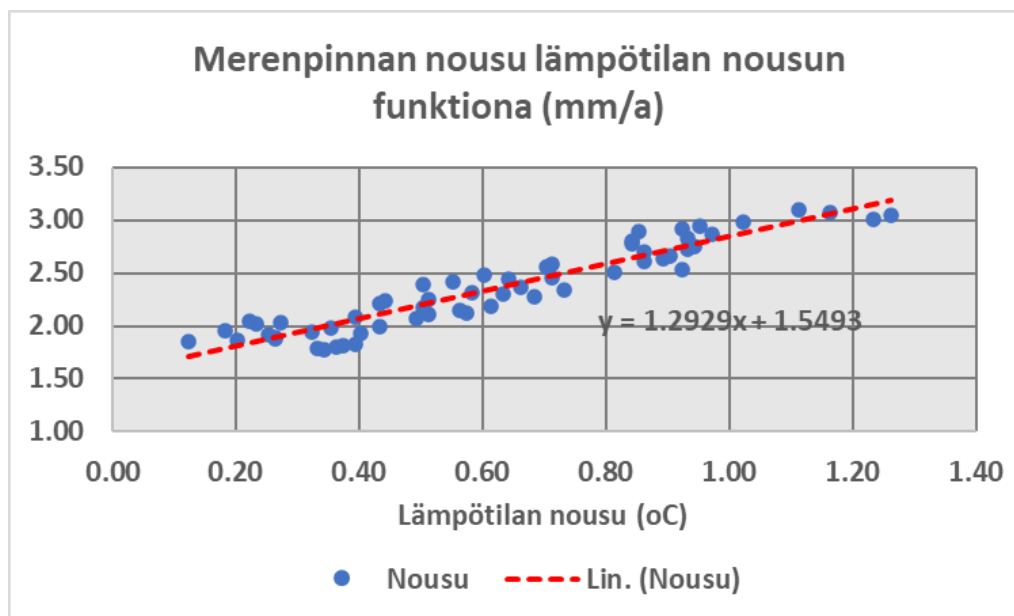
Kuva 13.1.3 Rikkipäästöjen skenaariot (MtSO₂/a).

Näillä oletuksilla voidaan SCA2-mallin (kaava 5.2.3) mukaan ennustaa, että lämpötila palaa nykytasolle Miinus 50 %- skenaariossa vuonna 2140 ja Miinus 25 %- skenaariossa vuonna 2190, kun auringonpilkkua on mediaanimäärä (87) (Kuva 13.1.4).

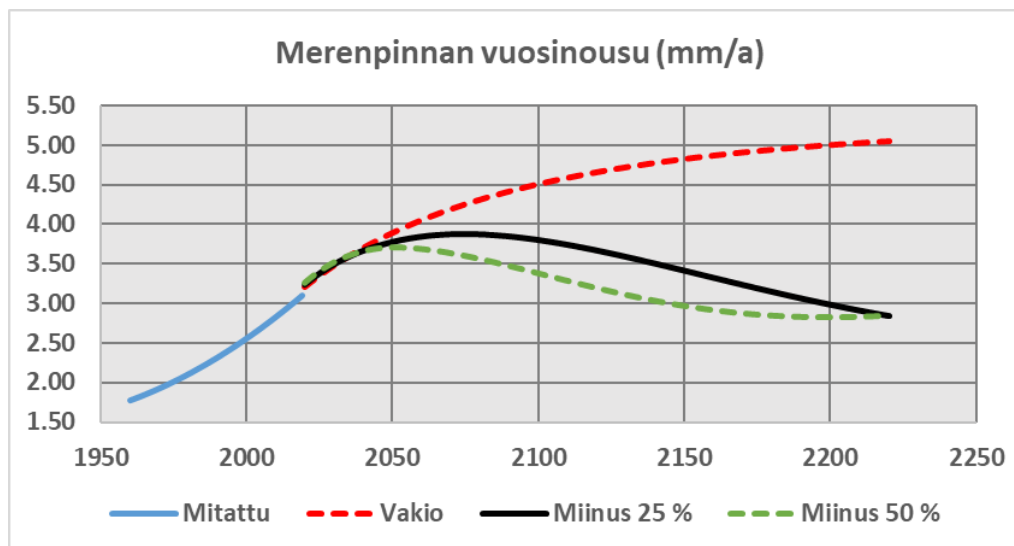


Kuva 13.1.4 Lämpötilan nousu, kun auringonpilkkujen määrä on mediaaniarvossa (87).

Merenpinnan nousu (mm/a) esitetään lämpötilan nousun funktiona, havaitaan niiden välillä oleva lineaarinen riippuvuussuhde (Kuva 13.1.5). Yhden asteen lämpötilan nousu lisää merenpinnan nousua 1,3 mm. Nyt meren pinta nousee 3,3 mm vuodessa, Miinus 50 %-skenaariossa se kohoaisi arvoon 3,7 mm vuodessa vuonna 2050 ja Miinus 25 %-skenaariossa arvoon 3,9 mm vuodessa 2075. Vakiopäästöillä meren pinta voisi nousta noin 5 mm vuodessa vuonna 2200 (Kuva 13.1.6).

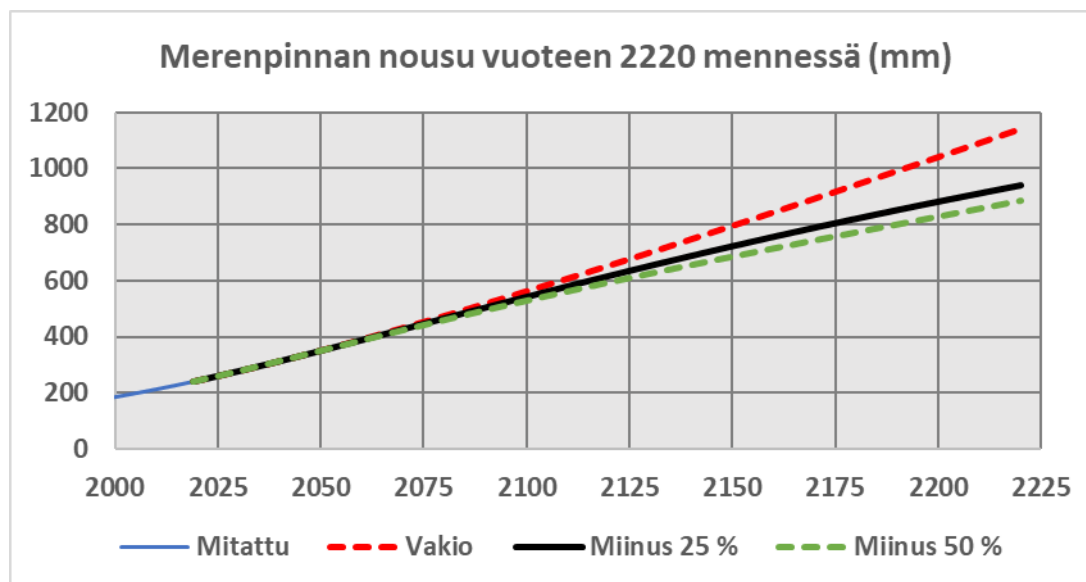


Kuva 13.1.5 Merenpinnan vuosittainen nousu lämpötilan nousun funktiona (mm/a).



Kuva 13.1.6 Merenpinnan vuosittainen nousu erilaisissa skenaarioissa (mm).

Jos päästöt jatkuvat vakiotasolla, niin merenpinta nousee noin 1100 mm verran vuoteen 2220 mennessä vuoteen 1900 verrattuna (Kuva 13.1.7). Miinus 50 %- skenaario johtaa noin 900 mm merenpinnan nousuun. Molemmat arviot sopivat kuvassa 15.7.6 esitetyn haarukan 900–1900 mm alalaitaan. Tähän mennessä nousua on ollut jo 200 mm, joten lisänousu vuoteen 2220 mennessä on 700–900 mm. Helsingissä maa kohoaa seuraavien 200 vuoden aikana noin 700 mm, joten nettonousu on noin 0–200 mm.



Kuva 13.1.7 Merenpinnan kumulatiivinen nousu vuoteen 2220 mennessä (mm).

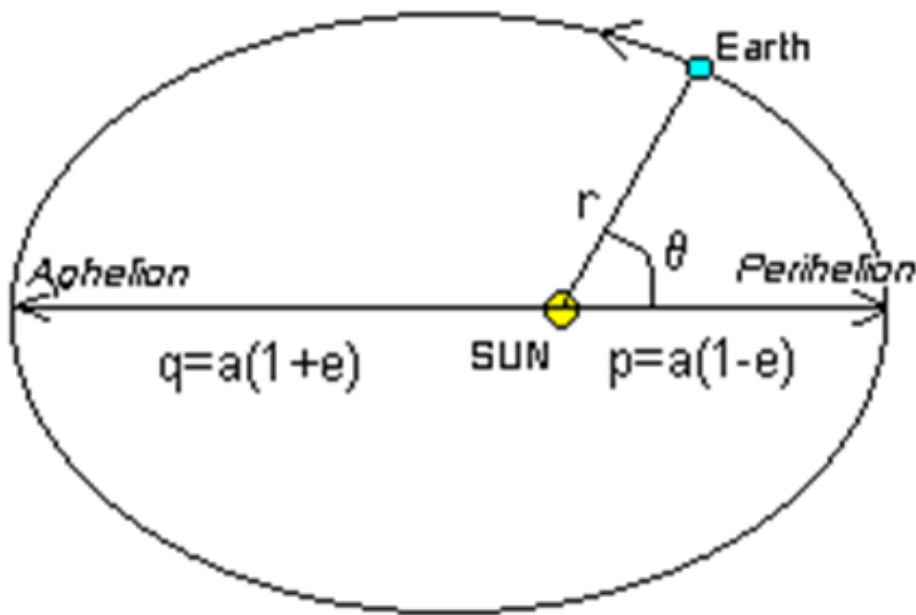
Kun nyt maksimi merenkorkeus on Helsingissä noin 1500 mm, pitää varautua ainakin siihen, että merenpinta voisi olla myrskypäivinä noin 1700 mm nykyistä korkeammalla. Jos päästöjä onnistutaan vähentämään Miinus 50 %- skenaarion mukaisesti, talojen perustamiskorkeudeksi riittää Helsingin seudulla 2100 mm meren pinnasta laskettuna. Jos päästöjen kehitys jatkuu vakiona, talot pitää perustaa vähintään 2300 mm korkeudelle nykyisen keskimeren pinnasta laskettuna.

Vuoteen 2220 mennessä maailma käyttää Miinus 50 %- skenaarion mukaan öljyä noin 10.000 eksajoulea. Öljyreservit olivat vuoden 2019 lopussa BP:n mukaan noin 245 miljardia tonnia. Kun yhden öljytonnin energiamäärä on noin 43 gigajoulea, se vastaa noin 10.000 eksajoulea. Näin tunnetut öljyreservit tulisi käytettyä kokonaan vuoteen 2220 mennessä.

Hiiltä ja maakaasua on reserveissa enemmän kuin Miinus 50 %- skenaariossa tarvitaan. Kuitenkin ilmastomuutoksen takia niiden käyttöä joudutaan rajoittamaan. Jos maailma saa lämpötilan nousun laskusuuntaan, niiden käyttöä ei sen takia tarvitse rajoittaa. Voi olla, että tulevaisuudessa tulee Mauderin minimin tapainen kylmä kausi, jonka aikana fossiilisten energialähteiden käyttö voisi olla jopa suotavaa.

13.2 Edelliset 450.000 vuotta

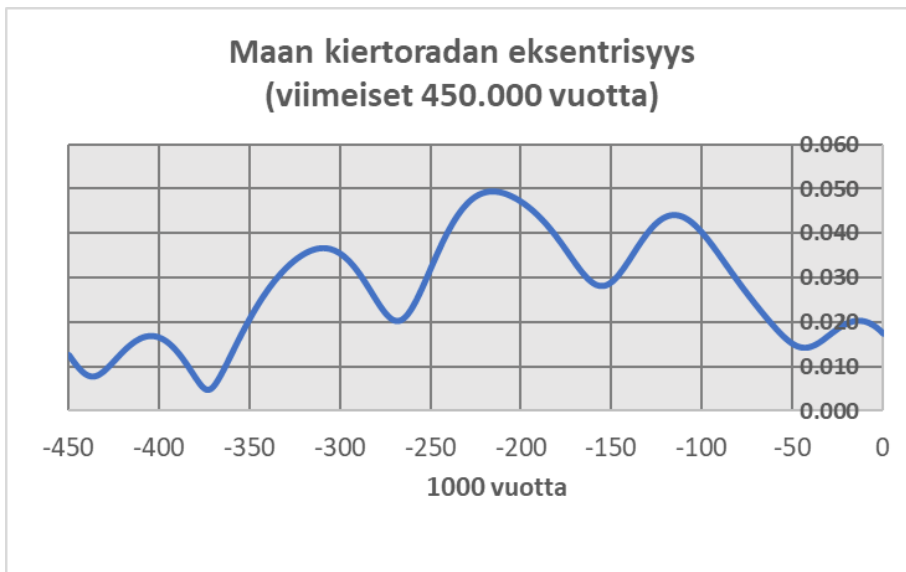
Maan lämpötilan vaihtelu pitkällä aikavälillä määräytyy pääasiassa maan kiertoradan eksentrisyyden perusteella. Eksentrisyys (**e**) kertoo, kuinka paljon maan kiertorata poikkeaa pallon muodosta. Kun eksentrisyys on nolla, maan etäisyys auringosta on koko ajan vakio, jolloin $q = a$ (Kuva 13.2.1).



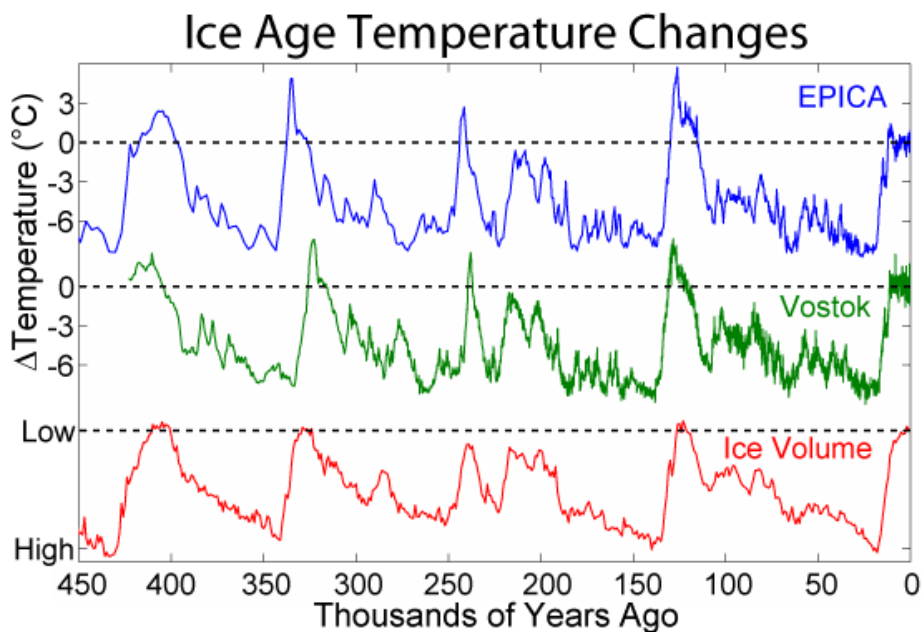
Kuva 13.2.1 Maan kiertorata auringon ympäri.

Eksentrisyys on vaihdellut viimeisen 450.000 vuoden aikana siten, että se on ollut maksimissaan 5 kertaa eli noin 100.000 vuoden välein (Kuva 13.2.2). Eksentrisyyden ollessa suuremmillaan maapallo on kohdannut jääkausia, koska samaan aikaan auringon säteilyteho on pienemmillään (Kuva 13.2.3).

Parhaillaan eletään vaihetta, jolloin kiertoradan eksentrisyys lähenee nollaa, jolloin maa saa enemmän auringon säteilyä ja ilmakehä lämpenee. Noin 120.000 vuotta sitten eksentrisyys oli viimeksi maksimissaan ja samalla jään määrä oli huipussaan. Sen jälkeen alkoi eksentrisyyden pieneminen ja samalla lämpeneminen, joka johti jääkauden päättymiseen noin 10.000 vuotta sitten.



Kuva 13.2.2 Maan kiertoradan eksentrisyys viimeisen 450.000 vuoden aikana.



Kuva 13.2.3 Jääkausien lämpötila ja jään määrä viimeisten 450.000 vuoden aikana.

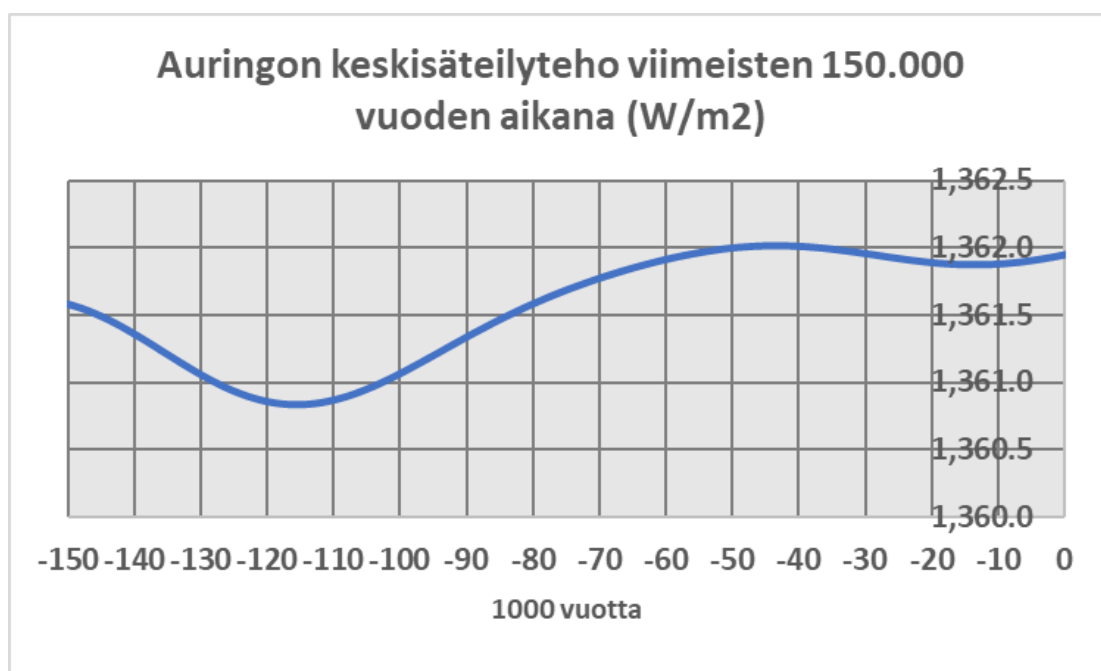
Laskar et. Al. julkaisivat 1970-luvulla matemaattisen mallin, miten eksentrisyydestä voidaan laskea yksinkertaisesti auringon keskimääräinen säteilyteho pinta-alaa kohti (W/m^2):

$$(13.2.1) \quad S = 1362,15 \times \sqrt{1-e^2}$$

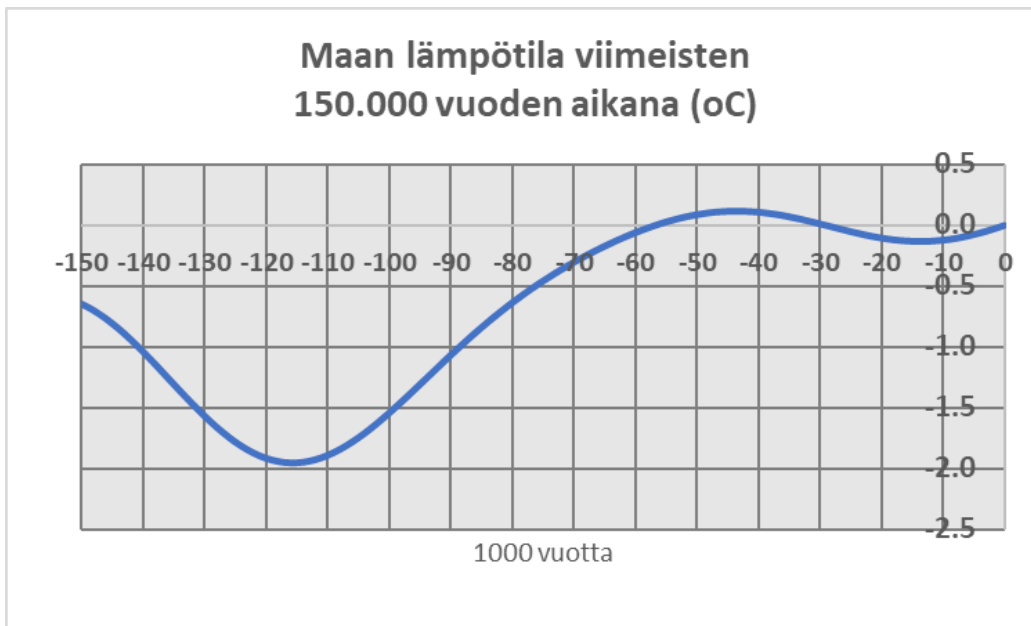
Olen tämän kaavan perusteella laskenut säteilytehon viimeisten 150.000 vuoden aikana (Kuva 13.2.3). Säteilyteho oli pienemmillään noin 110.000–120.000 vuotta sitten, jolloin oltiin viimeisen jääkauden keskivaiheessa. Minimissä teho oli 1360,83 W/m² ja maksimissa 1362,01 W/m². Ero oli 1,18 W/m².

Luvussa 3.3 johdettiin matemaattinen malli lämpötilan ja säteilytehon välille (kaava 3.3.2). Sitä käyttämällä voidaan laskea, mikä oli lämpötila viimeisten 150.000 vuoden aikana (Kuva 13.2.4). Lämpötila oli minimissä vuosina 110.000–120.000 BP, jolloin lämpötila oli kaksi astetta pienempi kuin tänään. Lämpötila oli maksimissaan noin 45.000 BP, jolloin se oli 0,1 astetta korkeampi kuin 1900-luvulla.

Lämpötilan seuraava minimi osui vuosiin 11.000–13.000 BP, jolloin tiedetään jäätiköiden sulamisen pysähtyneen. Silloin muodostui Salpausselkä, koska merenranta oli 2000 vuotta samassa kohdassa (Kuva 13.2.5). Tämän väitetään aiheuneen myös makean veden nopeasti purkauksesta Atlantiin, jonka takia Golf-virta pysähtyi. Tämä selitys tuntuu keksityltä. Kannattaa kysyä: 1) Miksi suuri määrä vettä olisi purkautunut, kun ilma alkoi kylmetä. 2) Miksi Golf-virta olisi pysähtynyt, kun sen kierron päämoottorina toimivat -40 asteen leveyspiirillä vallitsevat tuulet.



Kuva 13.2.3 Auringon keskisäteilyteho viimeisten 150.000 vuoden aikana (W/m²).

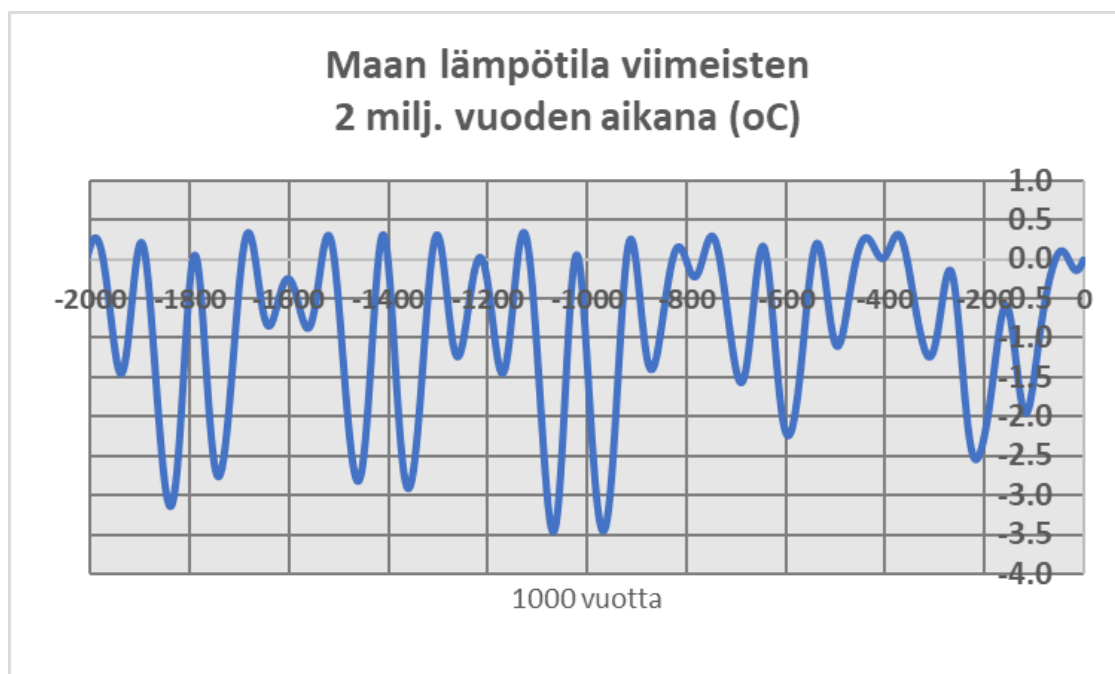


Kuva 13.2.4 Maan lämpötilan vaihtelu eksentrisyyden takia viimeisten 150.000 vuoden aikana (°C).



Kuva 13.2.5 Salpausselkä muodostui noin 11.500 vuotta siten, jolloin jään sulaminen pysähtyi noin 2000 vuodeksi.

Jos tarkastelee aikaa kaksimiljoonaa vuotta sitten, huomataan, että kylmin lämpötila oli $-3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ noin miljoona vuotta sitten (Kuva 13.2.6). Vastaavasti lämpimintä oli 400,000 BP, jolloin oli noin $0,35\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpimämpää kuin 1900-luvulla. Nämä arviot eivät huomio auringonpilkuista aiheutuvaa heilahtelua, joka on lisännyt lämpötilan vaihtelua noin $\pm 0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ vuosina 1700–2000.



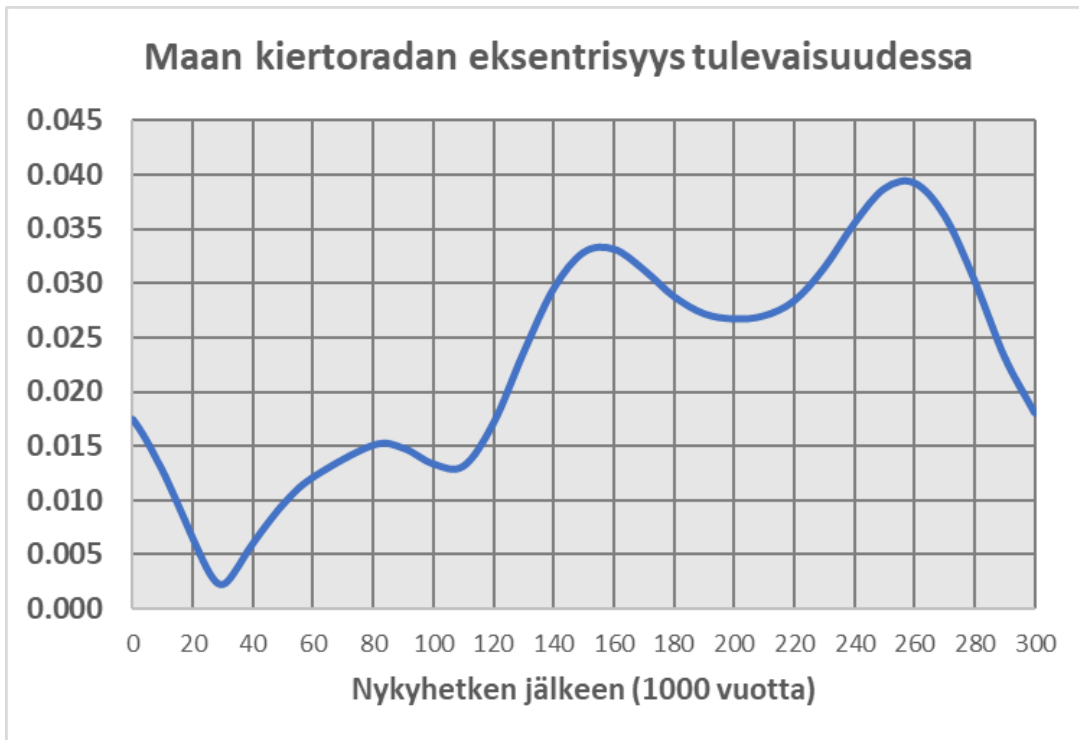
Kuva 13.2.6 Maan lämpötilan vaihtelu eksentrisyyden takia viimeisten kahden miljoonan vuoden aikana ($^{\circ}\text{C}$).

16.3 Seuraavat 300.000 vuotta

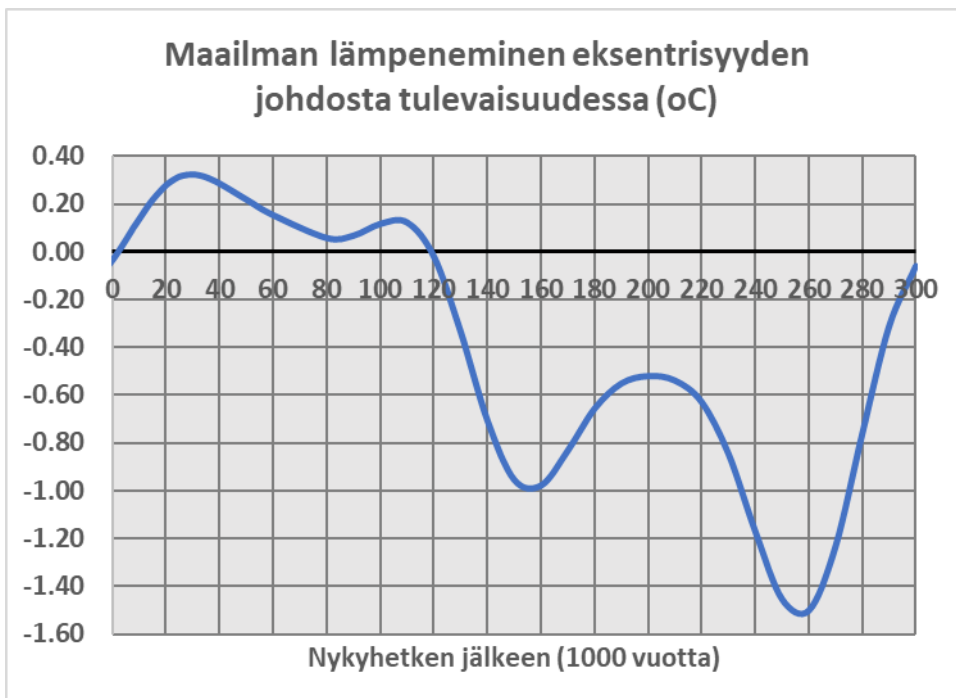
Eksentrisyyden kehitys on pystytty laskemaan myös hyvin tarkasti. Tiedetään, että eksentrisyys pienenee tällä hetkellä ja saavuttaa minimiarvonsa 0.0023 vuoden 30.000 paikkeilla nykyhetkestä laskettuna (Kuva 13.3.1). Sen jälkeen seuraavat kolme huippua vuosien 80.000, 150.000 ja 260.000 paikkeilla.

Eksentrisyyden pieneneminen tarkoittaa, että maan lämpötila nousee seuraavat 30.000 vuotta ja nousee $+0,30$ astetta nykyiseen verrattuna (Kuva 13.3.2). Tämän jälkeen maan lämpötila palaa takaisin nykyiseksi vuoden 80.000 paikkeilla ja nousee uudestaan $+0,13\text{ }^{\circ}\text{C}$ vuonna 110.000. Sen jälkeen seuraa pienempi jääkausi vuonna 150.000, jolloin lämpötila laskee $-1,0$ astetta nykyisestä. Suurempi jääkausi seuraa sitä vuonna 260.000, jolloin lämpötila laskee $-1,5$ astetta nykyisestä.

Uskon kuitenkin, että ihmiskunta osaa jo silloin hallita ilmaston lämpenemistä niin hyvin, että jääkaudet jäävät tulematta. Juuri silloin olisi järkevintä käyttää fossiilisia polttoaineita, joiden avulla jääkahden tulo voitaisiin estää.



Kuva 13.3.1 Maan kiertoradan eksentrisyys seuraavan 300.000 vuoden aikana.



Kuva 13.3.2 Maailman lämpeneminen eksentrisyyden vuoksi tulevaisuudessa (°C).

Yhteenveto

Seuraavien 200 vuoden päästä on odotettavissa, että fossiilisten polttoaineiden käyttö loppuu ja ilmasto alkaa viiletä. Lämpötilan nousu pysähtyy alle kahden asteen vuonna 2060. Vuosien 2170–2250 välillä ilmakehän CO₂-pitoisuus palaa samalle tasolle kuin vuonna 1959, jolloin ensimmäisen täyden vuoden keskiarvoksi saatiin 316 ppm. Samalla ilmakehän lämpeneminen palaa vuoden 2010 tasolle +0.9 °C.

Meren pinta nousee noin 900 mm (4,5 mm vuodessa) nykyisestä seuraavan 200 vuoden aikana, jos päätöt säilyvät nykyisenä. Koska päästöjä onnistutaan rajoittamaan ainakin Miinus 25 %- skenaarion mukaisesti nousu jää noin 700 mm (3,5 mm vuodessa). Se vastaa aika hyvin ennustettua maan pinnan kohoamista (3,3 mm vuodessa) Helsingin kohdalla, joten meren pinnan nousu ei Suomessa muodosta merkittävä uhkaa. Sen sijaan monissa eteläisissä maissa tämä ennustettu 700–900 mm nousu voi muodostua ongelmaksi, johon on syytä varautua.

Seuraavien 100.000 vuoden aikana ilma on nykyistä lämpimämpää, mutta laskee sen jälkeen -1,0 astetta nykyisestä vuoden 150.000 paikkeilla ja -1,5 astetta vuoden 250.000 paikkeilla vuosien 1901–1930 keskilämpötilaan verrattuna. Silloin olisi odotettavissa uusi jääkausi, mutta ihmiskunta hallitsee maan lämpötilan säätelyn siihen mennessä ja jääkausi voidaan välttää.

14 PÄÄSTÖJEN PIENENTÄMISEN KEINOJA

14.1 Rakennusten aiheuttamat päästöt

Puusta tai betonista tehty kerrostalo

Yleensä arvioidaan, että noin 30–40 % osuus maailman CO₂-päästöistä aiheutuu rakennuksissa niiden rakentamisen ja käytön vaiheissa. Viimevuosina kerrostaloja on alettu rakentaa myös puusta perinteisen betonin sijasta.

Puutalon kerrostalon rakentaminen poikkeaa betonitalosta siten, että valmiit huoneistomoduulit tuodaan rakennuspaikalle kuivina muoviin pakattuina. Rakentaminen tapahtuu siis pääasiassa tehtaalla kuivissa olosuhteissa. Tämä nopeuttaa rakentamista ja esimerkiksi Espoon Tapiolassa oleva 12-kerroksinen kerrostalo tehtiin harjakorkeuteen alle vuodessa (Kuva 14.1.1).



Kuva 14.1.1 Puusta tekeillä oleva 12-kerroksinen HOASin kerrostalo marraskuussa 2020.

Helsingissä rakennettiin kaksi samanlaista kerrostaloa, joista toinen tehtiin betoni- ja toinen puurunkoisena. Rakennusten aiheuttamat CO₂-päästöt laskettiin ja päädyttiin siihen, että puusta tehty rakennus aiheuttaa rakennusvaiheessa noin 20 % pienemmät päästöt kuin betonista tehty kerrostalo (Taulu 14.1.1).

Taulu 14.1.1 Puusta ja betonista rakennettujen kerrostalojen rakennusvaiheen CO₂-päästöt.

Talon nimi		Helene	A-kruunu	Erotus	Erotus
Materiaali		Betoni	Puu		%
Pinta-ala	m ²	4440	4451	11	0%
Päästöt	tCO ₂	2664	2136	-528	-20%
Ominaispäästöt	kg/m ²	600	480	-120	-20%
Perheasunto 80 m ²					
- Pinta-ala	m ²	100	100		
- Päästöt	tCO ₂	60	48	-12	-20%
Hiilivarasto	kg/m ²	20	50		
- Perheasunto	tCO ₂	2	5		
- Nettopäästöt	tCO₂	58	43	-15	-26%

Toisessa selvityksessä tutkittiin, että puukerrostalo varastoi CO₂:ta noin 50 kgCO₂/m². Jos puuhun varastoitu CO₂-määrä huomioidaan, puukerrostalon rakentaminen voi vähentää rakennusvaiheen nettopäästöjä noin 26 %. Yhtä huoneistoa kohti (huoneistoala 80 m², bruttoala 100 m²), rakentamisvaiheen päästöt ovat puukerrostalossa noin 15 tCO₂ pienemmät kuin betonista tehdyssä talossa.

Kivestä, hirrestä tai puusta tehty pientalo

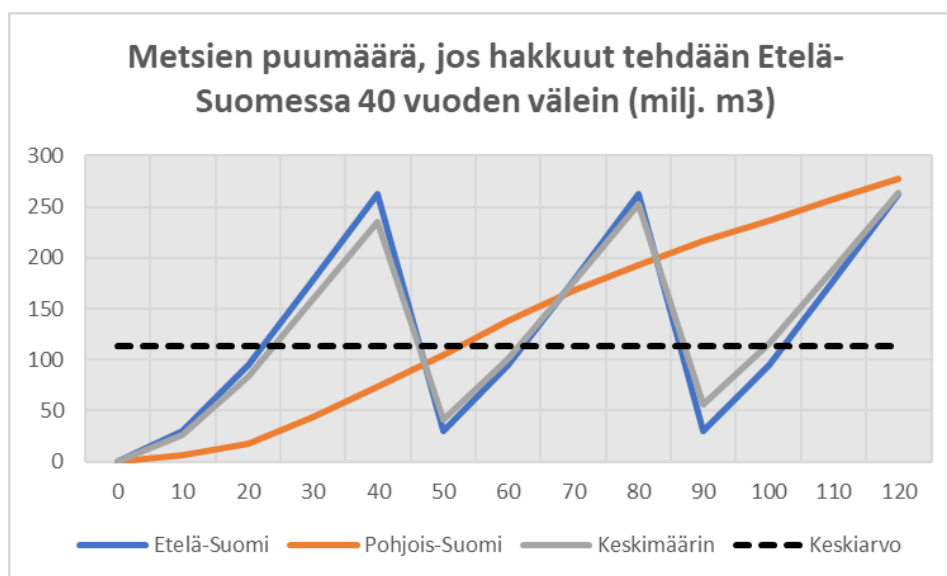
Hirrestä tehdyssä pientalossa ero kivitaloon on vieläkin suurempi, koska 280 mm hirrestä tehty talo varastoi hiilidioksidia noin 250 kg/m². Hirsitalon nettopäästö on pientalossa hyvin lähellä nollaa. Kivitalon rakentamisen nettopäästöt ovat noin 72 tCO₂ 110 neliön huoneistoalaa kohti (Taulu 14.1.2).

Taulu 14.1.2 Pientalojen nettopäästöt (LUT, Kadityö Anna Claudelin, 2015).

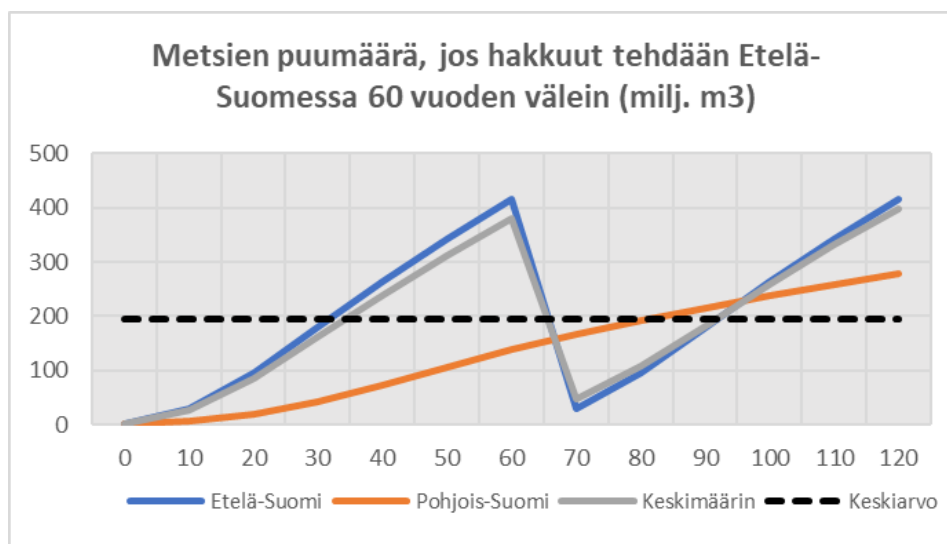
Talon nimi		Pientalo	Pientalo	Pientalo	Vertailu kivitaloon		Vertailu kivitaloon	
Materiaali		Kivi	Hirsi	Puu	Hirsi	Puu	Hirsi	Puu
Hirren paksuus	mm		280				%	%
Pinta-ala	m ²	130	130	130				
Päästöt	tCO ₂	74.6	34.9	38.8	-39.7	-35.8	-53%	-48%
Ominaispäästöt	kg/m ²	574	268	298				
Perheasunto 110 m ²								
- Pinta-ala	m ²	130	130	130				
- Päästöt	tCO ₂	74.6	34.9	38.8	-39.7	-35.8	-53%	-48%
Hiilivarasto	kg/m ²	20	252	45				
- Perheasunto	tCO ₂	2.6	32.8	5.9				
- Nettopäästöt	tCO₂	72	2.1	33.0	-69.9	-39.1	-97%	-54%

Puusta tehdyn pientalon nettopäästöt ovat kivitalon (72 tCO₂/asunto) ja hirsitalon (2 tCO₂/asunto) puolella välissä eli noin 33 tonnia per 110 m² asunto. Puusta rakennettu pientalo säästää CO₂-päästöjä noin 54 % kivitaloon verrattuna.

Puusta ja hirrestä rakennettu talo vaikuttaa myös metsien hiilivarastoon. Suomen metsien puumäärä on tänään noin 114 m³/ha. Se vastaa puumäärää mäntymetsässä, jossa hakkuut tehdään Etelä-Suomessa 40 vuoden välein (Kuva 14.1.2) (Lähde: *Metsien ja sahateollisuuden hiilinielu 2019, Ekoenergo Oy*). Jos hakkuut tehtäisiin keskimäärin 60 vuoden välein puumäärä kasvaisi noin arvoon 200 m³/ha (Kuva 14.1.3). Metsien hiilimäärä kasvaisi vastaavasti noin 90 tCO₂/ha arvoon 160 tCO₂/ha. Erotus on 70 tCO₂/ha. Se vastaisi kahden hirrestä tehdyn pientalon hiilivarastoa. Yksi hirrestä tehty pientalo lisäisi metsien hiilivarastoa 35 tCO₂ ja talojen hiilivarastoa noin 33 tCO₂. Näin hirrestä tehty pientalo olisi jo ennen rakentamisen aloitusta varastoinut hiiltä noin 35 tCO₂.



Kuva 14.1.2 Mäntymetsän puumäärä, jos hakkuuväli on 40 vuotta.



Kuva 14.1.3 Mäntymetsän puumäärä, jos hakkuuväli on 60 vuotta.

Lämmitystapa ja elinkaaripäästöt

Myös lämmitystavan valinnalla on merkitystä. Nykyisin kerrostalo lämmitetään tänään joko kaukolämmöllä tai lämpöpumpuilla. Sähkön ja kaukolämmön päästöt on laskettu kuvan 7.3.4 ominaispäästöarvioilla. Tässä on laskettu päästöt vain vuoteen 2050 asti, joka on ratkaiseva vuosi ilmaston lämpenemisen kannalta.

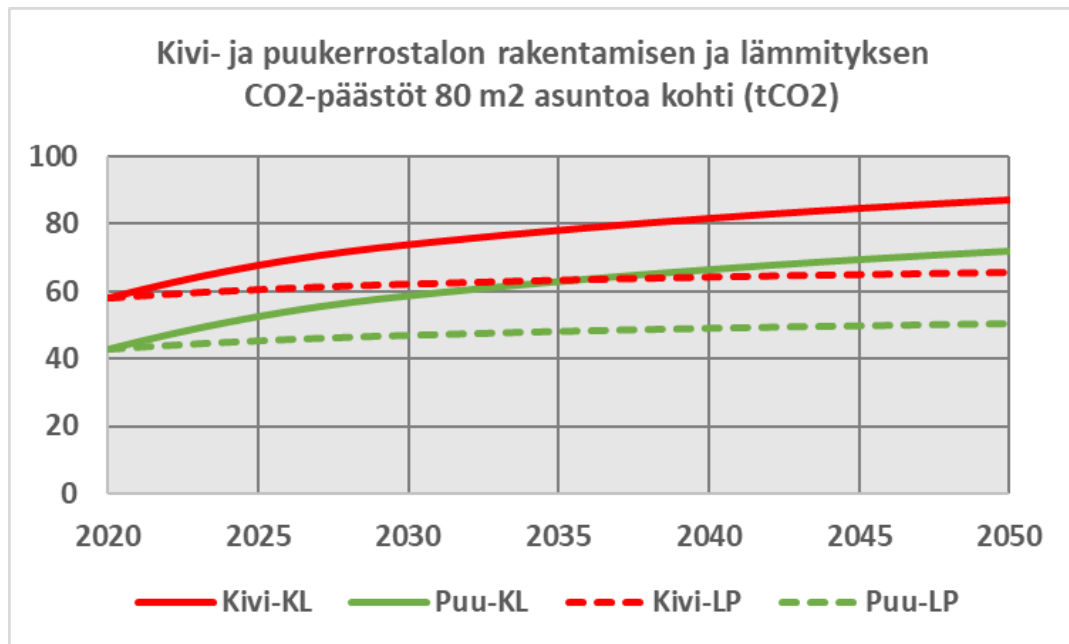
Eniten päästöjä aiheuttaa kivirakenteinen kerrostalo, joka lämmitetään kaukolämmöllä. Sen ensimmäisten 30 vuoden aikana CO₂-päästöjä syntyy yhteensä noin 87 tonnia (Kuva 17.1.4) yhtä 80 neliön asuntoa kohti laskettuna. Vähiten päästöjä aiheuttaa puurakenteinen kerrostalo, joka lämmitetään lämpöpumpulla, jolloin päästöjä syntyy noin 52 tonnia eli 35 tCO₂ (43 %) vähemmän. Lämpöpumpulla varustettu kivitalon päästöt ovat kuitenkin pienemmät kuin kaukolämpöön kytketyllä puukerrostalolla.

Pientalojen kohdalla ero rakennusmateriaalien kohdalla on paljon suurempi. Lämpöpumpulla lämmitetty 110 m² kivitalo aiheuttaa vuoteen 2050 mennessä noin 80 tonnin CO₂-päästön ja hirsirakenteinen puutalon päästöjen ollessa noin 8 tonnia eli 90 % pienemmät (Kuva 14.1.5). Jos mukaan laskettaisiin myös metsien kasvanut hiilinielu hirsitalojen rakentamisen takia, hirsitalon rakentaminen tosiasiaassa vähentäisi hiilidioksidipäästöjä.

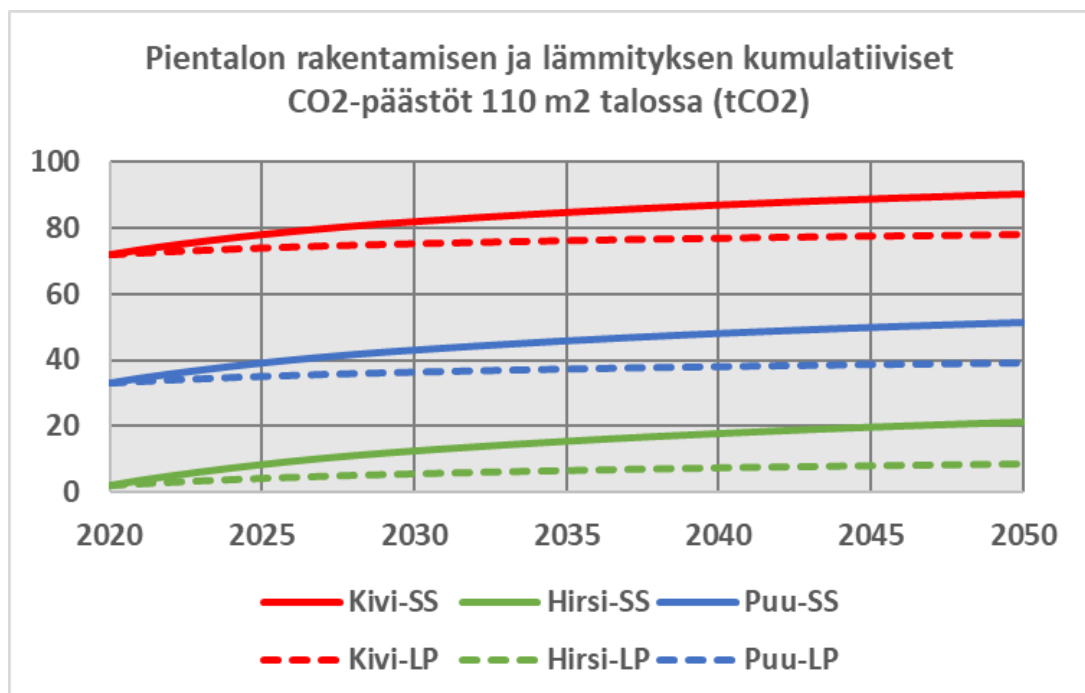
Suomessa rakennetaan vuodessa noin 30–40 miljoonaa kuutiota rakennuksia, joista noin kolmannes on asuintaloa. Asuintaloista (10–13 milj.m³) pientaloja on noin neljännes. Jos kaikki 10.000 uutta pientaloa rakennettaisiin hirrestä ja lämmitettäisiin lämpöpumpuilla, niin päästöt vähenisivät vuoteen 2050 mennessä kumulatiivisesti (80 t/talo) joka vuosi noin 800.000 tonnia. Pelkästään rakentamisesta syntyisi joka vuosi (70 t/asunto) noin 700.000 tonnin vähennys CO₂-päästöihin. Vuoteen 2050 mennessä vähennys olisi noin 21 miljoonaa tonnia hiilidioksidia.

Jos kaikki uudet kerrostaloasunnot (30.000 kpl/a) rakennettaisiin betonin asemasta puusta ja lämmitettäisiin lämpöpumpuilla, niin CO₂-päästöt olisivat vuoteen 2050 mennessä kumulatiivisesti noin (26 t/asunto) 800.000 tonnia pienemmät. Rakentamisen CO₂-päästöt olisivat joka vuosi noin kahdeksan tonnia per asunto eli 240.000 tCO₂ pienemmät kuin kivitaloja rakennettaessa Vuoteen 2050 mennessä pelkästään rakentamisen CO₂-päästöt vähenisivät noin 7,2 miljoonaa tonnia.

Kun kerrostalojen (240.000 tCO₂) ja pientalojen (700.000 tCO₂) rakentamisen päästöjen vähennysarviot yhdistetään, niin vuodessa CO₂-päästöjä voidaan vähentää noin 940.000 tonnia hiilidioksidia vuodessa. Vuoteen 2050 mennessä päästöjen vähennys olisi 28 miljoonaa tonnia hiilidioksidia.



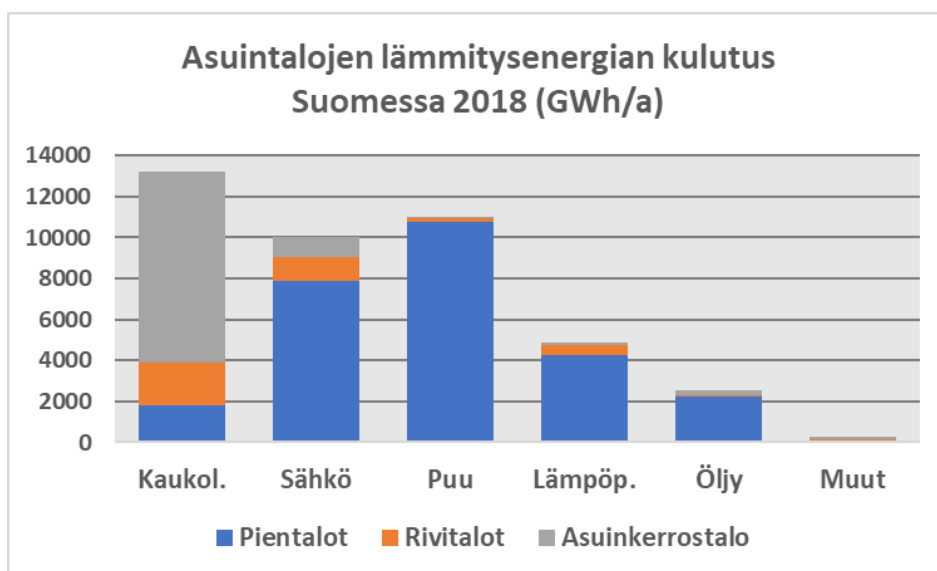
Kuva 14.1.4 Kivi- ja puukerrostalojen rakentamisen ja lämmityksen CO₂-päästöt 80 neliön asuntoa kohti (tCO₂).



Kuva 14.1.5 Pientalojen kumulatiiviset CO₂-päästöt eri lämmitystavoilla (tCO₂).

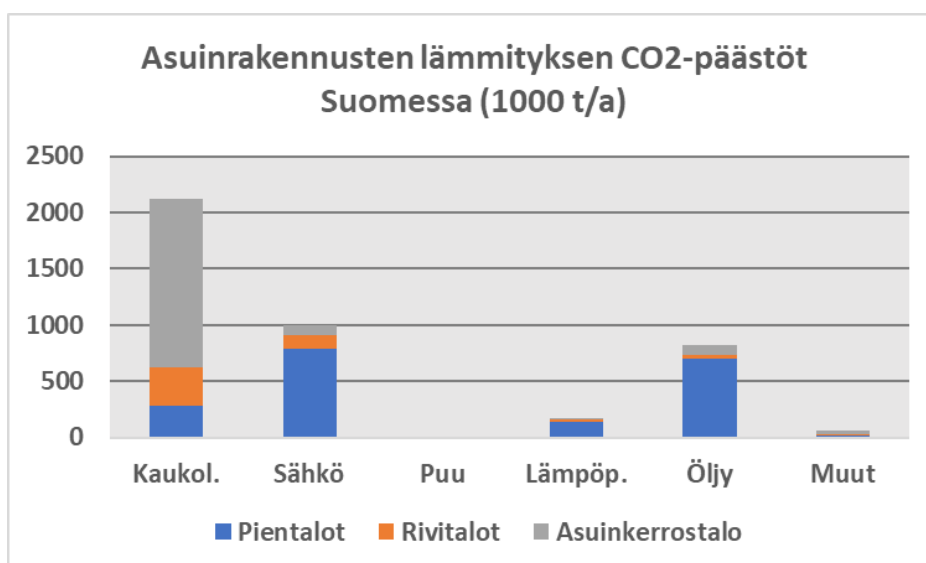
Vanhat asuinrakennukset

Myös vanhojen asuintalojen päästöissä on myös saatavissa nopeasti CO₂-päästöjen väheneminen, jos asuintalojen lämmityksessä siirrytään lämpöpumppuihin. Lämpöpumppujen avulla lämmönkulutus pysyy samana, mutta sen aiheuttamat CO₂-päästöt putoavat merkittävästi. Nyt asuinrakennukset kuluttavat lämpöä yhteensä noin 42 TWh, joista kaukolämmön osuus on noin 13 TWh (32 %) sekä sähkön ja puu osuus yhteensä noin (50 %) (Kuva 14.1.6).



Kuva 14.1.6 Asuinrakennusten lämmönkulutus Suomessa 2018 (GWh/a).

Talojen lämmitys aiheuttaa noin 4,2 miljoonan tonnin CO₂-päästöt (Kuva 14.1.7), joista noin 51 % tulee kaukolämpötaloista ja 20 % öljylämmitystaloista.

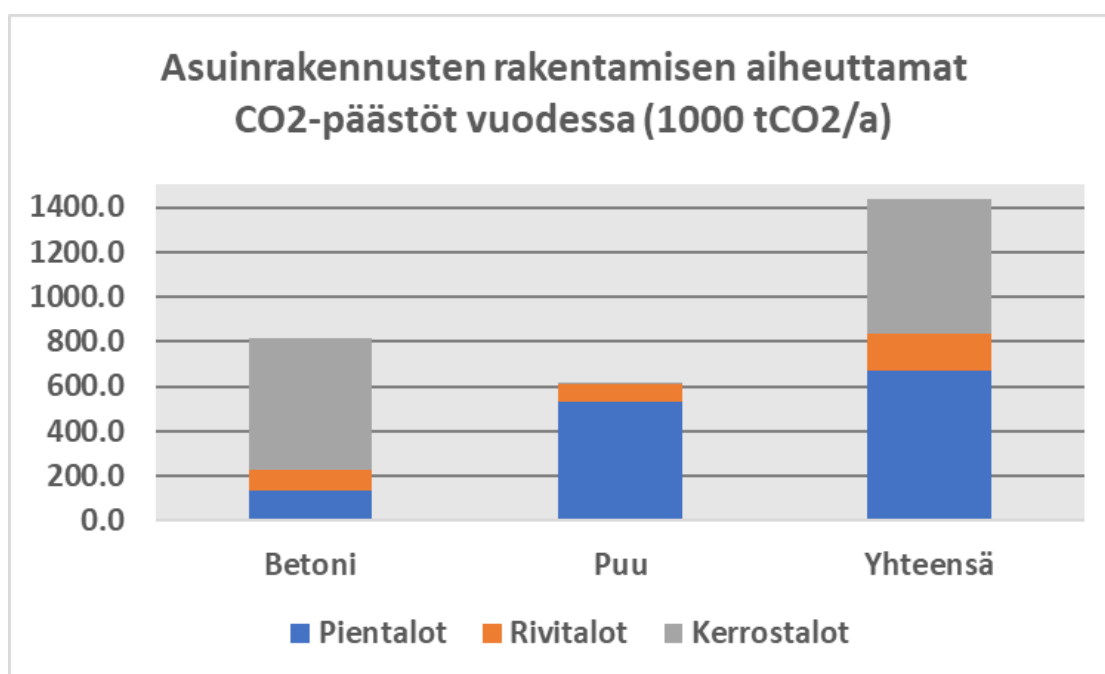


Kuva 17.1.7 Asuinrakennusten lämmityksen CO₂-päästöt Suomessa (1000 tCO₂/a).

Jos kaikki öljylämmitteiset pientalot muutettaisiin lämpöpumpputaloiksi, niiden päästöt pienenisivät nykyisestä noin 816.000 tonnista hiilidioksidia noin 76.000 tonniin, jolloin säästöä syntyisi noin 740.000 tonnia.

Vastaavasti jos kaikki kaukolämmön piirissä olevat pientalot ja rivitalot muutettaisiin lämpöpumpputaloiksi, niiden CO₂-päästöt vähenisivät noin 490.000 tonnia. Lämpöpumppujen asentaminen näihin kohteisiin merkitsisi noin 1,2 miljoonan CO₂-tonnin vähennystä Suomen CO₂-päästöihin.

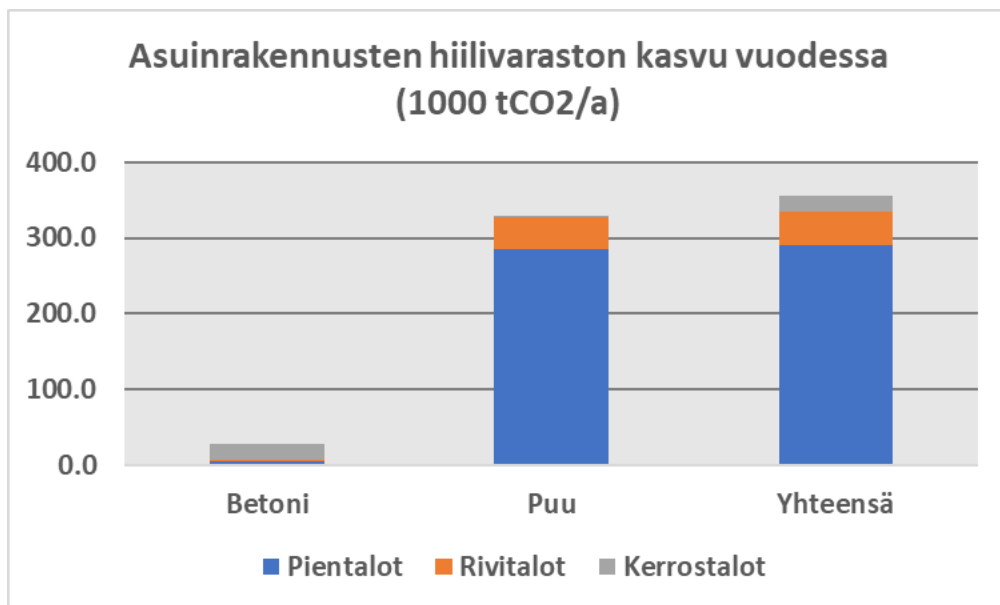
Asuintalojen rakentaminen aiheuttaa vuodessa noin 1,4 miljoonan tonnin CO₂-päästön (Kuva 14.1.8). Tästä päästöstä aiheuttavat betonitalot noin 800.000 tonnia ja puutalot noin 600.000 tonnia.



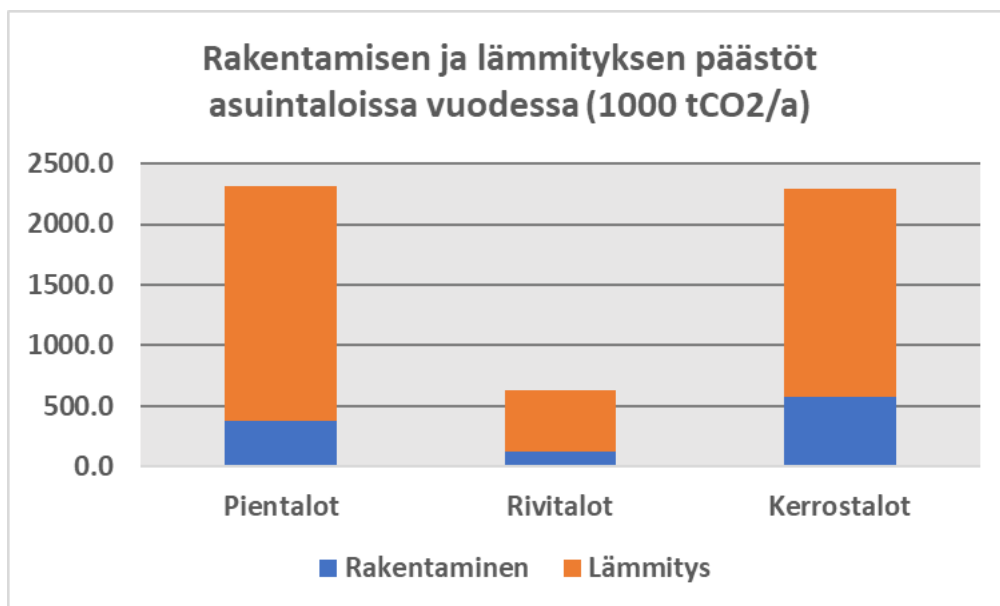
Kuva 14.1.8 Asuintalojen rakentamisen aiheuttamat CO₂-päästöt vuodessa (1000 tCO₂/a).

Rakennukset varastoivat myös pitkäaikaisesti hiiltä ja niistä muodostuu hiilivarasto. Betonitaloissa tämä varasto on pieni, mutta vuosittain rakennetut puutalot varastoivat hiilidioksidia 330.000 tonnia vuodessa (Kuva 14.1.9). Näin puutalojen rakentamisen aikaiset nettopäästöt ovat vain noin 270.000 tonnia vuodessa. Jos pientalot tehtäisiin hirrestä hiilivarasto voisi kumota rakentamisesta aiheutuneet päästöt kokonaan.

Asuintalojen rakentamisesta ja niiden käytöstä aiheutuu vuodessa Suomessa noin 5,2 miljoonan tonnin CO₂-päästöt (Kuva 14.1.10). Niistä 2,3 miljoonaa tonnia aiheutuu pientaloista ja saman verran kerrostaloista sekä 0,6 miljoonaa tonnia rivitaloista.



Kuva 14.1.9 Asuintalojen rakennuksiin vuosittain jäävä CO₂-varasto (1000 tCO₂/a).



Kuva 14.1.10 Asuinrakennusten rakentamisen ja lämmityksen CO₂-päästöt (1000 tCO₂/a).

Aurinkolämmitys

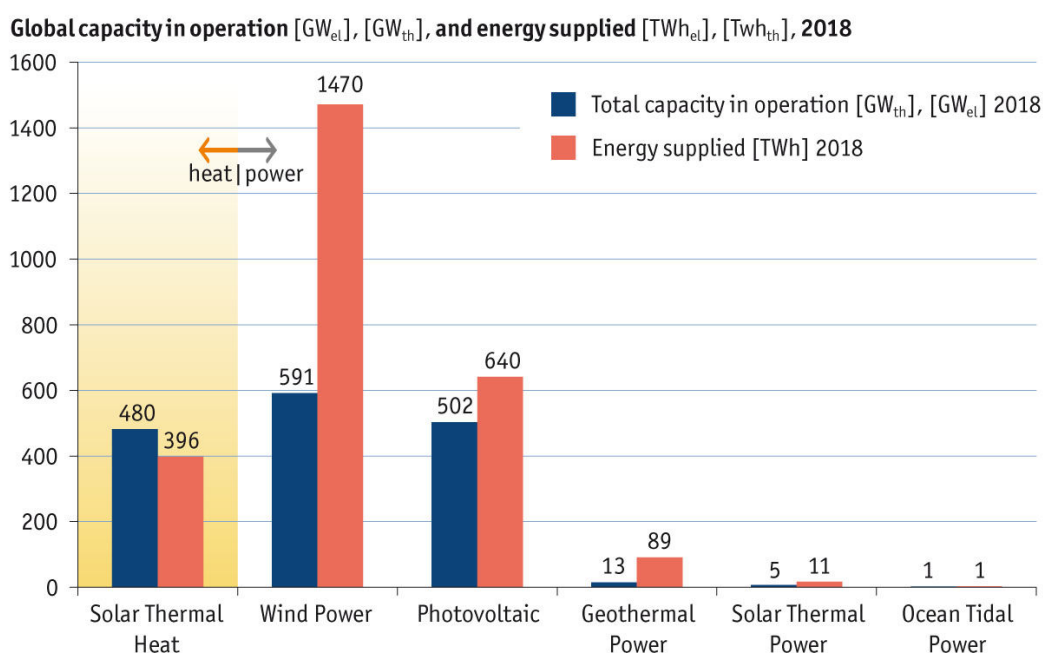
Suomea etelämissä maissa talojen ja lämpimän käyttöveden lämmitys voidaan tehdä edullisesti aurinkolämmittimien avulla. Paineistamaton vedenlämmitin maksaa Alibaban verkkokaupassa noin 50–100 euroa koosta riippuen (Kuva 14.1.11). Tyypillinen lämmitin on kooltaan kaksi neliömetriä ja siinä on 150 litran säiliö.



Kuva 14.1.11 Kiinassa käytettyjä aurinkolämmittimiä Alibaba-verkkokaupan sivuilta.

Vuoteen 2010 mennessä Kiinaan oli asennettu aurinkolämmittimiä yhteensä 168 miljoonaa neliömetriä. Jos niiden keskikoko on kaksi neliömetriä, niitä oli 20 miljoonassa kotitaloudessa.

Maailmassa aurinkolämmityslaitteiden kokonaisteho oli vuoden 2018 lopussa yhteensä 479 GW ja niiden avulla tuotettiin lämpöä yhteensä 387 TWh (Solar heat worldwide 2020).



Kuva 14.1.2 Lämmön ja sähkön tuotanto uusiutuvilla lähteillä 2018 (Solar heat worldwide).

14.2 Liikenne

Sähköautot

Liikenne aiheuttaa noin 10–20 % maailman CO₂-päästöistä. Yhdessä asuminen ja liikenne vastaavat noin puolesta kaikesta päästöistä. Liikenteen päästöihin vaikuttaa eniten millä energialla autot toimivat tulevaisuudessa.

Henkilöautoliikenne on muuttumassa sähköiseksi nopeasti. Suomessa rekisteröidystä uusista autoista ladattavat autot ohittivat jo dieselautot vuoden 2020 lopussa. Myös bensiiniautojen ja bensiinikäyttöisten hybridiautojen myynti on ollut vuonna 2020 laskussa. Muita polttoaineita (kaasu ja etanoli) käyttävien autojen myynti on tuskin noussut vielä nolasta. Eikä niille voi luvata ruusuista tulevaisuutta, koska mm. VW on kertonut, että uusia etanolikäyttöisiä malleja ei enää kehitetä.

Ladattavien autojen markkinaosuus uusista autoista on 15 % syyskuussa 2020. Dieselautojen osuus oli enää vain 12 %. Kuitenkin maahan tuotiin paljon käytettyjä dieselautoja mm. Saksasta.

Tyypillinen sähköauto kuluttaa sähköä noin 0,15 kWh/km. Silloin keskimäärin 15.000 km vuodessa ajava sähköautoilija tarvitse sähköä noin 2250 kWh vuodessa. Jos kaikki Suomen 2,7 miljoonaa henkilöautoa olisivat sähköautoja, sähköä tarvittaisiin noin 6 TWh.

Vetyautot

Öllykauppiaat kertovat meille satutarinaa, että sähköautoilu on vain väliaikainen ratkaisu, koska tulevaisuudessa autot kulkevat vedyllä tai metanolilla. Vety on päästötön polttoaine ja auton pakoputkesta tulee vain vettä. Ihan hyvä asia, mutta sähköautoissa pakoputkia ei tarvita lainkaan. Tarina ei ole uskottava. Sen avulla yritetään jarruttaa sähköautojen myyntiä.

Vetyä voidaan tehdä päästöttömästi elektrolyysillä esimerkiksi tuulisähköllä. Jos elektrolyysin hyötysuhde on 70 % ja polttokennoauton hyötysuhde on 30 %, kokonaishyötysuhde on 21 % ja sähköä tarvitaan 15.000 km kulkemiseen 10.700 kWh (Taulu 14.2.1). Se on 4,8-kertainen määrä sähköautoihin verrattuna.

Jos kaikki Suomen 2,7 miljoonaa henkilöautoa kävisivät tuulivoimalla tuotetulla vedyllä, tuulivoimaa tarvitaan 9600 MW. Vastaavasti kaikki 3,7 miljoonaa tavanomaista sähköautolle riittää nykyinen tuulivoimakapasiteetti, jota on jo yli 2000 MW. Lisäinvestoinnit tuulivoimaan ovat 5600 MW, joka maksaisi noin 11,4 miljardia euroa eli noin 4200 euroa per vetyauto.

Taulu 14.2.1 Sähkön tarve Suomen henkilöautoille eri käyttövoimilla.

Sähkön tarve henkilöautoille		Käyttövoima		
Käyttövoima	yksikkö	Sähkö	Vety	Metanoli
Lukumäärä	milj. kpl	2.7	2.7	2.7
Ajomäärä	km/auto	15000	15000	15000
Sähkön tarve	kWh/auto	2250	2250	2250
Hyötysuhde				
- valmistus	%	-	70%	46%
- sähköntuotanto	%	-	30%	30%
- kokonais	%	-	21.0%	13.8%
Sähkön tarve	kWh/auto	2250	10714	16304
	TWh	6.1	28.9	44.0
Tuulivoiman tarve	MW	2025	9643	14674
Suhde sähköautoihin		1.0	4.8	7.2

Vetyauton päästöt syntyvätkin varsinaisesti vedyn valmistuksessa. Suurin osa, noin 90 %, tällä hetkellä tuotetusta vedystä tehdään öljystä tai maakaasusta. Esimerkiksi Nesteen Porvoon jalostamolla on jo vuodesta 1966 alkaen toiminut vety-yksikkö, joka valmistaa vetyä öljyn vetykrakkaukseen.

Jouduin tutustumaan siihen kesäkuussa 1967, kun olin töissä Porvoon jalostamon instrumenttikorjaamossa ja ensimmäisen työviikon vietin asentamalla vety-yksikköön lämpötilanmittausantureita. Kieltämättä vähän pelotti, koska tiesin, että maailman öljynjalostamoilla oli aiemmin tapahtunut vetyräjähdys. Porvoossa vetyä on valmistettu vuodesta 1966 lähtien öljystä. Öljystä tehty vety ei vähennä CO₂-päästöjä.

Vetyräjähdysmahdollisuus havaittiin myös ensimmäisessä varsinaisessa työpaikassani Imatran Voiman Atomivoimaprojektiryhmässä, jossa toimin suunnitteluinsinöörinä heinäkuusta 1971 alkaen. Loviisan voimalan reaktorirakennukseen asennettiin sytytystulppia korkeimpiin kohtiin, joihin onnettomuustilanteissa syntyvän vedyn pelättiin nousevan. Vetyräjähdys nähtiinkin Fukushima reaktorilaitoksen onnettomuuden yhteydessä. Samasta syystä vetyautoja ei tulla päästämään suljettuihin parkkilooliin.

Jos vety tehdään elektrolyysillä, päästöt ovat vähän pienemmät. Jos sähkön CO₂-sisältö on 100 g/kWh, niin elektrolyysin tuottaman vedyn CO₂-sisältö on 70 % hyötysuhteen mukaan laskettuna 143 g/kWh. Kun vety viedään polttokennoautoon, joka hyötysuhde on 30 %, niin polttokennon tuottaman sähkön päästökseen tulee 408 g/kWh. Kun polttokennoauto kuluttaa sähköä noin 0,15 kWh/km, auton päästöt ovat 61 g/km.

Sähköautolla ajo kuluttaa sähköä noin 0,15 kWh/km, jolloin tavallinen sähköauton CO₂-päästöt ovat 15 g/km. Vedyllä käyvän polttokennoauton päästöt ovat 61 g/km, jolloin sähköauton päästöt ovat nykysähköllä noin 75 % pienemmät kuin vetyautolla.

Metanoliautot

Aalto-yliopistossa tehdyssä ja huhtikuussa 2019 julkaistussa **Aki Lehtosen** tekemässä diplomityössä kerrottiin, että savukaasuista ja vedystä elektrolyysillä tehdyn metanolin hyötysuhde on noin 46 %. Sähköä tarvitaan polttokennon hyötysuhteen ollessa 30 % ja metanolinprosessin hyötysuhteen ollessa 46 % noin 16300 kWh per auto.

Metanoliautojen sähkötarve olisi seitsemän kertaa tavanomaisten sähköautojen tarvitsema sähkömäärä. Metanolin valmistamista varten pitäisi rakentaa 12.600 MW tuulivoimaa. Niiden rakentaminen maksaisi noin 19 miljardia euroa eli 7000 €/auto.

Jos metanoli tehdään savukaasuista nykysähköllä (100 g/kWh) 46 % hyötysuhteella toimivassa prosessissa, metanolin CO₂-sisältö on 217 g/kWh. Kun metanoli viedään 30 % hyötysuhteella toiminaan auton polttokennoon, sen avulla tuotetun sähkön CO₂-sisältö on 720 g/kWh.

Jos metanolinpolttokennolla toimivan auton sähkönkulutus on 0,150 kWh/km, saadaan metanoliauton CO₂-päästöksi 108 gCO₂/km. Metanoliauto ei täyttäisi nykyisiä EU:n henkilöautoille annettua päästörajaa 95 g/km. Metanoliauton päästöt 108 g/km on erittäin paljon verrattuna 100 g/kWh sähköllä toimivaan sähköautoon, jonka päästöt ovat 15 g/kWh. Tavallisen sähköauton CO₂-päästöt ovat 86 % pienemmät.

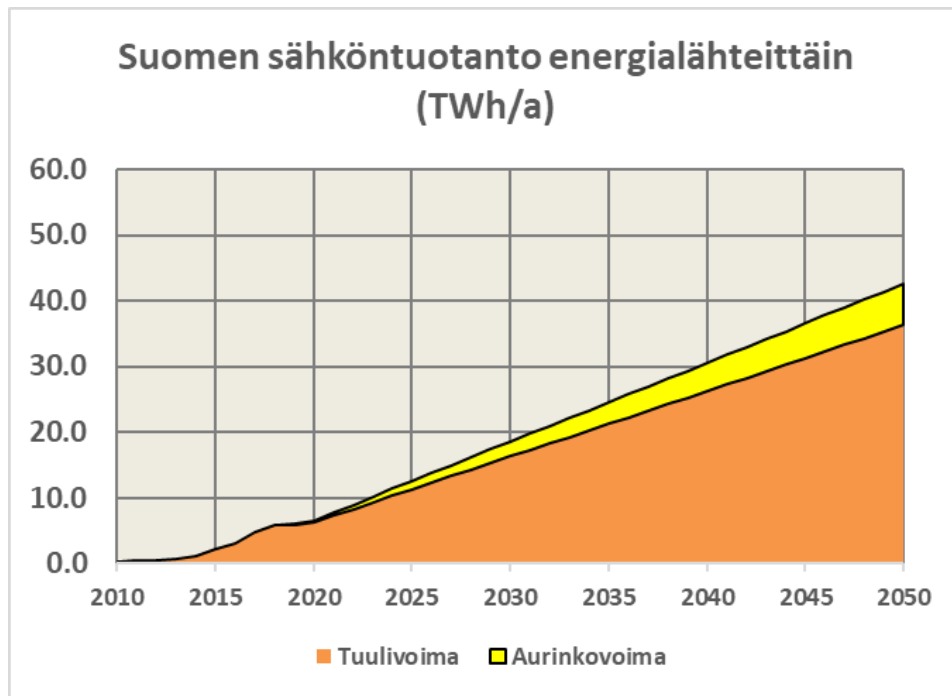
Sähkön riittävyys sähköautoille

On myös väitetty, että sähköautoille ei riitä tarpeeksi sähköä. Suomessa on 2,7 nyt miljoonaa henkilöautoa. Jos autokanta muutetaan vuoteen 2040 mennessä sähköiseksi ja jokainen niistä ajaa 15.000 km vuodessa, sähköä tarvitaan 2250 kWh per auto eli 6 TWh per 2,7 miljoonaa autoa. Tänäpä pelkästään Suomen tuulivoimalat tuottavat jo sen verran sähköä (Kuva 14.2.1). Vuonna 2050 saman verran sähköä tuotetaan myös aurinkovoimalla.

Tuulivoimalaitosten rakentamisvauhti on kuitenkin sen verran kova, että vuoteen 2050 mennessä tuuli- ja aurinkovoimaa tuotetaan jo 43 TWh. Se vastaa kaikkien ydinvoimalaitosten tuotantoa 2022.

On todennäköistä, että vuonna 2050 Olkiluoto 1 ja 2 sekä Loviisa 1 ja 2 otetaan pois käytöstä, jolloin sähköntuotannosta häviää noin 2600 MW, jotka ovat tuottaneet noin 20 TWh vuodessa. Ennustettu 43 TWh määrä tuuli- ja aurinkovoimaa riittää myös niiden korvaamiseen sekä tarvittavan sähköautokannan vaatiman sähkön tuotantoon.

Luultavasti omakotitaloissa sähköautot ladataan tulevaisuudessa yhä useimmin talojen katoille asennettujen aurinkokennojen avulla tuotetulla sähköllä. Yhden talon aurinkokennon teho voi olla 4–10 kW, jolla sähköä voisi saada sähköauton akuston tarvitsema 40–100 kWh vuorokauden aikana kesällä.



Kuva 14.2.1 Suomen ennustettu tuuli- ja aurinkovoiman tuotanto (TWh/a).

Öljy-yhtiöiden lobbarit

Öljy-yhtiöiden lobbarit ovat vuosikausia jarruttaneet sähköautojen markkinoille tuloa. Öljylobbarit toimivat samalla tavalla kuin tupakkateollisuuden lobbarit. Omat ongelmat kielletään ja sähköautojen ongelmia liioitellaan. Niillä pyritään jarruttamaan sähköautojen markkinoille tuloa, koska öljyliiketoiminnan pelätään romahtamassa.

Suomessa sähköautojen mainetta on monin tavoin yrittänyt pilata ST1:n pääomistaja, miljardööri **Mika Anttonen**. Vuonna 2017 Aamulehdessä kerrottiin Anttonen sanoneen: **”Ennustan, että Tesla menee konkurssiin – Sähköautot jäävät marginaaliin”**. Nyt kolme vuotta tuon lausunnon jälkeen joulukuussa 2020 Teslan markkina-arvo oli jo 660 miljardia dollaria ja siitä on tullut maailman 9. arvokkain yhtiö. ST1 Nordicin markkina-arvo oli vastaavasti noin 1,3 miljardia euroa.

Helmikuussa kaksi vuotta myöhemmin Tekniikka ja Talous-lehdessä otsikoitiin Mika Anttonen lausunto **”Maailma ei pelastu sähköautoilla-tarvitaan huomattavasti järeämpiä keinoja”**. Saman lehden syyskuun 2019 numerossa Anttonen ennusti **”Sähköautoilu aiheuttaa akkukatastrofin- myös Afrikan sademetsät ovat vaarassa”**. Artikkelissa yhdistettiin Kongon kobolttikaivokset myös Amazonin sademetsien tulipaloihin. Voisi vaikkapa väittää, että Kongon kaivoksilla ja sademetisen palamisella ei ole mitään tekemistä keskenään.

Anttonen uskoi silloin, että liikkumisen päästöjen ongelman suuren mittaluokan ratkaisu on ehkä metanoli, jota voidaan valmistaa savukaasuista. Kuten tuossa jo aiemmin laskin, metanoliautot tarvitsevat sähköautouhin verrattuna noin seitsemänkertaisen sähkömäärän. Sen sijaan lentokoneiden polttoaineena metanoli voisi olla hyvä vaihtoehto.

Mika Anttosen lobbaus jää kuitenkin varjoon suurten öljy-yhtiöiden miljoonien lobbauskampanjoille. Forbes kertoi maaliskuun 2019 numerossa, että eniten lobbaukseen käyttivät rahaa öljy-yhtiöstä British Petroleum (53), Shell (49) ja Exxon Mobil (41) eli yhteensä 144 miljoonaa dollaria.

Aikaisemmin maailman rikkaimpana yhtiönä tunnetun Exxon Mobilin markkina-arvo on pudonnut vuoden 2017 arvosta 350 miljardia dollaria arvoon 175 miljardia dollaria joulukuussa 2020 ja se on pudonnut sijalle 56. Shellin markkina-arvo on 138 miljardia, Teslan markkina-arvo on suurempi kuin kahden arvokkaimman öljy-yhtiön markkina-arvot yhteensä.

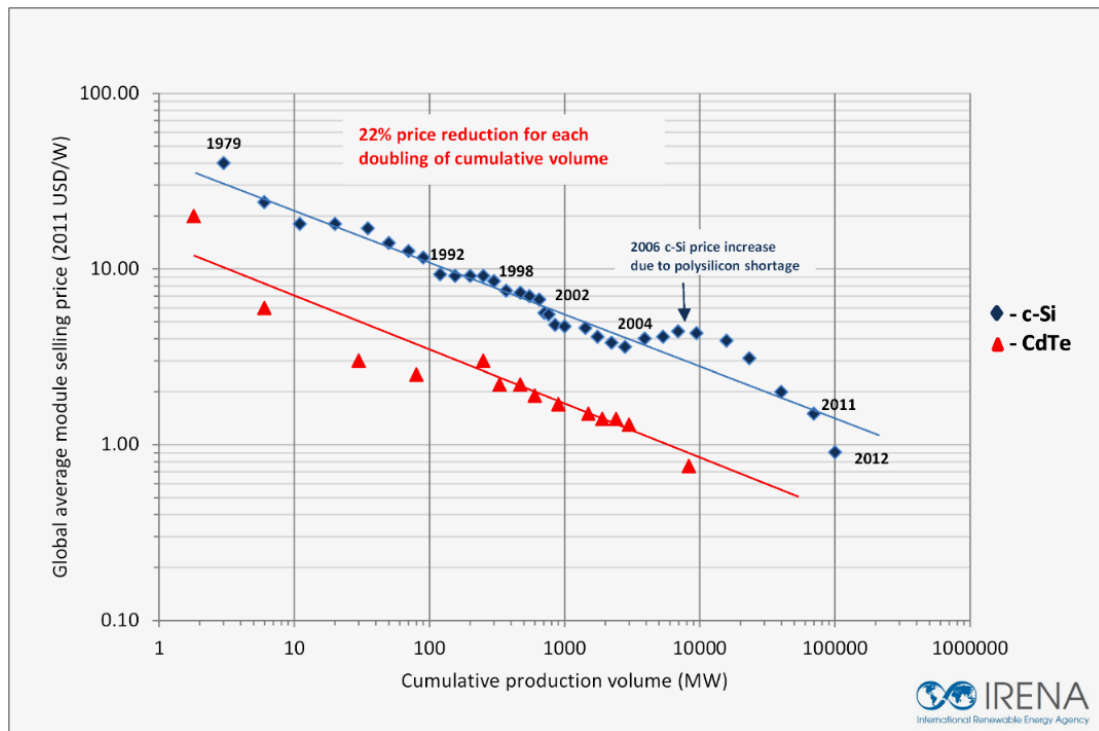
Tosiasia on, että vuonna 2019 öljy aiheutti 36 % maailman CO₂-päästöistä (Taulu 6.5.1). Öljyn aiheuttamat CO₂-päästöt olivat suuremmat kuin sähköntuotannon, jonka päästöt olivat 33 % päästöistä. Vuoteen 2050 mennessä öljyn päästöjen osuus nousee noin 43 %-yksikköön kokonaispäästöistä, kun sähkön osuus laskee noin 21 %-yksikköön.

14.3 Sähköntuotanto

Tuuli- ja aurinkosähkön nopean yleistymisen takana on massavalmistus. Irenan mukaan aurinkopaneelien tuotannon kumulatiivisen määrän kaksinkertaistuessa hinta putoaa 22 % (Kuva 14.3.1). Piikennoihin perustuva tuotanto on kasvanut vuoden 2002 määrästä 1000 MW vuoteen 2012 mennessä 200.000 MW:iin ja hinta on pudonnut samalla arvosta 5 USD/W arvoon 1 USD/W.

Kadmiun telluuriin perustuvat ohutkalvokennot ovat halventuneet samansuuntaisesti. Niiden hinta on vain neljäsosa piikennojen hinnasta. On odotettavissa, että valmistus siirtyy näihin ohutkalvokennoihin lähitulevaisuudessa, josta seuraa uusi hinnanpudotus.

Tuuli- ja aurinkoenergian lisääntymisen esteenä monet maallikot ja öljyteollisuuden lobbarit ovat väittäneet, että se ei olisi mahdollista, koska sähköverkkojen tasapainotusta ei voida hallita. Suomelle tehdyssä ennusteessa vuodelle 2050 tuulivoimaa on 31 % ja aurinkovoimaa 5 % sähköntuotannosta (Taulu 7.2.2). Suomessa on kuitenkin runsaasti tasapainotukseen soveltuvaa vesivoimaa ja lämmitysvoimaa, joiden avulla uusiutuvan energian mahdollisia tuotantokuoppia voidaan paikata.



Kuva 17.3.1 Aurinkopaneelien (c-Si, piikkenno ja CdTe, kadmium telluuri, ohutkalvo) tehohinta valmistusmäärän kasvaessa (USD/W) (Lähde: Irena).

Saksassa tuulivoimaa ja aurinkovoimaa oli vuonna 2019 vastaavasti 21 % ja 8 % eli yhteensä 29 % sähköntuotannosta (Taulu 14.3.1). Vaikka maassa oli vesivoimaa vain 3,3 % tuotannosta, silti sähkön tasapainotus onnistui vuonna 2019. Saksan samoin kuin myös Suomen apuna ovat Norjan ja Ruotsin vesivarastot, joiden avulla normaali vuorokausivaihtelu voidaan hoitaa osittain.

Taulu 14.3.1 Saksan sähkötuotanto energialähteittäin 1990–2019 (TWh/a).

SAKSA Lähde	Energiamäärä		Energiamäärä			Osuudet		
	1990 TWh	2019 TWh	Muutos TWh	Muutos/a TWh/a	Muutos %	1990 %	2019 %	Muutos %-yks.
Kivihiili	311.7	171.2	-141	-4.8	-45%	56.7%	28.0%	-28.7%
Maakaasu	35.9	91.0	55	1.9	154%	6.5%	14.9%	8.3%
Öljy	10.8	5.1	-6	-0.2	-53%	2.0%	0.8%	-1.1%
Ydinvoima	152.5	75.1	-77	-2.7	-51%	27.7%	12.3%	-15.5%
Vesivoima	17.3	20.2	3	0.1	16%	3.2%	3.3%	0.1%
Tuulivoima	0.1	126.0	126	4.3		0.0%	20.6%	20.6%
Aurinko	0.0	47.5	48	1.6		0.0%	7.8%	7.8%
Muut	21.6	76.3	55	1.9	254%	3.9%	12.5%	8.5%
Yhteensä	550	612	62	2.2	11%	100.0%	100.0%	
Uusiutuvat	39	270	231	8.0	592%	7.1%	44.1%	37.0%

Ylös-säätö

Tutkin kirjassani *“Planning of Optimal Power Systems”* vuonna 2008 tuulivoiman tehonmuutosnopeuksia Saksan E.ON Netzin sähköverkossa. Havaitsin, että tuulivoimatehon maksimi vähenemisnopeus oli vuonna 2008 noin 6 % tuulivoimalaitosten yhteistehosta 15 minuutin aikana. Jos Suomessa tuotetaan 30 % sähköstä tuulivoimalla vuonna 2050, niin yllä mainittu 6 % säätötarve tarkoittaisi, että ylös-säätävää tehoa pitää olla noin 600 MW. Vastaavasti 30 minuutin tehoa tarvitaan noin 4 % eli 400 MW.

Kokonaistarve 15- ja 30-minuutin teholle olisi noin 1000 MW, joka voitaisiin toteuttaa rakentamalla 1000 MW kaasui- tai dieselvoimatehoa. Se maksaisi noin 600–700 miljoonaa euroa ja sen vuosikulut olisivat 5 % korolla ja 25 vuoden pitoajalla laskettuna noin 43 miljoonaa euroa vuodessa. Se aiheuttaisi noin 0,4–0,5 €/MWh lisän 100 TWh järjestelmässä. Se olisi vain noin 1–2 % sähköntuotannon kustannuksista.

Tuulivoimaan verrattuna paljon suurempi stabiilisuusongelma aiheutuu Olkiluoto 3-yksiköstä, koska sen putoaminen verkosta aiheuttaa 1600 MW tehonmenetyksen alle sekunnissa. Tähän on varauduttu varaamalla reservikapasiteettia Ruotsin tuontilinjoista, koska suurin osa puuttuvasta sähköstä tulee sieltä. Lisäksi Ruotsin siirtolinjojen epätasapaino tulee korvata nopeilla varavoimalaitoksilla seuraavan 15 minuutin aikana.

Alas-säätö

Alaspäin säätö ei ole puolestaan tuulivoiman kannalta ongelma, koska tuulivoiman tehoa voi ohjata helposti lapakulmia muuttamalla. Suurimmat ongelmat tulevat käynnissä oleville CHP- ja ydinvoimalaitoksille, koska niiden kuormien pienentäminen voi olla vaikeampaa. Jos verkossa on 9000 MW tuulivoimaa, muut voimalaitokset kannattaisi taloudellisessa mielessä pysäyttää kulutuksen ollessa kesällä 9000 MW.

Ydinvoiman pysäyttäminen esimerkiksi yön ajaksi on ongelmallista, koska reaktorissa alkaa muodostua Ksenonia, joka estää reaktorin käynnistämisen. Sen vuoksi voimala joutuisi seisomaan luultavasti noin kaksi vuorokautta, että Ksenon-myrkytys häviäisi.

Kuten tunnettua Tshernobylin voimalassa Ksenon-myrkytys alkoi, kun voimalan tehoa pienennettiin. Se vuoksi melkein kaikki säätösauvat vedettiin pois reaktorista, että sen ydinreaktio ei sammuisi. Koska säätösauvat olivat poissa, niillä ei ollut enää mahdollista pienentää tehoa nopeasti. Lisäksi niiden kärjessä oli grafiitista tehty jatke, joka lisäsi reaktiivisuutta, kun säätösauvat yritettiin laskea reaktoriin takaisin. Sen oli seurauksena reaktorin karkaaminen ylikriittiseksi ja sen räjähtäminen tunnetuin seurauksin.

Tuulivoiman lisäämisen takia monissa maissa, joissa on vähän vesivoimaa, on lisätty joustavaa tuotantoa. Wärtsilä rakensi Coloradon Plains Endin 220 MW suuruisen kaasumoottorivoimalan tasaamaan 1000 MW tuulivoimatehoa. Coloradossa varauduttiin siihen, että tuulivoima vähenee aamulla yhtä aikaa kulutuksen kasvun kanssa. Coloradon sähköyhtiö Xcel Energy rakensi sen vuoksi 22 % tuulivoimatehosta nopeasti käynnistyvää sähkötehoa. Sen lisäksi yhtiöllä oli saman verran nopeasti käynnistyvää kaasuturbiinivoimaa.

Sähkön varastointi

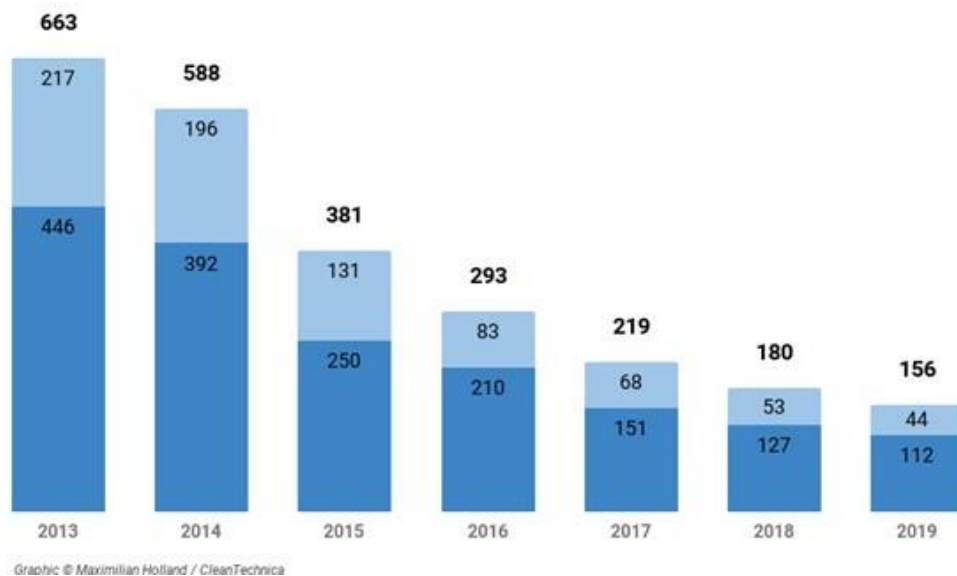
Maailmalla sähkön varastointia on toteutettu ehkä eniten pumppuvoimalaitosten avulla. Esimerkiksi yöaikaan vesivoimalan turbiinit pumppaavat vettä yläsäiliöön ja aamulla kulutuksen noustua vesi lasketaan takaisin alasäiliöön. Esimerkiksi Saksassa pumppuvoimatehoa on noin 5400 MW. Sen avulla sähköä voitaisiin varastoida noin 54 GWh yön aikana.

Sähkön varastointia voidaan tehdä myös sähköautojen akustoissa. Suomessa oli vuoden 2019 lopussa liikenteessä noin 30.000 lataushybridia ja 5000 täyssähköautoa. Niiden akustojen teho oli noin 300 ja 300 MWh vastaavasti eli yhteensä noin 600 MWh. Jos kaikki 2,7 miljoonaa henkilöautoa olisivat samassa suhteessa sähköisiä, niiden avulla sähköä voitaisiin varastoida 46 GWh. Se vastaisi Saksaan verrattuna noin 4600 MW pumppuvoimatehoa. Sähköautot voisivat korvata pumppuvoimalaitosten tarpeen Suomessa ja kaikkialla maailmassa.

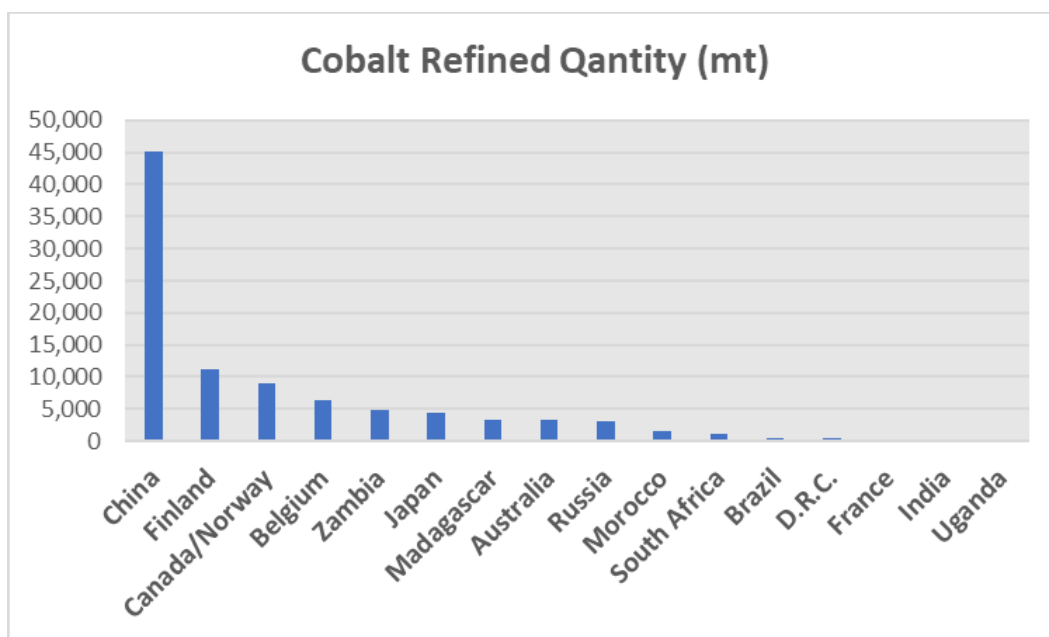
Akkuja tehdään nykyisin myös sähköverkkojen stabiilisuuden varmistamiseksi erittäin nopeiden tehonmuutosten varalle. Niitä on käytössä kaikissa kriittisissä kohteissa, joissa halutaan katkeamatonta sähköntuotantoa. Yleensä akuilla toimitaan esimerkiksi ydinvoimalaitoksissa ja sairaaloissa ensimmäisen minuutin verran, jonka aikana yleensä dieselkäyttöiset varavoimakoneet ennättävät käynnistyä.

Katkeamatonta sähköä tarvitsevista kohteista on käytetty tavallisesti lyijyakkuja, mutta autoissa litiumakkuja, koska niiden teho/painosuhde on paljon parempi. Niiden hinta on laskenut 2010-luvulla noin 80 % (Kuva 14.3.3). Ladattavan hybridi-auton akut maksavat enää noin 1400 euroa, kun ne vuonna 2013 maksoivat noin 6000 euroa.

Litiumakkujen valmistuksessa kriittinen materiaali on koboltti, jonka 16 suurimman tuotantomaaan listalta löytyy ensimmäisenä Kiina, toisena Suomi ja kolmantena Kanada ja Norja (Kuva 14.3.4). Kobolttia saadaan Talvivaaran nikkelikaivoksen sivutuotteena. Valmetilla on nyt yksi toimiva akkutehdas Salossa ja toinen rakenteilla Uutteenkaupunkiin. Suurin tehdashanke on Harjavaltaan rakennettava BASF:n akkutehdas, joka tuottaisi sähköautojen akkumateriaaleja 300.000 sähköautoa varten. Suomesta on tulossa akkuteollisuuden vientimaa.



Kuva 14.3.3 Sähköauton akkujen valmistuskustannukset (USD/kWh)
(Lähde: Bloomberg Energy Finances).



Kuva 14.3.4 Koboltin suurimmat valmistusmaat vuonna 2016 (Lähde: Cobalt Institute).

Kapasiteettimarkkinat

Tuuli- ja aurinkovoiman rakentaminen tarkoittaa, että sähkön hinnat laskevat ajoittain hyvin alas. Sen vuoksi peruskuormaa tuottavat voimalat joutuvat edellä kuvattuihin vaikeuksiin. Samasta syystä esimerkiksi uusien ydinvoimalaitosten rakentaminen on käytännössä pysähtynyt kaikissa länsimaissa.

Sähkön hinta Pohjoismaissa on vaihdellut välillä 30–40 €/MWh. Se on niin vähän, että minkään tavanomaisen voimalan rakentaminen ei ole enää kannattavaa. Ydinvoimala maksaa 5000 €/kW ja sen myyntikate vaihtelee noilla hinnoilla välillä 15–25 €/MWh. Jos huipunkäyttöaika on 8000 tuntia, käyttökatetta syntyy 120–200 €/kW. Sen takaisinmaksuajaksi tulee parhaimmillaan $5000/200 = 25$ vuotta.

Ainoa toimiva keino estää sähkön riittävyys on tehdä sähkön myyjille velvoite ylläpitää kapasiteettia. Vastaavanlainen velvoite oli Suomessa olemassa vuoteen 1995 asti, johon asti Sähköntuottajien yhteistyövaltuuskunta (STYV) ylläpiti yhteisiä pelisääntöjä varatehon rakentamisesta. Kilpailuvirasto lopetti STYVin toiminnan uusien sähkömarkkinoiden kilpailulakien vastaisena ja vuodesta 1996 asti sähkömarkkinat ovat toimineet täysin markkinaehtoisesti ilman ulkoista ohjausta aina vuoteen 2006 asti.

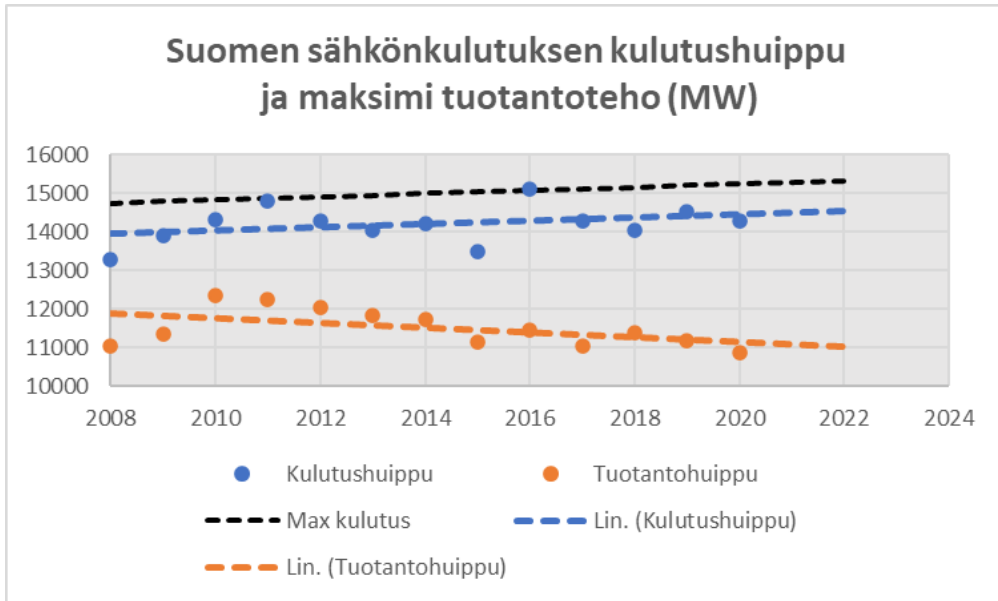
Kuitenkin vuonna 2006 säädettiin ns. Tehoreservilaki, kun vuonna 2006 oltiin hyvin lähellä sähkön säännöstelyn aloittamista. Esimerkiksi Espoossa toimiva E.ON Finland laittoi silloin varoituksen sähkön säännöstelyn aloittamisesta. Se olisi tarkoittanut, että verkosta pimennettäisiin yksi 20 kV:n muuntaja kerrallaan tunnin tai kahden ajaksi.

Sain silloin Wärtsilän Suomen myynnistä vastaavana henkilönä kutsun kauppa- ja teollisuusministeri **Mauri Pekkarisen** huoneeseen ministeriöön, jossa annoin hänelle selvityksen, kuinka Wärtsilä voisi rakentaa 600 MW varavoimaa eri puolelle Suomea (Varavoimaselvitys 2004, <http://ekoenergo.fi/page4.php>). Kerroin hänelle tästä mahdollisuudesta ja hän laittoi melkein välittömästi Tehoreservilain valmistelun liikkeille ja vuodesta 2007 asti Suomessa on varattu tehoreservejä selvityksen mukaisesti noin 600 MW siltä varalta, jos teho pääsisi loppumaan.

Kuitenkin oikeampi lähestymistapa olisi siirtyä kapasiteettimarkkinoihin, jollaiset ovat olleet USA:ssa jo yli 20 vuotta, Venäjällä vuodesta 2011 ja Britanniassa vuodesta 2014 alkaen. Kun EU pyysi konsultaatiota sähkömarkkinoiden uudistusta varten vuonna 2014, annoimme heille lausunnon, jossa esitimme kapasiteettimarkkinoiden perustamista (Consultation on EU Capacity Markets, 2014, <http://ekoenergo.fi/page4.php>). Vielä silloin markkinoita ei vielä tullut direktiiviksi asti, mutta komissiolta tuli ohjeita siitä, miten eri maiden tilannetta seurataan. Sitä tehdään käytännössä Entso-E:n toimesta vuosittain. Talvelle 2020/21 tehdyt arviot kertovat, että sähköntuotannon vajauksen todennäköisyydet (LOLP) ovat suurimmat Tanskassa (50,1 %), Ranskassa (11,8 %) ja Suomessa (2,1 %).

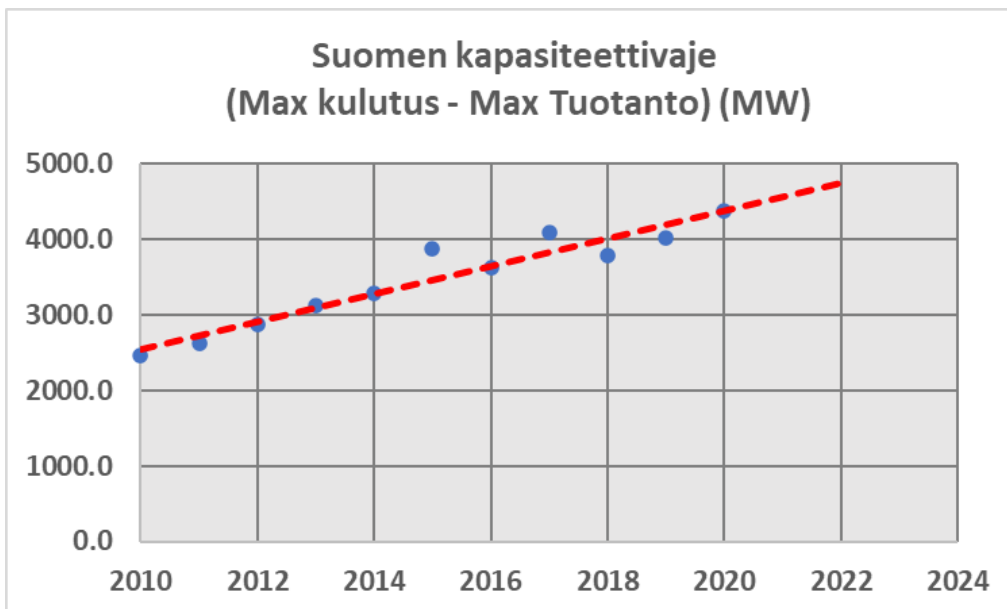
Suomen kapasiteettiongelmat

Suomi on jo 20 vuotta ollut maa, jossa on EU:n pahin kapasiteettivaje. Ennustettu maksimikulutus on talvella 2020/2021 noin 15.330 MW ja tuotanto noin 11.000 MW. Vajausta on 4330 MW, joka on 29 % ennustetusta kulutushuipusta (Kuva 14.3.5).



Kuva 14.3.5 Suomen sähkönkulutuksen huipputeho ja korkein mitattu tuotanto (MW).

Tehovaihe on kasvanut vuoden 2010 arvosta 2500 MW (25 %) nykyiseen arvoon 4330 MW (29 %) (Kuva 14.3.6). Ensi vuonna valmistuu Olkiluoto 3, joka voisi lisätä tehoa vuonna 2022 noin 1600 MW. Tehon lisäys on kuitenkin hyvin epävaralla pohjalla, koska pitää varautua siihen, että laitos onkin juuri kovimman pakkashuipun aikana alhaalla.



Kuva 14.3.6 Suomen kapasiteettivaje vuosina 2010–2020 (MW).

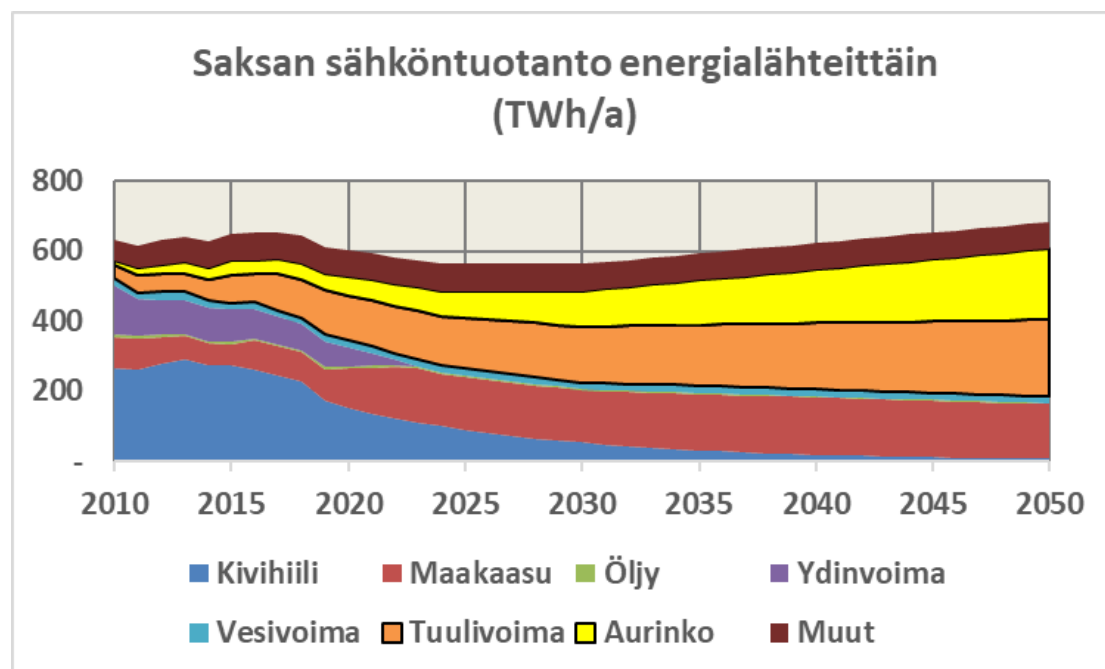
Saksan tilanne

Saksassa tulee luultavasti ensimmäisenä ongelmia, koska he ovat yhtä aikaa purkamassa ydinvoimalaitoksia ja lisäämässä rajusti tuuli- ja aurinkovoimaa. Tähän saakka Saksa on ollut sähkön nettoviejä, mutta jo vuonna 2021 se voi muuttua nettotuojaksi. Heidän tuotannostaan on vain 3 % vesivoimaa, mutta sillä on jonkin verran pumppuvoimaa, jonka avulla vuorokausisäätö on mahdollista hoitaa.

Ongelmia tulee, kun Saksa aikoo purkaa ydinvoimalaitostensa lisäksi myös hiilivoimalansa, jotka tuottivat vielä viime vuonna 2019 noin 28 % sähköstä. Ydinvoima tuotti 12 %, joten ydin ja hiilivoimalaitosten purku tarkoittaa 40 % tuotannon vähenemistä.

Uutta tuotantoa kannattaa tehdä vain tuuli- ja aurinkovoimalla. Jos 40 % tuotannosta korvataan niillä, niin 10–15 vuoden kuluttua 65 % maan sähköstä perustuu uusiutuviin lähteisiin (Kuva 17.3.7). Lopuista 27 % on maakaasuvoimaa. Verkkoa voidaan pitää kylläkin balanssissa, jos kaasutehoa rakennetaan niin paljon, että se kattaa 90 % tehotarpeesta. Ilman kapasiteettimarkkinoita tämä teho jää rakentamatta.

Uskoisin, että vasta sitten, kun Saksassa alkaa kapasiteettipula, EU alkaa suunnitella kapasiteettimarkkinoiden avaamista. Ei voi olla mahdollista, että Saksan sähkömarkkinat jäisivät muiden EU-maiden hyväntahtoisuuden varaan.



Kuva 14.3.7 Saksan sähköntuotanto 2010–2050 (TWh/a).

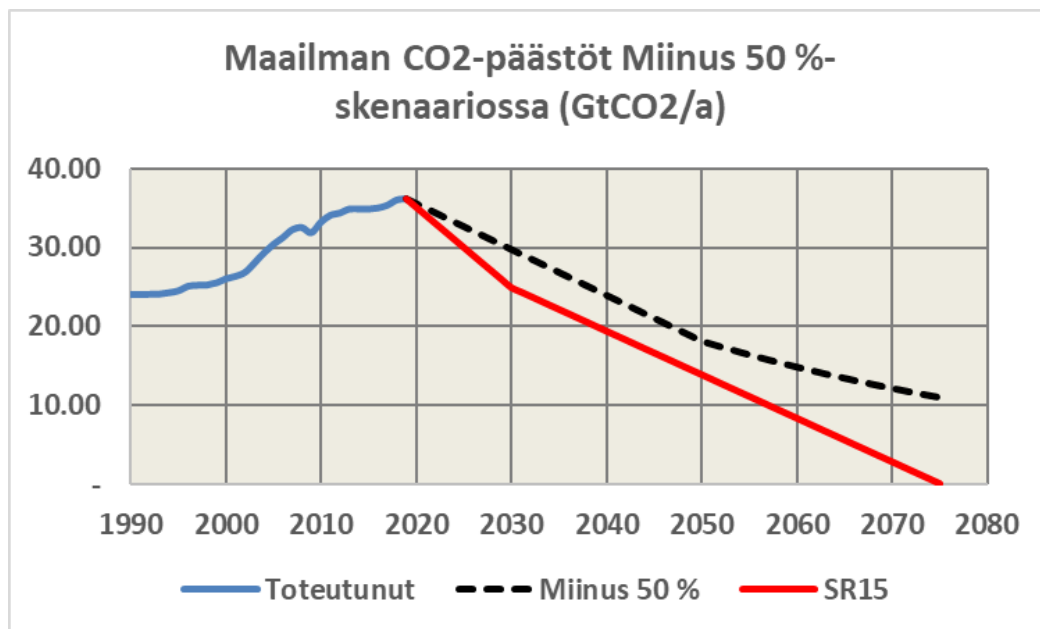
15 ILMASTOPOLITIikkaA

15.1 Kansainvälinen ilmastopolitiikka

Maailma on valmistautunut hyvin estämään lämpötilan nousun yli kahden asteen. Pariisin ilmastokokouksessa vuonna 2015 sovittiin yhteisesti, että maat alkavat vähentää hiilidioksidipäästöjään, mutta päästölupaukset jäivät niin pieniksi, että 1,5 asteen lämpötilan nousu ei ole niiden avulla mahdollista toteuttaa.

IPCC julkaisi lokakuussa 2018 raportin SR15 (Special Report 15) siitä, miten lämpötila voitaisiin rajoittaa 1,5 asteeseen. Raportin mukaan CO₂-päästöjä tulisi vähentää 45 % vuoteen 2030 mennessä ja nollaan vuoteen 2050 mennessä, jotta 1,5 asteen lämpeneminen ei tapahtuisi. Vastaavasti raportissa vaadittiin, että päästöjä pitää laskea vuoden 2010 tasosta 25 % vuoteen 2030 mennessä ja nollaan 2075 mennessä, jotta estettäisiin 2,0 asteen lämpeneminen.

Tässä kirjassa esitetty SCA2-mallin (S=Sunspots, C= CO₂-pitoisuus, A= Aerosolit) ja CO₂:n massatasemallin mukaan CO₂-pitoisuus kääntyy laskuun ja ilmasto alkaa viiletä, kun päästöt laskevat puoleen nykyisestä vuoteen 2050 mennessä. Siihen riittää, kun päästöjä lasketaan Miinus 50 %- skenaarion mukaisesti (Kuva 15.1.1) noin 6 Gt (17 %) vuoteen 2030 mennessä ja 50 % vuoteen 2050 mennessä.



Kuva 15.1.1 Kaksi mallia, miten kahden asteen lämpötilan nousu voidaan estää.

Tavoite kahden asteen alittamisesta on siis täysin mahdollista toteuttaa. Tässä kirjassa esitetyn SCA2-mallin mukaan kahden asteen alittamiseen riittää, kun päästöjä lasketaan Miinus 50 %- skenaarion mukaisesti. Samaan päästään, vaikka päästöjen vähentäminen aloitetaan vasta vuoden 2030 jälkeen esim. Kiinassa. Nythän tiedetään, että Kiina ei aio vähentää päästöjään ennen vuotta 2030, joten siihen nämä IPCC:n mallit kaatuvat. Onneksi kuitenkin IPCC:n laskelmista puuttuu tämä CO₂:n takaisinkytkentä, joka pelastaa tilanteen.

Ratkaisevaa on, että päästöjen vähentäminen aloitetaan maailmanlaajuisesti. Siihen YK:n organisaation sopii mainiosti. Alun perin se perustettiin heti toisen maailmansodan päättymisen jälkeen estämään sotia. Ilmastonmuutoksen pysäyttäminen vaatii käytännössä sodan tapaisen yhteenliittymän, johon kaikki maat tarvitaan mukaan. Myös tavoite pitää kaikille maille olla kristallin kirkas: kaksi tonnia per asukas. Jos jokainen maa laskisi vuoteen 2050 mennessä CO₂-päästönsä tasolle 2 t/asukas, kahden asteen raja ei ylittyisi.

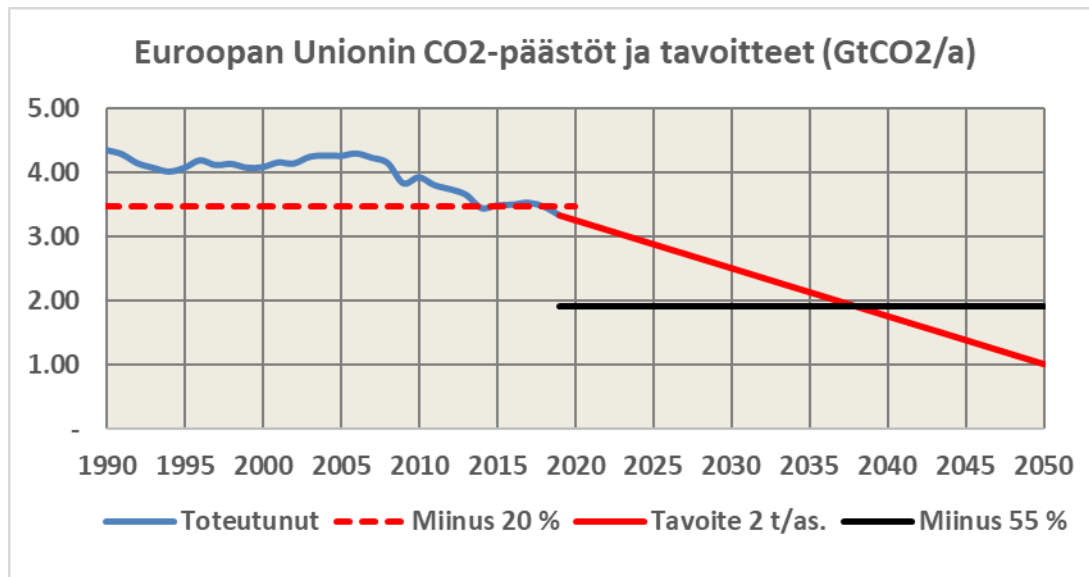
15.2 EU:n toimenpiteet

EU:lla on tärkeä rooli olla aloitteen tekijänä ja esimerkin näyttäjänä ilmastonmuutoksen ehkäisyssä. Ensimmäiset direktiivin luotiin 20-, 20-, 20- mallilla, joiden avulla haluttiin vähentää CO₂-päästöjä vuoteen 2020 mennessä 20 %. Samalla haluttiin uusiutuvan energian osuus nostaa 20 %:iin ja energiatehokkuutta nostaa 20 %.

Näistä tavoitteista CO₂-päästöjen vähennys ja uusiutuvan energian lisäys ovat toteutumassa. Vuonna 2019 päästöjä oli noin 3330 MtCO₂ eli noin 23,5 % vähemmän kuin vuonna 1990, jolloin päästöt olivat 4350 MtCO₂. Päästöt ovat vähentyneet 1020 MtCO₂ 19 vuodessa eli keskimäärin 64 MtCO₂ vuodessa.

Seuraava EU:n tavoite vuodelle 2030 on 55 % vähennys päästöihin vuoden 1990 arvosta, joka oli 4350 milj. tonnia vuonna 1990. Silloin päästöjä saisi vuonna 2030 olla korkeintaan 1960 MtCO₂, joka olisi 39 % vähemmän kuin vuonna 2019. Tavoite tarkoittaisiin, että päästöjä vähennettäisiin vuoden 2019 arvosta 3330 MtCO₂ arvoon 1960 MtCO₂. Vähennys olisi 1370 MtCO₂ 11 vuodessa eli 125 miljoonaa tonnia vuodessa. Se on kuitenkin kaksinkertainen aiempaan vuosien 1990–2020 tavoitteeseen verrattuna.

Kahden asteen tavoitteen savuttamiseksi riittäisi, että CO₂-päästöt olisivat vuonna 2050 noin 1000 miljoonaa tonnia (2 tonnia per asukas) eli 70 % pienemmät kuin 2019 (Kuva 18.2.1). Tähän päästään, kun päästöjä vähennetään 3330 miljoonasta tonnista 1000 miljoonaan tonniin 31 vuoden aikana eli noin 75 miljoonaa tonnia vuosittain. Se on vain vähän enemmän kuin vähennys vuosina 1990–2019. Tällä ohjelmalla 55 % vähennys vuoden 1990 päästöistä saavutetaan vuoteen 2037 mennessä.



Kuva 15.2.1 EU:n päästötavoite vuodelle 2050 tulisi olla 1000 Mt eli 2 tCO₂/asukas.

15.3 Suomen ilmastopolitiikka

Sähkön ja lämmön tuotanto

Suomen pitää tietysti noudattaa EU:n ilmastopolitiikkaa ja kulkea vielä sen eturintamassa, koska se mahdollistaa uusien teknologioiden kehittämisen ensimmäisten joukossa. Meidän luonnonvaramme muodostuvat oikeastaan vain puusta, vedestä, tuulesta ja auringosta.

Puuta on käytetty lämmityksessä näillä pohjoisilla leveysasteella jo satoja vuosia ehkä 10.000 vuotta sitten, kun ensimmäiset asukkaat ilmestyivät Suomen alueelle. Puusta tehtiin myös hirsitalot, jotka ovat tarjonneet suojaa pakkasella. Puun on edelleen tärkein primäärienergian tuottaja Suomessa, mutta puun käytön lisääminen ei ole enää mahdollista.

Vesivoimaa käytettiin sahoilla voimanlähteinä puutavaran teossa 1800-luvun lopulta lähtien. Vuonna 1892 vesivoima pyöritti Tampereen Finlaysonin tehtaan kutomakoneiden lisäksi myös pientä dynamokonetta, joka valaisi kutomosalit. Nyt vesivoimapotentiaali on käytännössä kokonaan rakennettu eikä siitä ole avuksi korvaamaan fossiilisia polttoaineita.

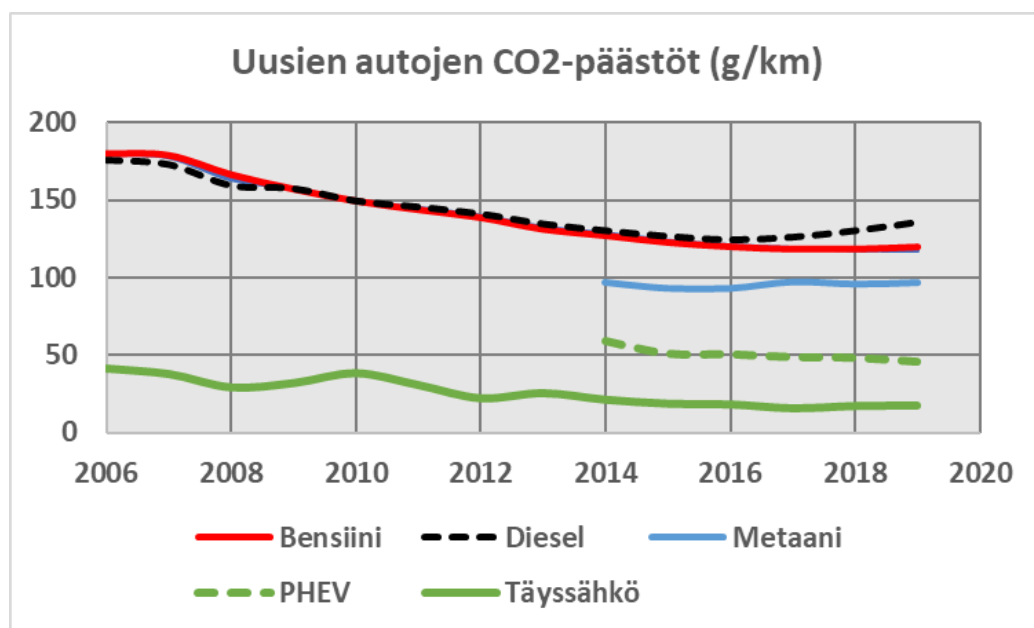
Tuulimyllyjen avulla jauhettiin viljaa Suomessa lähes jokaisessa kylässä. Nyt myllyt ovat tulleet takaisin ja niistä saattaa tulla vuoteen 2050 mennessä tärkein sähköntuotantomuoto. Tuulivoimaa rakennetaan runsaasti Pohjanmaan rannikolle ja Pohjois-Suomeen. Sen avulla sähköstä tuotetaan jo 7 % Suomen sähkötarpeesta. Vuoteen 2050 mennessä tuulivoiman osuus sähköstä voisi nousta noin 30 %:iin.

Uutena tekniikkana ovat aurinkokennot, joita asennetaan pientalojen ja myös kerros- ja liiketalojen katoille. Aurinkokennot tuottivat kuitenkin vasta 0,2 TWh sähköä vuonna, mutta ne yleistyvät nopeasti ja vuonna 2050 niiden tuottaman sähkön määrä nouse noin 6 TWh, jolloin se vastaakin jo noin 5 % sähköhankinnasta.

Panostus päästöjen vähentämiseen

Primäärienergian käyttö säilyy tulevaisuudessa ennallaan, mutta energian käyttö pitää siirtää päästöttömiin vaihtoehtoihin. Niistä suurimpia säästöjä on saatavissa autoilun ja asuinrakennusten päästöjen vähentämisessä.

Autoilun muuttaminen bensiini- ja dieselautoista sähköautoihin tarkoittaa merkittävää vähennystä. Uusien bensiini- ja dieselkäyttöisten henkilöautojen päästöt ovat 120 ja 140 g/km vastaavasti (Kuva 15.3.1). Ladattavat hybridit pääsevät noin 50 g/km ja sähköautot luokkaan 15 g/km. Siirtyminen ladattaviin hybridi- tai täyssähköautoihin tarkoittaisi noin 50–90 % vähennystä päästöihin eli noin 4 miljoonan CO₂-tonnin säästöä vuosittain.



Kuva 15.3.1 Henkilöautojen CO₂-päästöt (g/km) (lähde: Autoalan tiedotuskeskus).

Jos valtiovalta haluaa, että sähköautoihin siirrytään nopeasti, ladattavien autojen hinnat on tehtävä kilpailukykyisiksi esimerkiksi autoveroja muuttamalla. Jos sähköauto maksaa saman kuin tavanomainen polttomoottoriauto, ihmiset valitsevat sen mieluummin. Tämä voitaisiin tehdä esimerkiksi poistamalla sähköautoilta autovero ja arvonlisävero.

Toinen merkittävä päästöjen vähennyskeino on siirtyä kaikissa pien- ja rivitaloissa lämpöpumppulämmitykseen. Sen päästöjen vähentämispotentiaali on maalämpöpumppujen avulla noin 2 miljoonaa tonnia CO₂, jos kaikki öljykäyttöiset ja kaukolämmitetyt pien- ja rivitalot siirtyisivät lämpöpumppuihin. Noin 300.000 CO₂-tonnin säästö voisi syntyä, jos sähkölämmitystalot hankkisivat ilmalämpöpumput. Näitä lämmitystavan muutosta avustetankin jo merkittävästi.

Merkittävä CO₂-päästöjen vähennys voidaan saada aikaan myös rakentamalla tulevaisuudessa myös kerrostalot puusta. Samalla Suomen metsien hiilivaranto lisääntyisi, jos puut kasvatettaisiin yhä vanhemmiksi tukkipuiksi. Pientaloista suurempi osa tulisi olla hirsitaloja ja niistä voisi viedä myös kehitysapuna. Samalla lisättäisiin hiilinieluja myös Suomen metsissä.

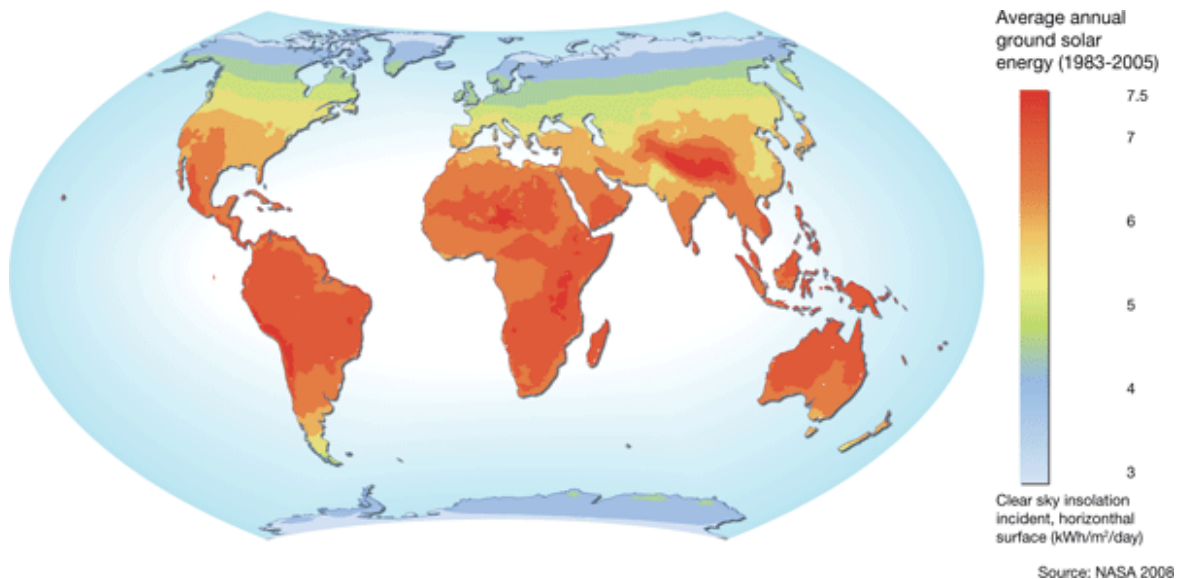
Suuret vähennykset päästöihin saadaan, kun sekä sähkön että lämmön tuotanto muuttuu lähes hiilivapaaksi vuoteen 2050 mennessä. Sähköntuotannon päästöt vähenevät nykyisistä noin 6 miljoonaa tonnia ja kaukolämmön päästöt noin 5 miljoonaa tonnia vuodessa.

Vuoden 2030 tavoitteena on myös 32 % parannus energiatehokkuuteen. Tuon tavoitteen saavuttaminen vaatii myös kovia toimenpiteitä. Hiilidioksidipäästöjä voidaan välttää, jos:

- 1) Fossiilisia polttoaineista tehdyn öljyn käyttöä vähennetään liikenteessä vuoden 1990 arvosta 10 eksajoulea arvoon 7 eksajoulea eli 30 % vuoteen 2030 mennessä. Siihen voidaan päästä, jos uusien polttomoottorikäyttöisten henkilöautojen myynti lopetetaan vuoteen 2030 mennessä. Tällöin EU:n autokannasta 15 % olisi sähköautoja vuonna 2030.
- 2) Talojen rakentamisessa siirrytään betonitaloista puutaloihin. Puu ja hirsitalojen rakentajille annetaan hyvitystä talojen varastoimasta hiilestä ja metsien omistajille puiden kasvattamista tukkipuiksi.
- 3) Pien- ja rivitaloasunnoissa luovutaan paikallisista polttoaineista ja niiden lämmitys muutetaan käyttämään lämpöpumppuja, joiden lämmöntarve on noin kolmanneksen pienempi kuin vanhoissa taloissa.
- 4) Kaukolämmössä siirrytään jätelämpöjen ja lämpöpumppujen käyttöön. Esimerkiksi Loviisan ydinvoimalan jätelämmöllä voitaisiin Pääkaupunkiseudun kaukolämmöstä tehdä hiilivapaata.

15.4 Yhteenveto

Maailma siirtyy vähitellen aurinko- ja tuulisähkön aikaan. Aurinkosähköstä tulee tärkein sähköntuotantomuoto päiväntasaajan molemmiin puolin – 40° ja + 40° leveyspiirien välissä (Kuva 13.4.1). Tuulivoimasta saadaan edullisinta sähköä sitä pohjoisimmilla leveysasteilla. Hiilivapaan sähkön tuotannon lisääntyminen tarkoittaa, että myös asumisen ja liikenteen käyttö on muuttumassa öljystä ja kaasusta sähköiseksi. Tätä muutosta voidaan nopeuttaa verohelpoituksin.



Kuva 15.4.1 Auringon säteilykartta maailmassa (kWh/m²/päivä) (Lähde: Nasa 2008).

Kirjassa esitetyn hiilitasemallin mukaan ilmakehän CO₂-pitoisuus saavuttaa huippunsa 440–450 ppm, kun päästöt puolitetaan Miinus 50 %- skenaarion mukaisesti vuoteen 2050 mennessä. Silloin ilmakehän lämpötilan huippuarvo ei kirjassa esitetyn SCA2-mallin mukaan nouse kahta astetta 1900-luvun alun lämpötilaa korkeammaksi.

Maailma voi pienentää hiilidioksidipäästönsä vuoteen 2050 mennessä tasolle kaksi tonnia per asukas. Vuosien 2050–2060 jälkeen ilmakehän CO₂-pitoisuus alkaa laskea ja ilmasto viiletä, jos päästöt vähenevät kirjassa esitettyä Miinus 50 %-skenaarion mukaisesti.

LIITTEET

Liite 1 Eniten elävien metsien hiilivarastoja vähentäneet maat (GtCO₂).

CO2 storage in living forests (GtCO ₂)									Change	Change
	Countries	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	Mt/a	%/a
1	Indonesia	63.72	61.47	59.22	55.78	50.78	45.79	44.79	-728	-1.14%
2	Brazil	235.44	231.05	226.66	221.21	218.62	217.15	216.85	-715	-0.30%
3	Nigeria	7.39	6.47	5.56	4.83	3.98	3.06	2.88	-174	-2.35%
4	Tanzania	24.21	23.34	22.48	21.61	20.75	19.94	19.78	-170	-0.70%
5	Congo	74.92	74.19	73.47	72.74	72.01	71.28	71.14	-145	-0.19%
6	Colombia	35.67	34.94	34.22	33.38	32.58	32.51	32.50	-122	-0.34%
7	Cameroon	12.07	11.52	10.97	10.43	9.89	9.34	9.23	-109	-0.90%
8	Paraguay	9.30	8.94	8.59	8.23	7.59	6.88	6.74	-98	-1.06%
9	Bolivia	17.88	17.50	17.11	16.72	16.29	15.87	15.78	-81	-0.45%
10	Argentina	12.94	12.64	12.35	11.95	11.49	11.05	10.96	-76	-0.59%
11	Venezuela	22.86	22.33	21.80	21.25	21.26	20.96	20.90	-76	-0.33%
12	Myanmar	7.48	7.07	6.65	6.36	6.06	5.69	5.61	-72	-0.96%
13	Canada	52.90	52.86	52.83	51.83	51.30	51.27	51.26	-63	-0.12%
14	Sudan	8.75	8.56	8.37	7.62	7.45	7.23	7.19	-60	-0.69%
15	Peru	32.38	32.16	31.95	31.73	31.39	31.04	30.96	-54	-0.17%
16	Zimbabwe	2.56	2.37	2.18	1.99	1.80	1.62	1.59	-37	-1.46%
17	Ecuador	6.39	6.18	5.97	5.80	5.63	5.46	5.43	-37	-0.58%
18	Mozambique	6.89	6.71	6.53	6.35	6.20	6.02	5.98	-35	-0.51%
19	Angola	16.77	16.60	16.42	16.25	16.08	15.91	15.87	-34	-0.21%
20	Honduras	1.90	1.69	1.49	1.35	1.21	1.07	1.04	-33	-1.73%
21	Cambodia	2.23	2.10	1.97	1.82	1.70	1.59	1.56	-26	-1.15%
22	Ethiopia	1.46	1.00	0.93	0.87	0.80	0.82	0.82	-25	-1.70%
23	Madagascar	6.52	6.35	6.19	6.10	5.96	5.89	5.87	-25	-0.38%
24	Zambia	9.46	9.31	9.16	9.01	8.86	8.83	8.82	-24	-0.26%
25	Pakistan	1.21	1.10	0.99	0.89	0.78	0.64	0.61	-23	-1.91%
26	Nicaragua	1.86	1.71	1.57	1.42	1.28	1.28	1.28	-22	-1.19%
27	Nepal	2.21	2.06	1.91	1.78	1.78	1.78	1.78	-17	-0.75%
28	Mongolia	2.46	2.38	2.30	2.22	2.14	2.06	2.04	-16	-0.65%
29	Ghana	3.01	2.91	2.80	2.62	2.65	2.61	2.60	-15	-0.51%
30	Somalia	1.77	1.69	1.61	1.52	1.44	1.38	1.37	-15	-0.87%
31	Chad	1.36	1.32	1.28	1.24	1.11	0.99	0.96	-15	-1.12%
32	Iran	0.91	0.91	0.91	0.93	0.95	0.61	0.54	-14	-1.55%
33	Uganda	0.63	0.57	0.51	0.45	0.37	0.28	0.26	-14	-2.24%
34	Mexico	7.66	7.57	7.49	7.40	7.34	7.31	7.30	-14	-0.18%
35	Central African	10.77	10.70	10.63	10.56	10.49	10.42	10.41	-14	-0.13%
36	Guatemala	1.34	1.26	1.19	1.11	1.03	0.99	0.99	-14	-1.01%
37	Lao People's R.	4.23	4.19	4.14	4.06	3.98	3.90	3.88	-13	-0.31%
38	North-Korea	0.88	0.82	0.76	0.70	0.63	0.56	0.54	-13	-1.46%
39	Guinea	2.52	2.46	2.39	2.33	2.27	2.21	2.19	-12	-0.49%
40	Benin	1.22	1.14	1.07	1.02	0.96	0.91	0.90	-12	-1.00%
Total 1-40		716.1	700.1	684.6	665.4	648.9	634.2	631.2	-3263	-0.46%
Total 41-118		94.6	93.4	92.8	92.2	91.5	91.0	90.9	-144	-0.15%
Total 1-118		810.7	793.5	777.4	757.6	740.4	725.2	722.1	-3407	-0.42%

Liite 2 Eniten elävien metsien hiilivarastoja kasvattaneet maat (GtCO₂).

CO2 storage in living forests (GtCO2)									Change	Change
		1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	Mt/a	%/a
1	USA	52.98	55.29	57.61	60.11	62.58	63.54	63.74	414	0.78%
2	China	16.39	18.01	19.62	21.33	23.32	24.88	25.20	339	2.07%
3	Russian Federa	118.55	118.55	117.91	118.10	119.17	120.27	120.49	75	0.06%
4	Japan	4.25	4.66	5.06	5.29	6.04	6.04	6.04	69	1.62%
5	France	3.54	3.69	3.85	4.27	4.57	5.00	5.09	60	1.68%
6	India	8.15	8.43	8.72	9.59	10.27	9.71	9.59	55	0.68%
7	Poland	1.71	1.86	2.00	2.20	2.81	3.01	3.05	52	3.01%
8	Germany	3.19	3.51	3.82	3.98	4.11	4.36	4.41	47	1.46%
9	Spain	1.19	1.43	1.66	1.90	2.07	2.23	2.27	41	3.48%
10	Republic of Kor	0.54	0.71	0.88	1.10	1.34	1.54	1.58	40	7.48%
11	Turkey	2.00	2.11	2.22	2.36	2.64	2.96	3.03	40	1.98%
12	Romania	1.40	1.40	1.40	1.41	1.43	2.26	2.43	39	2.80%
13	Viet Nam	2.85	3.13	3.40	3.53	3.62	3.76	3.79	36	1.26%
14	Italy	1.47	1.64	1.82	2.00	2.17	2.35	2.39	35	2.41%
15	Chile	4.74	4.81	4.87	4.91	4.94	5.47	5.58	32	0.68%
16	Belarus	1.59	1.59	1.77	1.98	2.24	2.37	2.39	31	1.94%
17	Ukraine	2.13	2.13	2.43	2.61	2.78	2.87	2.89	29	1.37%
18	Sweden	3.48	3.60	3.73	4.00	4.04	4.09	4.09	23	0.67%
19	Gabon	10.50	10.50	10.50	10.50	10.50	10.97	11.07	22	0.21%
20	Norway	1.22	1.30	1.38	1.50	1.62	1.75	1.77	21	1.74%
21	Finland	2.32	2.47	2.62	2.73	2.86	2.86	2.86	21	0.89%
22	New Zealand	4.57	4.69	4.81	4.90	4.99	5.09	5.10	21	0.45%
23	Uruguay	0.35	0.48	0.61	0.68	0.77	0.83	0.84	19	5.36%
24	Cuba	0.75	0.93	1.10	1.26	1.08	1.15	1.16	16	2.08%
25	United Kingdom	0.49	0.56	0.64	0.72	0.79	0.87	0.88	15	3.13%
26	Bulgaria	0.46	0.53	0.59	0.67	0.72	0.78	0.79	13	2.72%
27	Australia	29.31	29.34	29.37	29.17	29.19	29.56	29.63	12	0.04%
28	Latvia	0.77	0.77	0.85	0.88	0.97	1.05	1.06	11	1.46%
29	Serbia	0.60	0.60	0.63	0.66	0.86	0.87	0.87	10	1.74%
30	Dominican Rep	0.29	0.34	0.39	0.43	0.48	0.52	0.53	9	3.17%
31	Austria	1.23	1.29	1.35	1.39	1.41	1.43	1.44	8	0.66%
32	Croatia	0.75	0.75	0.81	0.87	0.92	0.94	0.94	7	0.96%
33	Philippines	2.35	2.37	2.38	2.32	2.18	2.48	2.54	7	0.30%
34	Slovenia	0.36	0.36	0.39	0.45	0.48	0.52	0.52	6	1.76%
35	Slovakia	0.65	0.65	0.70	0.74	0.77	0.80	0.81	6	0.95%
36	Morocco	0.74	0.79	0.83	0.88	0.88	0.88	0.89	5	0.73%
37	Uzbekistan	0.04	0.04	0.05	0.06	0.07	0.15	0.17	5	12.45%
38	Lithuania	0.51	0.51	0.53	0.55	0.58	0.61	0.62	4	0.79%
39	Hungary	0.35	0.37	0.39	0.41	0.43	0.45	0.45	4	1.11%
40	Bhutan	0.98	1.00	1.02	1.04	1.06	1.08	1.08	4	0.40%
Total 1-40		289.74	297.17	304.71	313.48	323.76	332.33	334.04	1704	0.59%
Total 41-115		30.73	30.14	29.60	29.58	30.38	31.70	31.96	47	0.15%
Total 1-115		320.47	327.31	334.31	343.06	354.14	364.02	366.00	1751	0.55%

Liite 3 Maailman sahateollisuuden tuotanto (Mm³/a).

Saw wood production (Mm3/a)									
	Countries	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	Change
1	United States of A	86.14	84.14	91.08	97.02	60.01	76.36	78.17	-7.98
2	China	23.58	25.27	6.68	17.96	37.23	74.36	77.21	53.63
3	Canada	39.74	45.44	50.46	60.19	38.67	47.11	49.72	9.98
4	Russian Federatio	26.50	26.50	20.00	23.91	28.87	34.50	36.79	10.29
5	Germany	14.72	14.11	16.34	21.93	22.06	21.49	22.20	7.47
6	Sweden	12.02	14.94	16.18	17.60	16.76	18.17	18.36	6.34
7	Brazil	13.73	18.10	21.30	23.56	17.45	14.80	14.60	0.87
8	Finland	7.50	9.94	13.42	12.27	9.47	10.64	11.42	3.92
9	Austria	7.51	7.80	10.39	11.07	9.60	8.73	9.41	1.90
10	Japan	29.78	24.49	17.09	12.83	9.42	9.23	9.29	-20.49
11	Turkey	4.92	4.33	5.53	6.45	6.24	7.77	8.50	3.58
12	Chile	3.33	3.80	5.70	8.30	6.35	8.37	8.46	5.13
13	France	10.96	9.85	10.54	9.72	8.32	7.51	7.89	-3.07
14	India	17.46	17.46	7.90	14.79	6.89	6.89	6.89	-10.57
15	Romania	2.91	1.78	3.40	4.32	4.32	6.30	6.04	3.13
16	Viet Nam	0.90	1.61	2.95	3.23	5.80	6.00	6.00	5.10
17	Australia	3.15	3.69	4.09	4.69	5.08	5.08	5.10	1.95
18	Poland	4.13	3.84	4.26	3.36	4.22	4.84	4.94	0.82
19	New Zealand	2.20	2.95	3.91	4.27	4.08	4.03	4.24	2.04
20	Indonesia	9.15	6.64	6.50	4.33	4.17	4.17	4.17	-4.98
21	Czechia	3.90	3.49	4.11	4.00	4.74	4.15	4.06	0.16
22	Latvia	1.30	1.30	3.90	4.23	3.15	3.48	3.90	2.60
23	Thailand	1.19	0.43	0.22	2.87	2.85	2.85	3.70	2.51
24	United Kingdom	2.27	2.30	2.62	2.78	3.10	3.49	3.67	1.40
25	Malaysia	8.85	8.38	5.59	5.19	4.32	3.52	3.42	-5.43
26	Ukraine	2.92	2.92	2.13	2.42	1.74	2.70	3.05	0.13
27	Mexico	2.37	2.33	3.11	2.67	2.43	2.55	2.82	0.46
28	Belarus	1.49	1.55	1.81	2.74	2.57	2.88	2.75	1.26
29	Norway	2.41	2.21	2.28	2.33	2.12	2.44	2.53	0.12
30	Republic of Korea	3.90	3.44	4.54	4.37	2.15	2.42	2.29	-1.60
31	Spain	3.27	3.26	3.76	3.66	2.04	1.69	2.14	-1.13
32	South Africa	1.94	1.57	1.50	2.22	1.88	1.97	2.14	0.20
33	Nigeria	2.73	2.36	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	-0.73
34	Estonia	0.35	0.35	1.44	2.06	1.77	1.77	1.70	1.35
35	Belgium-Luxembc	1.19	1.15	1.15	1.29	1.38	1.80	1.70	0.51
36	Angola	0.14	0.63	0.69	1.08	0.77	1.64	1.64	1.51
37	Myanmar	0.33	0.35	0.55	1.59	1.61	1.61	1.61	1.28
38	Slovakia	0.65	0.65	1.27	2.62	2.58	1.60	1.58	0.93
39	Argentina	0.82	0.70	0.72	0.66	1.40	1.50	1.50	0.68
40	Italy	1.95	1.85	1.63	1.59	1.20	1.47	1.50	-0.45
Top 1-40		364.29	367.89	362.71	414.15	350.80	423.89	439.12	74.84
Others		26.41	23.79	22.63	23.74	24.82	28.22	27.60	1.18
Total		390.70	391.68	385.35	437.89	375.63	452.12	466.72	76.02

Liite 4 Metsiin varastoitu CO₂-määrä (GtCO₂) EU:ssa vuosina 1990–2016
(Lähde FAO State of World Forests ja Data of World Forests. Ekoenergo Oy).

CO2 storage in living forests (GtCO2)									Change	Change
Countries		1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	Mt/a	%
1	France	3.54	3.69	3.85	4.27	4.57	5.00	5.09	59.6	1.68%
2	Poland	1.71	1.86	2.00	2.20	2.81	3.01	3.05	51.6	3.01%
3	Germany	3.19	3.51	3.82	3.98	4.11	4.36	4.41	46.8	1.46%
4	Spain	1.19	1.43	1.66	1.90	2.07	2.23	2.27	41.4	3.48%
5	Romania	1.40	1.40	1.40	1.41	1.43	2.26	2.43	39.3	2.80%
6	Italy	1.47	1.64	1.82	2.00	2.17	2.35	2.39	35.3	2.41%
7	Sweden	3.48	3.60	3.73	4.00	4.04	4.09	4.09	23.5	0.67%
8	Finland	2.32	2.47	2.62	2.73	2.86	2.86	2.86	20.8	0.89%
9	United Kingdom	0.49	0.56	0.64	0.72	0.79	0.87	0.88	15.3	3.13%
10	Bulgaria	0.46	0.53	0.59	0.67	0.72	0.78	0.79	12.6	2.72%
11	Latvia	0.77	0.77	0.85	0.88	0.97	1.05	1.06	11.2	1.46%
12	Austria	1.23	1.29	1.35	1.39	1.41	1.43	1.44	8.1	0.66%
13	Slovenia	0.36	0.36	0.39	0.45	0.48	0.52	0.52	6.3	1.76%
14	Slovakia	0.65	0.65	0.70	0.74	0.77	0.80	0.81	6.1	0.95%
15	Lithuania	0.51	0.51	0.53	0.55	0.58	0.61	0.62	4.0	0.79%
16	Hungary	0.35	0.37	0.39	0.41	0.43	0.45	0.45	3.9	1.11%
17	Ireland	0.09	0.11	0.12	0.14	0.18	0.19	0.19	3.7	4.13%
18	Estonia	0.55	0.55	0.58	0.58	0.60	0.61	0.61	2.2	0.41%
19	Greece	0.25	0.26	0.27	0.28	0.29	0.30	0.30	2.2	0.90%
20	Belgium	0.21	0.23	0.22	0.24	0.25	0.27	0.27	2.2	1.03%
21	Netherlands	0.08	0.08	0.09	0.09	0.11	0.12	0.12	1.8	2.34%
22	Denmark	0.12	0.13	0.14	0.14	0.14	0.15	0.15	1.1	0.86%
23	Luxembourg	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.0	0.00%
24	Total	24.46	26.04	27.80	29.77	31.83	34.33	34.83	398.9	1.63%

ILMASTONMUUTOKSEN PYSÄYTYS KAHTEN ASTEESEEN

Ilmastomuutoksen pysäyttäminen kahteen asteeseen oli joulukuussa 2015 pidetyn Pariisin ilmastokokoukseen osallistuneiden valtioiden sitoumus, joka astui voimaan marraskuussa 2016, kun myös EU oli sen hyväksynyt. Sopimus edellytti, että maat ryhtyvät toimiin ilmastopäästöjen rajoittamiseksi kukin omien sitoumustensa mukaisesti.

Kahden asteen lämpeneminen voidaan estää, jos päästöjä vähennetään 50 % vuoteen 2050 mennessä tässä kirjassa esitetyn ilmaston lämpenemisen SCA2-mallin mukaisesti. Tässä mallissa on huomioitu myös merien ratkaiseva osuus hiilinieluna, jonka vuoksi yli 50 % ihmiskunnan aiheuttamista CO₂-päästöistä absorboituu maailman meriin. Tämä sama havainto on nyt kerrottu myös uusimmissa NASAn tutkimuksissa.

Kehitetty SCA2 mallin avulla vuosina 1960–2010 tapahtunut lämpeneminen on pystytty laskemaan 0,050 asteen keskihajonnalla. Mallinnukset ovat kuitenkin sen verran yksinkertaisia, että myös lukiolainen voi sen avulla laskea itse maailman lämpenemistä.

Kirjassa on laskettu Miinus 50 %- skenaario, jonka mukaan CO₂-päästöt puolitetaan arvoon 18 GtCO₂ vuoteen 2050 mennessä. Vuonna 2050 jokaisen maan tulee päästä tasolle 2 tonni asukasta kohti laskettuna. Tämän mukaisesti suurimmille päästäjille on tehty tavoiteohjelma, miten tähän päästään.



Asko Vuorinen (tekn. lis.) toimi suunnitteluinsinöörinä Imatran Voima Oy:n Atomivoimaprojektiryhmässä vuodesta 1971 alkaen suunnittelemassa Loviisan 1 ja 2 ydinvoimalaitoksia ja pääsuunnittelijana Loviisa 3-projektissa. Hän toimi vuodesta 1992 alkaen Wärtsilän energiajohtajana ja sen tytäryhtiön toimitusjohtajana. Hän on julkaissut 18 kirjaa, joista kerrotaan perheen kustannusyhtiön kotisivuilla www.ekoenergo.fi.

ISBN 978-952-68394-7-9 (nid.)

ISBN 978-952-68394-8-6 (PDF)

