



VALTIONEUVOSTON KANSLIA



Kahden asteen ilmastotavoite – mitä riskejä vältetään, miten paljon päästöjä tulee vähentää

Selvitys Vanhasen II hallituksen
tulevaisuusselontekoa varten

Kahden asteen ilmastotavoite –
mitä riskejä vältetään,
miten paljon päästöjä tulee vähentää

Selvitys Vanhasen II hallituksen
tulevaisuusselontekoa varten

Julkaisija
VALTIONEUVESTON KANSLIA

KUVAILULEHTI
25.8.2008

Tekijät
Ilkka Savolainen, Sampo Soimakallio, Tomi Lindroos ja Sanna Syri; VTT

Julkaisun laji
Ilmasto- ja energiapoliittisen tulevaisuusselonteon taustajulkaisu

Toimeksiantaja
Valtioneuvoston kanslia

Diaarinumero
Dnro: 1767/23/2007

Julkaisun nimi
Kahden asteen ilmastotavoite – mitä riskejä vältetään, miten paljon päästöjä tulee vähentää
Selvitys Vanhasen II hallituksen tulevaisuusselontekoa varten

Tiivistelmä
Selvitys esittelee EU:n kahden asteen lämpötilatavoitteen perusteita ja sen merkitystä päästönvähennystavoitteille. Rajoittamalla maapallon keskilämpötilan nousu kahteen asteeseen esiteolliseen aikaan nähdén voidaan merkittävästi rajoittaa ilmaston muuttumisesta seuraavia haittoja verrattuna tilanteeseen, jossa lämpötila nousisi selvästi yli kahden asteen tason.

Ilmakehän kasvihuonekaasujen pitoisuuksien vakauttamisen edellytyksenä on päästöjen kasvun kääntyminen laskuun. Mitä alhaisempi vakautustaso, sitä aikaisemmin ja jyrkemmin päästöjen tulisi vähentyä. Seuraavien kahden tai kolmen vuosikymmenen aikana tehtävillä valinnoilla tulee olemaan suuri vaikutus mahdollisuuksiin saavuttaa alhaisia pitoisuustasoja.

Selvityksessä arvioidaan, että kahden asteen saavuttaminen on mahdollista, jos ilmaston herkkyys ei ole kovin suuri ja jos päästöjen ohjaus on tehokasta. Teknologian kehittämisellä voidaan vaikuttaa tavoitteen toteutumiseen ja aiheutuviin kustannuksiin.

Avainsanat
tulevaisuusselonteko, ilmastomuutos, ilmastotavoite, päästövähennystavoitteet

Julkaisusarjan nimi ja numero
Valtioneuvoston kanslian julkaisusarja 13/2008

ISSN
0782-6028

ISBN (painettu)
978-952-5631-77-7

Kokonaissivumäärä
66

Kieli
Suomi

Luottamuksellisuus
Julkinen

ISBN (PDF)
978-952-5631-78-4

Kustantaja
Valtioneuvoston kanslia
Julkaisu PDF:nä: www.vnk.fi/julkaisut
Lisätietoja: julkaisut@vnk.fi

Taitto
Valtioneuvoston kanslia/PAY

Julkaisun välitys
Yliopistopaino, Helsinki
www.yliopistopaino.fi/kirjamyynnti
Tilaukset: books@yliopistopaino.fi

Painopaikka
Yliopistopaino, Helsinki, 2008

Utgivare
STATSRÅDETS KANSLI

PRESENTATIONSBLAD
25.8.2008

Författare

Ilkka Savolainen, Sampo Soimakallio, Tomi Lindroos och Sanna Syri; VTT

Typ av publikation

Bakgrundspublikation till framtidsredogörelsen om energi- och klimatpolitiken

Uppdragsgivare

Statsrådets kansli

Diarienummer

Dnr: 1767/23/2007

Publikationens namn

Kahden asteen ilmastotavoite – mitä riskejä vältetään, miten paljon päästöjä tulee vähentää
Klimatmålet på två grader – vilka risker ska undvikas, hur mycket ska utsläppen minska
Redogörelse för Vanhanens andra regerings framtidsredogörelse

Referat

Redogörelsen lägger fram grunderna för EU:s två graders temperaturmål och dess betydelse för utsläppsmålen. Genom att begränsa förhöjningen av jordens medeltemperatur till två grader jämfört med den förindustriella tiden kan man i betydande utsträckning begränsa de skadeverkningar som följer av klimatförändringen, jämfört med en situation där temperaturstegringen klart skulle överstiga en nivå på två grader.

En förutsättning för att mängden växthusgaser i atmosfären ska stabiliseras är att utsläppen börjar minska. Ju lägre stabiliseringsnivån är, desto tidigare och snabbare borde utsläppen börja minska. De val som görs under de följande två eller tre decennierna kommer att ha en stor betydelse för vilka möjligheter man har att nå låga utsläppsnivåer.

Redogörelsen bedömer att det är möjligt att nå det s.k. två graders målet om klimatets sårbarhet inte är särskilt stor och utsläppen styrs effektivt. Genom en utveckling av tekniken kan man påverka uppnåendet av målet och dess kostnader.

Nyckelord

framtidsredogörelsen, klimatförändringen, klimatmålet, utsläppsmål

Publikationsseriens namn och nummer

Statsrådets kanslis publikationsserie 13/2008

ISSN

0782-6028

ISBN (tryck)

978-952-5631-77-7

Sidantal

66

Språk

Finska

Sekretessgrad

Offentlig

ISBN (PDF)

978-952-5631-78-4

Förläggare

Statsrådets kansli
Publikationen som PDF: www.vnk.fi/julkaisut
Ytterligare information: julkaisut@vnk.fi

Layout

Statsrådets kansli/enheten för politikanalys

Distribution och försäljning

Universitetstryckeriet, Helsingfors
www.yliopistopaino.fi/kirjamyynni
Beställningar: books@yliopistopaino.fi

Tryckort

Universitetstryckeriet, Helsingfors, 2008

Sisällys

ESIPUHE	7
TIIVISTELMÄ.....	8
1 JOHDANTO	12
2 MITÄ RISKEJÄ VOIDAAN PIENENTÄÄ, KUN MAAPALLON KESKILÄMPÖTILAN NOUSU RAJOITETAAN KAHTEN ASTEESEEN	14
2.1 Ilmaston muuttuminen ihmisen toiminnan seurauksena	14
2.2 Peruuttamattomat muutokset	19
2.3 Vaikutukset Suomeen	19
2.4 Kahden asteen rajoitteen vaikutus riskien pienenemiseen	21
3 LÄMPÖTILATAVOITTEEN SAAVUTTAMINEN	23
3.1 Luonnon järjestelmän ja sosioekonomisen järjestelmän kytkeytyminen toisiinsa	23
3.2 Kasvihuonekaasujen pitoisuuden lisääntyminen ja pitkän aikavälin lämpötilan nousu.....	27
3.3 Hiilen kierron muuttumisen vaikutusarviot ja epävarmuudet	30
3.4 Ilmaston herkkyyden vaikutus lämpötilatavoitteen saavuttamiseen.....	32
3.5 Päästöjen rajoittamisen kehityspolut, kustannukset ja ohjauskeinot.....	36
4 PÄÄSTÖJEN, PITOISUUKSIEN JA SÄTEILYPAKOTTEEN KEHITYS VIIME VUOSINA	39
5 MINKÄLAISIA SUOMEN PÄÄSTÖTAVOITTEITA KAHDEN ASTEEN TAVOITE VASTAA	48
5.1 Yleistä velvoitteenjaosta ja sen periaatteista.....	48
5.2 Esimerkkejä velvoitteenjakoperiaatteista	51
5.3 Esimerkkejä Suomen päästövähennystavoitteista	55
6 VIITTEET	59

ESIPUHE

Matti Vanhasen II hallitus on ohjelmassaan sitoutunut kantamaan vahvan vastuun ilmastonmuutoksen hillitsemisestä. Ilmasto- ja energiapoliittisessa tulevaisuusselonteossa haetaan keinoja nostaa Suomi ilmastonsuojelun edelläkävijäksi.

Euroopan unioni asetti vuonna 1996 tavoitteeksi rajoittaa maailman lämpeneminen enintään kahteen asteeseen esiteolliseen aikaan verrattuna. Suomi on ollut EU:ssa toistuvasti mukana vahvistamassa tavoitetta, mutta tietoisuus sen merkityksestä on jäänyt kotimaisessa keskustelussa vähäiseksi.

Tämä VTT:n selvitys arvioi kahden asteen tavoitteen perusteita ja edellytyksiä. Siitä käy ilmi, että tavoitteen saavuttaminen vähentäisi merkittävästi ilmastonmuutoksen haittoja. Kahden asteen rajassa pysyminen myös pienentäisi riskiä käynnistää ilmastojärjestelmässä peruuttamattomia ja mahdollisesti katastrofaalisia muutoksia. Niitä tarkastellaan erikseen toisessa valtioneuvoston kanslian tilaamassa selvityksessä.

VTT:n selvitys osoittaa, että kahden asteen tavoite on mahdollista saavuttaa tietyin ehdoin. Mitä alhaisemmalle tasolle kasvihuonekaasujen pitoisuudet ilmakehässä saadaan tasattua, sitä todennäköisemmin lämpeneminen pysyy alle riskirajan. Ilmastojärjestelmän herkkyydestä ja kansainvälisestä velvoitteenjaosta riippuen Suomen tulisi vähentää päästöjä vuoden 1990 tasosta 60–85 % tai jopa enemmän vuoteen 2050 mennessä.

Selvityksen tuloksia hyödynnetään tulevaisuusselonteon valmistelussa tarkasteltaessa, millaisiin pitkän aikavälin ilmastotavoitteisiin Suomessa tulisi varautua. Selonteko linjaa ilmasto- ja energiapolitiikkaa vuosisadan puoliväliin asti ja yli, kattaa ilmastonmuutoksen torjunnan lisäksi sen vaikutuksiin sopeutumisen sekä tarkastelee Suomen lisäksi globaalia toimintaympäristöä.

Toivomme, että selvitys auttaa ymmärtämään kahden asteen tavoitteen perusteita ja hahmottamaan sen edellyttämiä päästövähennyksiä meillä ja muualla. Kiitämme VTT:tä ilmastopoliittisen keskustelun kannalta ratkaisevan käsitteen avaamisesta.

Elokuussa 2008

Oras Tynkkynen
ilmastopoliittinen asiantuntija
valtioneuvoston kanslia

TIIVISTELMÄ

YK:n ilmastositomuksen UNFCCC perimmäinen tavoite on vakauttaa ilmakehän kasvihuonekaasujen pitoisuudet vaarattomalle tasolle (Artikla 2). Euroopan unioni eräässä mielessä täydentää ja konkretisoi sopimusta, kun se on ehdottanut, että maapallon keskilämpötilan nousu rajoitetaan kahteen asteeseen esitelliseen aikaan nähden. Tavoitteena on rajoittaa ilmastomuutoksesta aiheutuvia haittoja, kuten kuivuutta, rankkasateita, lämpöaaltoja ja vaikutuksia ekosysteemeihin, veden saatavuuteen, ravinnon tuotantoon ja terveyteen. Haittoille altistuvat voimakkaimmin useat kehitysmaat, joissa myös kyky ja mahdollisuudet sopeutua haittoihin ovat puutteelliset. Myös EU:n alueella haitat voivat olla merkittäviä.

Monien haittojen kohdalla ei ole mitään selvää kynnysarvoa. Tällaisten haittojen kohdalla jokin haittataso voidaan kuitenkin arvioida ei-hyväksyttäväksi. Joillekin toisille haittoille voidaan arvioida kynnysarvo, jonka yläpuolella haitta tai vaikutus ilmenee. Kun lämpötila nousee tietyn rajan yli, voi myös käynnistyä peruuttamattomia muutoksia. Näillä voi olla tavattoman suuria vaikutuksia, ja niihin sopeutuminen voi olla hyvin vaikeaa. Tulevaisuusselonteon taustaselvitys (Pimenoff et al. 2008) käsittelee näitä muutoksia ja niiden toteutumisen mahdollisuuksia. Koska ilmaston muuttuminen on aluekohtaista, useat vaikutukset ja mahdolliset kynnysarvot ovat paremminkin alueellisia kuin globaaleja. Yksittäisten kynnysarvojen määrittämiseen liittyy usein huomattavia tieteellisiä epävarmuuksia, mutta kokonaiskuvasta on esitetty yhteenvetoja mm. hallitusten välisen ilmastopaneelin IPCC:n (IPCC WG2 2007) ja Sternin (2006) raporteissa. Jos maapallon keskilämpötilan nousu rajoitetaan kahteen asteeseen, samalla saavutetaan monien merkittävien vaikutusten väheneminen ja mahdollisesti ehkäistään suuria peruuttamattomia muutoksia.

Jos maapallon keskilämpötilan nousu rajoitetaan kahteen asteeseen, pienennetään riskiä merkittävistä geofysikaalisista muutoksista kuten mannerjään sulamisesta ja Pohjois-Atlantin kiertoliikkeen hidastumisesta (IPCC WG3 s. 230). Edelleen lämpötilan nousun rajoittuminen vähentäisi huomattavasti sukupuuttoon joutuvien eliölajien määrää ja rajoittaisi maaekosysteemien muuttumista hiilidioksidin lähteeksi. Yhteiskuntien kannalta merkittävää olisi mm. veden saantiin, kuivuuteen ja tulviin liittyvien riskien pieneminen sekä ravinnon tuotannon riittävyyteen liittyvien riskien väheneminen. Tällaisten riskien vähenemisellä olisi myös merkittäviä vaikutuksia talouteen. Monien kehittyvien maiden yhteiskunnissa, joissa sopeutumiskyky on pieni, myös mitä ilmeisimmin kriisiherkkyys ja paineet poliittisiin konflikteihin vähenisivät. Sopeutumisesta edistämällä voidaan edelleen pienentää haittoja, jotka johtuvat ilmaston muuttumisesta.

Pohjoisella napa-alueella maapallon keskilämpötilan kahden asteen rajoite merkitsisi kuitenkin luokkaa neljän asteen lämpötilan nousua ja Suomessakin kolmen-neljän asteen nousua. Perusteluja olisi siis myös alemmalle kuin kahden asteen lämpötilarajoitteelle. Tällöin kuitenkin päästöjen rajoittamiselle tulisi vielä ankarammat tavoitteet kuin kahden asteen tapauksessa, ja yhteisymmärryksen ja yhteisen näkemyksen löytäminen ilmastoneuvotteluissa olisi vielä nykyistäkin hankalampaa.

Jos käytetään ilmaston herkkyydestä IPCC:n esittämää ns. parasta arviota: 3 astetta, vastaa kahden asteen tasapainolämpötilaa noin 450 ppm¹CO₂-ekvivalenttipitoisuustaso². Jos otetaan huomioon IPCC:n esittämä todennäköinen ilmaston herkkyyden alue 2–4,5 °C, vastaa kahta astetta 370–540 ppmCO₂-ekvivalenttipitoisuustasojen alue. Toisaalta lämpeneminen pienentänee hiilidioksidin nettosiirtymistä ilmakehästä maaekosysteemeihin ja mereen (ns. hiilinielua), mikä vaikeuttaa pitoisuustavoitteen saavuttamista.

Ilmakehän kasvihuonekaasujen pitoisuuksien vakauttamisen edellytyksenä on päästöjen kasvun kääntyminen laskuun. Mitä alhaisempi vakautustaso, sitä aikaisemmin ja jyrkemmin päästöjen tulisi vähentyä. Kahden asteen tavoite merkitsee IPCC:n skenaarioiden mukaan (IPCC WG3 2007) sitä, että maailman päästöjen tulee kääntyä laskuun ennen vuotta 2015. Seuraavien kahden tai kolmen vuosikymmenen aikana tehtävillä hillintätoimilla tulee olemaan suuri vaikutus mahdollisuuksiin saavuttaa alhaisia pitoisuustasoja.

Ilmakehän alhaisia kasvihuonekaasujen pitoisuustasoja voidaan saavuttaa käyttämällä niitä teknologioita, jotka ovat tällä hetkellä saatavilla tai joiden oletetaan kaupallistuvan tulevien vuosikymmenten aikana. Tällöin kuitenkin tarvitaan tehokkaita kannustimia teknologioiden kehitykseen, hankintaan sekä käyttöönottoon. Energiatehokkuuden parantamisella on tärkeä osuus päästöjen vähentämisessä. Kulutuksen muuttumisella energian käyttöä ja päästöjä vähentävään suuntaan on suuri merkitys päästöjen pienentämisessä. Lisäksi merkittäviä keinoja ovat uusiutuvan energian ja ydinvoiman lisääminen, hiilidioksidin erotus ja varastointi, metaani- ja typpioksiduulipäästöjen vähentäminen sekä metsäkadon vähentäminen ja ekosysteemien hiilivaraston lisääminen.

Vuonna 2050 globaalit keskimääräiset makrotaloudelliset kustannukset useiden kaasujen hillinnästä kohti pitoisuuksien vakautustasoa, joka vastaa kahden asteen lämpenemisrajoitetta (kun oletetaan ilmaston herkkyydeksi IPCC:n esittämä ns. paras arvio), olisivat suurimmillaan 5,5 % globaalista BKT:stä. BKT:n vuosittaisessa kasvussa tämä merkitsisi luokkaa 0,12 prosenttiyksikön alenemaa

¹ ppm: parts per million, ilmaisee kuinka monta miljoonasosaa tilavuudesta ilmassa on hiilidioksidia.

² CO₂-ekvivalenttipitoisuudessa otetaan huomioon myös muiden kasvihuonekaasujen kuin hiilidioksidin aiheuttama säteilypakote.

(vuosittainen kasvu kehittyneissä maissa on tyypillisesti 2–3 %:n luokkaa). Monien sektoreiden ja maiden kohdalla kustannukset poikkeavat selvästi globaalisti keskiarvosta. Päästöjen rajoituksen toteuttaminen vaatii monenlaisia ohjauskeinoja.

Vaarana on, että viivästyneet päästöjen vähennykset johtavat investointeihin, jotka lukitsevat yhteiskunnan päästöintensiiviseen infrastruktuuriin ja kehityspolkuihin. Tämä rajoittaa merkittävästi mahdollisuuksia saavuttaa alhaisia ilmakehän pitoisuuden vakautustasoa sekä nostaa riskiä peruuttamattomista ilmastomuutoksen vaikutuksista. Ilmastomuutokseen liittyvät vastatoimet ja kestävä kehitys ovat suureksi osaksi synergistisiä.

Kasvihuonekaasujen päästöt ovat viime vuosina kasvaneet jopa nopeammin kuin esimerkiksi on oletettu IPCC:n suurimmat päästöt aiheuttavissa SRES-skenarioissa. Tämä aiheutuu pitkälti mm. voimakkaasti kehittyvien maiden sähköntuotanto- ja liikennesektorien kasvusta. Vastaavasti erityisesti ilmakehän hiilidioksidipitoisuus kasvaa voimakkaasti, noin 2 ppm vuodessa. Metaanipitoisuus, joka oli vakautunut noin kymmeneksi vuodeksi teollisuusmaiden päästönvähennysten takia, on alkanut kasvaa uudestaan. Syynä on mahdollisesti, että teollisuusmaiden metaanipäästöjen väheneminen on jäänyt aivan viime vuosina pienemmäksi kuin kehitysmaiden metaanipäästöjen kasvu. Syynä voi olla myös luonnon päästöjen kasvu lämpenemisen seurauksena. Säteilypakote on myös voimakkaassa kasvussa. Nykyinen ilmakehän pitkäikäisten kasvihuonekaasujen pitoisuus on ylittänyt kahden asteen tasapainolämpötilan nousua vastaavan tason, jos oletetaan ilmaston herkkyydeksi IPCC:n paras arvio. Tämän vuoksi tarvitaan nopeita päästöjen rajoituksia, jottei lämpötilan nousu ehdi toteutua.

Päästörajoitusvelvoitteiden kohdistaminen eri maille ja maaryhmille, ns. velvoitteenjako, voidaan suorittaa periaatteessa kahdella eri lähestymistavalla: joko neuvottelemalla eri maiden tai maaryhmien esittämien tavoitteiden pohjalta tai käyttämällä systemaattista menettelyä eri maiden tavoitteiden asettamisessa. Käytännössä tullaan todennäköisesti käyttämään näiden yhdistelmää.

Velvoitteenjaossa käytettävän tiedon tulisi olla luotettavuudeltaan yleisesti hyväksyttävää ja kriittisen käsittelyn kestävästi läpinäkyvää. Tämä taas on helposti ristiriidassa monimutkaisen ratkaisun vaativien velvoitteenjakoperiaatteiden läskennän kanssa. Monimutkaisilla tarkasteluilla taas on helpompi ottaa huomioon maakohtaisia erityispiirteitä, mutta mm. lähtöarvojen objektiivinen kokoaminen eri maista voi olla hyvin vaikeaa.

Esimerkkinä tarkastellussa 450 ppmCO₂ -pitoisuuden vakautusskenaariossa ja useilla velvoitteenjakomenetelmillä EU25-maiden yhteinen tavoite päästöjen vähennyksestä on velvoitteenjakomenetelmästä ja talouden kehitysennusteesta riippuen vuodelle 2020 välillä -17 %...-34 % ja vuodelle 2050 välillä -70 %...-85

% vuoteen 1990 verrattuna. Suomen tavoite vastaavassa tarkastelussa vuodelle 2050 olisi -60 %...-85 % vuoteen 1990 verrattuna. Euroopan parlamentti on ehdottanut EU:n tavoitteeksi -30 % vuonna 2020 ja -60...-80 % vuonna 2050. Välitavoitteenaan EU sitoutuu vähentämään yksipuolisesti päästöjään 20 % vuoteen 2020 mennessä vuoteen 1990 verrattuna, kunnes saadaan aikaiseksi kansainvälinen ilmastositopimus, jossa muutkin teollisuusmaat sitoutuvat ottamaan vastaavansuuruisia päästövähennystavoitteita. IPCC esittää 450 ppmCO₂-ekvivalenttipitoisuustasoon pyrittäessä teollisuusmaille -80 %...-95 %:n päästötavoitteen vuodelle 2050 vuoteen 1990 verrattuna. Suomen tavoite on veloitteenjakomenetelmästä ja valituista laskentaparametreista riippuen todennäköisesti joko hieman tiukempi tai hieman löysempi kuin EU:n tavoite.

Mitkään edellä esitetyistä taakanjakotarkasteluista eivät ota suoranaisesti huomioon energiantensiivisten tuotteiden vientiä ja tuontia. Kulutusperusteisten päästöjen luotettava arviointi on tiedon ja aukottomien menetelmien puutteen vuoksi kuitenkin hankalaa.

Päätöksenteko sopivasta maailmanlaajuisesta päästöjen hillinnän tasosta on iteratiivinen riskienhallintaprosessi. Tässä prosessissa tulee ottaa huomioon hillintä ja sopeutuminen, toteutuvat ja vältettävät ilmastomuutoksen aiheuttamat haitat sekä sivuhyödyt, kestävyys, maiden ja ihmisten välinen oikeudenmukaisuus sekä suhtautuminen riskeihin. Kahden asteen tavoite voidaan nähdä poliittisena ehdotuksena, jolla pyritään rajoittamaan ilmastomuutoksen haittoja.

Voidaan arvioida, että kahden asteen saavuttaminen on mahdollista, jos ilmaston herkkyyks ei ole kovin suuri ja jos päästöjen ohjaus on tehokasta. Teknologian kehittämisellä voidaan vaikuttaa tavoitteen toteutumiseen ja aiheutuviin kustannuksiin. Koska kyse on hyvin pitkistä aikajänneistä, ehdotusta kahden asteen tavoitteesta voidaan täsmentää ja muuttaa, kun saadaan uutta tieteellistä tietoa ilmastomuutoksen etenemisestä, aiheutuvista haitoista, ilmaston herkkyydestä sekä maailman talouden ja teknologian kehityksestä, ja kun ihmisten, yritysten ja hallitusten valmius rajoittaa päästöjä muuttuu.

1 JOHDANTO

YK:n ilmastopöytäkirjan (UNFCCC) perimmäinen tavoite on vakauttaa ilmakehän kasvihuonekaasujen pitoisuudet vaarattomalle tasolle (Artikla 2). Ilmastopöytäkirja ei kuitenkaan anna lukuarvoja tavoitepitoisuuksille. Kasvihuonekaasujen kohoamassa olevat pitoisuudet lämmittävät maapalloa.

Euroopan unioni eräissä mielessä täydentää ja konkretisoi ilmastopöytäkirjasta, kun se on ehdottanut, että maapallon keskilämpötilan nousu rajoitetaan kahteen asteeseen esiteolliseen aikaan nähden. Ehdotuksen tavoitteena on rajoittaa ilmastomuutoksesta aiheutuvia haittoja, kuten kuivuutta, rankkasateita, lämpöaaltoja ja vaikutuksia ekosysteemeihin, vesihuoltoon, ravinnontuotantoon ja terveyteen. Haittoille altistuvat voimakkaimmin useat kehitysmaat, joissa myös kyky ja mahdollisuudet sopeutua haittoihin ovat puutteelliset. Myös EU:n alueella haitat voivat olla merkittäviä.

Lämpötilan nousun rajoittaminen kahteen asteeseen valittiin EU:ssa tavoitteeksi jo vuonna 1996. Myöhemmin tavoite on vahvistettu EU:n ympäristöneuvostossa 2003 ja Eurooppa-neuvostossa 2005 ja 2007.

Nykyinen ilmakehän pitkäikäisten kasvihuonekaasujen pitoisuus on jo noussut tasolle, joka vähitellen nostaisi maapallon keskilämpötilaa kahdella asteella. Pitkäikäisiä kasvihuonekaasuja ovat Kioton pöytäkirjan kattamat kaasut, hiilidioksidi (CO_2), metaani (CH_4), dityppioksidi (N_2O) ja ns. F-kaasut sekä Montrealin pöytäkirjan kaasut (mm. CFC:t), joilla on myös lämpötilaa nostava vaikutus. Lämpötilan nousua rajoittavat ihmisen toimista ilmakehään tulevat hiukkaspäästöt, jotka pienentävät säteilypakotetta lisäämällä auringosta tulevan säteilyenergian heijastumista.

Monet tekijät hidastavat niiden toimien vaikutusta, joilla pyritään rajoittamaan lämpötilan nousua. Sosioekonomisten järjestelmien muuttuminen on hidasta mm., koska monien investointien käyttöajat ovat pitkiä ja koska toimintatavat muuttuvat hitaasti. Kasvihuonekaasujen poistuminen ilmakehästä tapahtuu hitaasti. Maapallon, erityisesti valtamerien, lämpökapasiteetti on suuri, mikä hidastaa lämpenemistä, mutta jarruttaa myös toimien vaikutusta lämpenemisen hillintään. Hitaustekijöiden takia päästörajoitustoimet tulisi aloittaa nopeasti, jotta nykyinen lämpenemiskehitys saadaan pysäyttämään alhaiselle tasolle.

Tietämys ilmastomuutoksen fysikaalisista mekanismeista on vuosien kuluessa tarkentunut, mutta useat lämpenemiseen vaikuttavat seikat tunnetaan silti puutteellisesti. Säteilypakotteen ja lämpenemisen välinen riippuvuus, ns. ilmaston herkkyys, on yksi näistä. Ihmisen toiminnasta seuraavien hiukkasten vaikutus säteilypakotteeseen tunnetaan myös varsin epätarkasti.

Sosioekonomisen järjestelmän kehitystäkään, mukaan lukien teknologian kehitys, ei pystytä arvioimaan kovinkaan hyvin pitkällä aikavälillä. Näin päästöjen kehitys ja ohjaavien toimien vaikutus niihin on arvioitavissa vain puutteellisesti. Maankäyttö on osa sosioekonomista järjestelmää. Maankäytön päästöt ja nielut ovat merkittäviä, ja niihin vaikuttavat monet kehityspaineet kuten ilmaston muuttuminen.

Eri tekijöistä johtuvaa epävarmuutta voidaan rajoittaa ennakoivilla riskiä pienentävillä toimilla. Ohjaavat toimet voidaan nähdä myös iteratiivisena riskien hallintana, jossa tiedon lisääntyessä toimia ja mahdollisesti myös tavoitteita arvioidaan uudelleen. Koska ilmastonmuutoksen riskit ja vaikutukset voivat olla tavattoman suuria, on perusteltua tehdä voimakkaita päästöjen hillintätoimia, vaikka ilmaston muuttumiseen liittyy heikosti tunnettuja seikkoja.

Ilmastonmuutoksen hillintä ja kasvihuonekaasujen päästöjen rajoittaminen vaatii yhteistyötä kaikkien merkittävien päästöjä aiheuttavien maiden kesken. Maat ovat hyvin erilaisessa asemassa henkisten ja taloudellisten voimavarojen sekä teknologian suhteen. Päästönrajoituksista sopiminen vaatii tällöin sitä, että pystytään ottamaan huomioon eri osapuolten tarpeet ja mahdollisuudet. Päästöjen rajoittamisen velvollisuudet tulevaisuuden sopimuksissa jakaantuvat siten tuskin tasan päästönvähennysprosentteilla mitattuna.

Tämä selvitys esittelee EU:n tavoitteen perusteita ja sen merkitystä päästönvähennystavoitteille. Työn tavoitteena on kuvata, mitä riskejä voidaan lieventää EU:n ehdottamalla tavoitteella rajoittaa maapallon keskilämpötilan nousu kahteen asteeseen ja mitä säteilypakote- ja ekvivalenttipitoisuustasoa tämä tavoite vastaisi. Mallilaskujen avulla voidaan arvioida päästöjen vähentämisen tarve. Erilaisilla periaatteellisilla oletuksilla päästönvähennysvelvoitteiden jaosta saadaan arvioita Suomen kansalliselle päästötavoitteelle.

Selvitys on katsaus olemassa olevaan aineistoon, minkä lisäksi päästönrajoituksen velvoitteiden analyysia on laajennettu aikaisemmin tehdystä tutkimuksesta.

2 MITÄ RISKEJÄ VOIDAAN PIENENTÄÄ, KUN MAAPALLON KESKILÄMPÖTILAN NOUSU RAJOITETAAN KAHTeen ASTEESEEN

2.1 Ilmaston muuttuminen ihmisen toiminnan seurauksena

Maailmanlaajuiset kasvihuonekaasupäästöt jatkavat kasvuaan tämänhetkisillä ilmastomuutoksen hillintätoimilla ja niihin liittyvillä kestävä kehityksen käytännöllä seuraavien vuosikymmenten ajan (IPCC WG3 2007). SRES-skenaariot (IPCC 2000) ennustavat globaalien kasvihuonekaasupäästöjen kasvavan 25–90 % (CO₂-ekv.) aikavälillä 2000–2030 (Kuva 2.1). Näissä skenaarioissa fossiilisten polttoaineiden on ennustettu säilyttävän määräävän aseman maailman energiantuotannon rakenteessa vuoteen 2030 ja siitäkin eteenpäin. Tulokset ovat samansuuntaisia myös uusimmissa skenaarioissa.³ (ns. Post-SRES-skenaariot, ks. IPCC WG3 2007)

Jos kasvihuonekaasujen päästöt jatkuvat nykytasolla tai sen yläpuolella, lämpeneminen kiihtyy. Tästä seuraa monia ilmastojärjestelmän muutoksia, jotka ovat tällä vuosisadalla hyvin todennäköisesti suurempia kuin viime vuosisadalla havaitut muutokset.

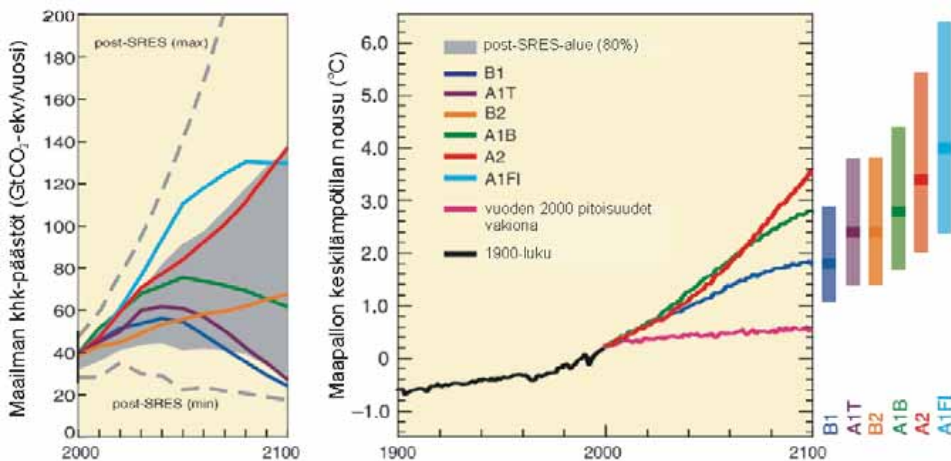
SRES-skenaariot ennakoivat ilmaston lämpenevän seuraavan kahden vuosikymmenen aikana noin 0,2 °C vuosikymmenessä. Vaikka kaikkien kasvihuonekaasujen ja aerosolien pitoisuudet olisi vakautettu vuoden 2000 tasolle, ilmasto lämpenisi noin 0,1 °C vuosikymmentä kohti. Vuoden 2030 jälkeen lämpenemisennuste riippuu yhä selvemmin päästöskenaarion valinnasta. Pitkällä aikavälillä maaekosysteemien ja valtamerten CO₂-sidonta pienenee lämpenemisen myötä, jolloin ilmakehään päätyvien ihmisperäisten päästöjen osuus kasvaa.

³ Luku 2 on osaksi lähes suora lainausta Esko Kuusiston käännöksestä viitteestä (IPCC SYR 2007).

Kuva 2.1 Kasvihuonekaasujen päästöskenaariot aikavälille 2000–2100 (ilman ilmastopoliittisia lisätoimia) ja vastaavat lämpötilan kehityskulut.

Vasen osio: Globaalit kasvihuonekaasupäästöt (CO_2 -ekv.), jos ilmastopoliittisia toimia ei tehdä. Kuusi SRES-skenaariota (värilliset viivat) ja niiden jälkeen julkaistujen post-SRES-skenaarioiden 80 % vaihteluväli (harmaa varjostus; koko post-SRES vaihteluväli harmain katkoviivoin). Päästöihin sisältyvät CO_2 , CH_4 , N_2O ja F-kaasut.

Oikea osio: Yhtenäiset viivat esittävät lämpenemisen skenaarioille A2, A1B ja B1 useiden eri mallien keskiarvoina, jatkeena viime vuosisadalla havaitulle lämpenemiselle. Nämä kehityskulut sisältävät myös lyhytaikaisten kasvihuonekaasujen ja aerosolien vaikutukset. Vaaleanpunainen viiva ei ole skenaario, vaan valtameri-ilmastomallien antama tulos, kun ilmakehän khk-pitoisuudet on vakautettu vuoden 2000 tasolle. Kuvan oikean reunan pystypalkit osoittavat parhaan arvion (tummemmat palkkien poikkiviivat) sekä kuuden SRES-skenaarion todennäköisen vaihteluvälin jaksolle 2090–2099. Kaikki lämpötilat on esitetty suhteessa jaksoon 1980–1999.

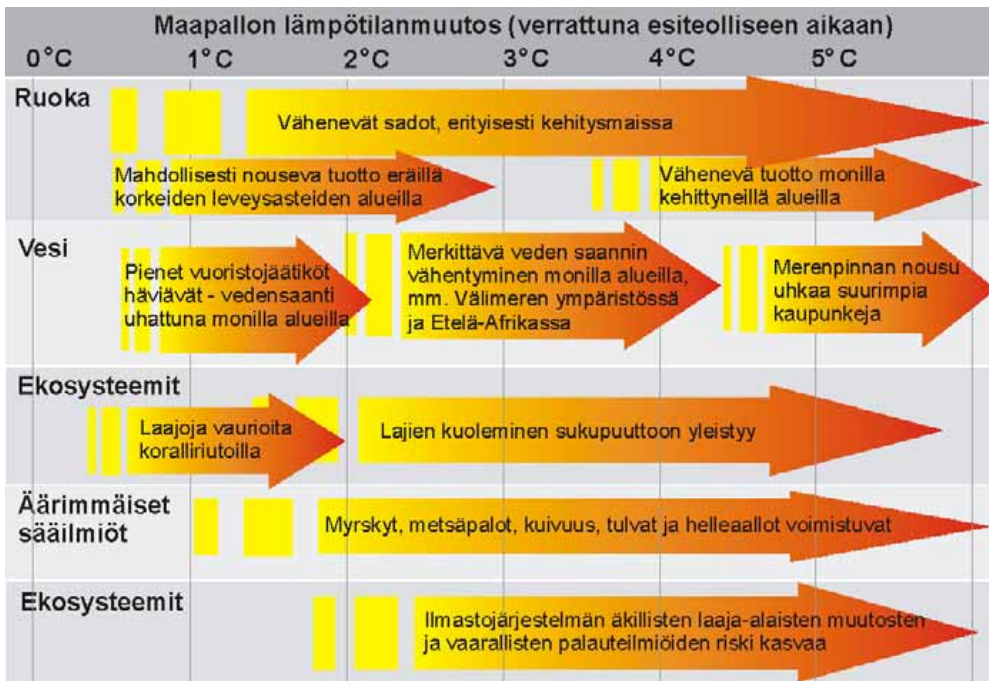


Ilmaston arvioidaan muuttuvan eri alueilla eri tavoin mm. maan ja meren jakautumisen, leveysasteen sekä meri- ja ilmapvirtausten takia. Alueellisia muutoksia ovat (IPCC SYR 2007)

- Lämpötilojen odotetaan nousevan eniten maa-alueilla ja erityisesti pohjoisen pallonpuoliskon korkeilla leveysasteilla, vähiten eteläisillä valtamerillä ja Atlantin pohjoisosissa, havaittuja viimeaikaista trendejä noudatellen.
- Lumipeitteisen alueen havaittu pieneneminen jatkuu, samoin ikeiroudan sulavan pintakerroksen paksuuntuminen ja merijään kutistuminen. Eräissä SRES-skenaarioiden mukaisissa ennakkoinneissa Pohjoisen jäämeren jääpeite sulaa tämän vuosisadan jälkipuoliskolla kesäisin lähes kokonaan.
- Hyvin korkeat lämpötilat, helleaallot ja rankat sateet yleistyvät suurella todennäköisyydellä

- Trooppiset hirmumyrskyt todennäköisesti voimistuvat; niiden lukumäärä näyttäisi pienenevän, joskin tämä tulos on aika epävarma
- Ei-trooppisten myrskyjen reitit siirtyvät napoja kohti, jolloin tuuli- ja lämpöolot vastaavasti muuttuvat
- Sademäärät tulevat hyvin todennäköisesti kasvamaan korkeilla leveysasteilla, kun taas subtrooppisilla manteralueilla ne todennäköisesti pienenevät. Nämä muutokset vastaavat viimeaikaisia trendejä.

Kuva 2.2 Ilmastonmuutoksen vaikutuksia lämpötilan noustessa. Kun lämpötilan nousu ylittää kaksi astetta, veden saatavuus, sukupuutot ja peruuttamattomien muutosten riski kasvaa (Stern 2006). Viitteessä Pimenoff et al. (2008) kuvataan tarkemmin kuvan alimmassa osassa esitetyjä laaja-alaisia ja epälineaarisia muutoksia. Jos maapallon keskilämpötilan nousu jää alle kahden asteen, voidaan näitä vaikutuksia vähentää tai muutosten riskiä pienentää.



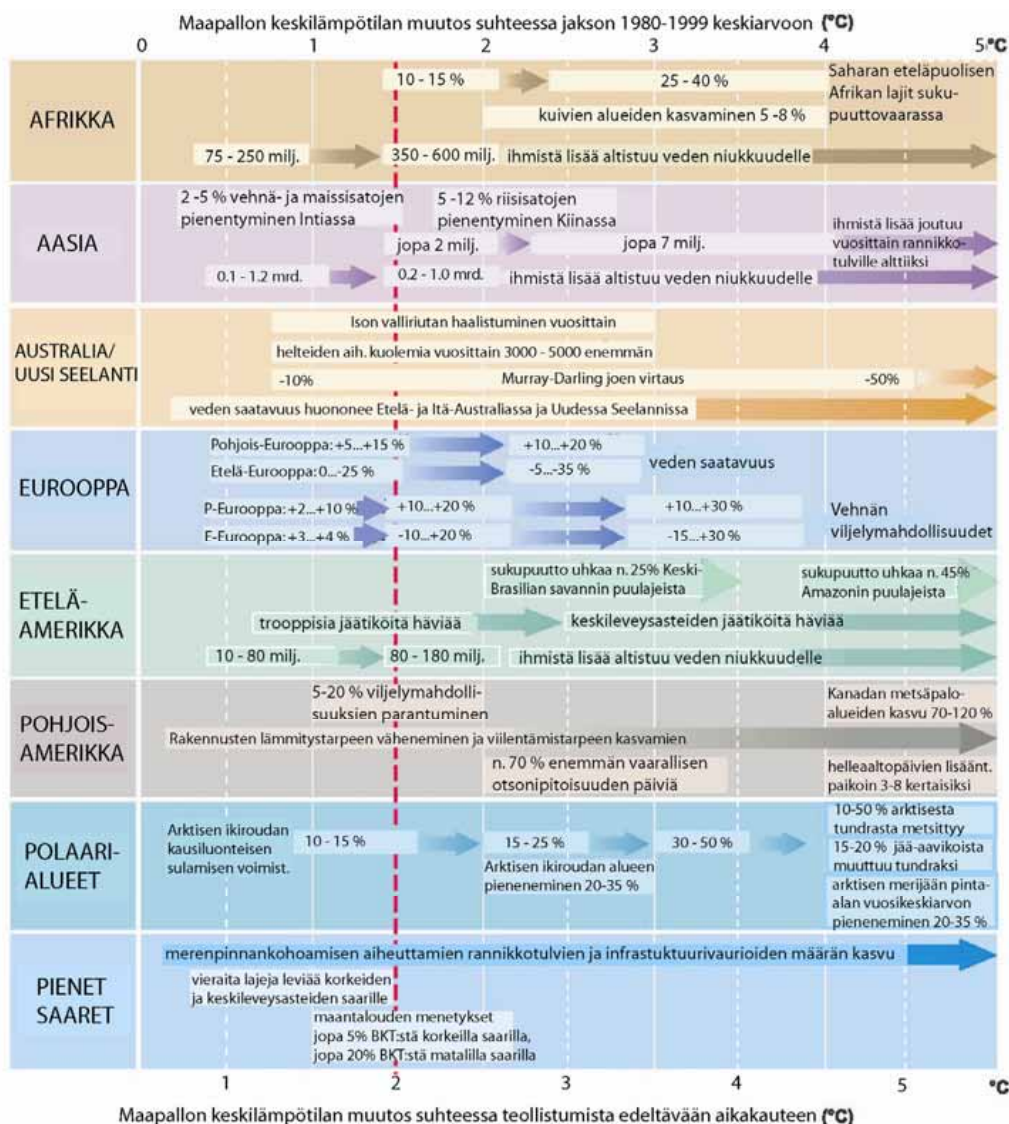
Vuosisadan puoliväliin mennessä jokien keskivirtaamien ja veden saatavuuden ennakoita suurella luotettavuudella lisääntyvän korkeilla leveysasteilla ja paikoin kosteassa tropiikissa, mutta vähenevän eräillä keskileveysasteiden ja tropiikin kuivilla alueilla. Suurella luotettavuudella voidaan myös ennakoita, että monet puolikuivat alueet (esim. Välimeren seutu, Yhdysvaltain länsiosat, eteläinen Afrikka ja Koillis-Brasilia) tulevat kärsimään ilmastomuutoksen aiheuttamasta vesivarojen vähenemisestä. Esimerkkejä ennakoituista muutoksista alueittain on esitetty kuvassa 2.3.

Eräät järjestelmät, sektorit ja alueet ovat todennäköisesti erityisen herkkiä ilmastomuutokselle. Tällaisia ovat:

- tietyt ekosysteemit:
 - maa-alueet: tundra, havumetsät ja vuoristoalueet, jotka ovat herkkiä lämpenemiselle; välimerentyypin ekosysteemit, koska sademäärä pienenee; trooppiset sademetsät, samoin pienenevän sademäärän takia
 - rannikot: mangrovet ja suolaisen veden kosteikot, joihin kohdistuu monia paineita
 - meriekosysteemit: koralliriutat monien paineiden takia; merijään ekosysteemi, koska se on herkkä lämpenemiselle
- vesivarat joillakin keskileveysasteiden ja tropiikin kuivilla alueilla, koska sadanta ja haihdunta muuttuvat, samoin lumen ja jään sulamisesta riippuvat alueet
- maatalous matalilla leveysasteilla, koska veden saatavuus vaikeutuu
- alavien rannikoiden järjestelmät, joita uhkaa merenpinnan nousu sekä sään ääri-ilmiöiden kasvava riski
- ihmisen terveys yhteisöissä, joiden sopeutumiskyky on alhainen.

Herkkiä alueita ilmastomuutokselle ovat esimerkiksi arktinen alue, jossa ennakoitu voimakas lämpeneminen vaikuttaa luontoon ja ihmisyhteisöihin. Afrikka on herkkä, koska siellä on matala sopeutumiskyky ja koska ilmastomuutoksen ennakoita aiheuttavan siellä paljon kielteisiä vaikutuksia. Edelleen herkkiä haitoille ovat pienet saarivaltiot, joissa väestö ja infrastruktuuri ovat erityisen alttiit ilmastomuutoksen vaikutuksille. Aasian ja Afrikan megadeltat ovat väkittä ja hyvin alttiita merenpinnan nousulle, hyökyaalloille ja jokitulville.

Kuva 2.3 Esimerkkejä ennakoitujen ilmastonmuutosten (ja soveltuvin osin merenpinnan ja ilmakehän CO₂-pitoisuuksien muutosten) alueittaisista vaikutuksista tällä vuosisadalla. Kuvan alareunan asteikko esittää lämpötilan muutosta suhteessa esiteolliseen aikaan. Punainen pystykatkoviiva esittää EU:n kahden asteen tavoitteen sijoittumista suhteessa vaikutuksiin. Esimerkit on sijoitettu niin, että tekstin vasen reuna osoittaa vaikutuksen likimääräisen käynnistymisen. Sopeutumistoimien vaikutuksia ei ole otettu huomioon. Rajoittamalla maapallon keskilämpötilan nousu kahteen asteeseen voidaan vähentää huomattavasti ilmaston muuttumisesta seuraavia haittoja ja riskejä (IPCC WG2 2007).



2.2 Peruuttamattomat muutokset

Grönlannin mannerjään supistumisen ennakoitu jatkuminen nostaa merenpintaa vuoden 2100 jälkeen. Nykyisten mallien mukaan tämä jäämassa sulaa käytännössä kokonaan ja aiheuttaa merenpinnan 7 metrin suuruisen nousun, jos maapallon keskilämpötila pysyttelee vuosituhanten ajan 1,9–4,6 °C esiteollisen yläpuolella. Grönlannin tulevat lämpötilat olisivat tuolloin verrattavissa viime interglasiaalin aikaisiin lämpötiloihin; paleoklimatologisten tutkimusten mukaan napaseutujen mannerjäiden vetäytyminen nosti tuolloin merenpintaa 4–6 metrilä. (IPCC SYR 2007)

Nykyiset mallit ennakoivat Etelämantereen pysyvän niin kylmänä, ettei jään sulaminen pinnalta ole merkittävää; lumisateiden lisääntyminen kasvattaa jään määrää. Koko massatase voi kuitenkin olla negatiivinen, jos jään dynaaminen purkautuminen osoittautuu tärkeimmäksi tekijäksi.

Napa-alueiden mannerjäiden osittainen sulaminen voisi nostaa merenpintaa useilla metreillä. Tämä aiheuttaisi rannikoilla vakavia muutoksia ja tulvittaisi alavia maita, merkittävimmin jokisuistoja ja matalia saaria. Tämän ennakoidaan toteutuvan vuosituhanten aikajänteellä, mutta sen tapahtumista vuosisatojen skaalassa ei voida sulkea pois.

Ilmastonmuutos aiheuttaa todennäköisesti joitakin peruuttamattomia vaikutuksia. Keskitason luotettavuudella voidaan todeta, että sukupuuton riski todennäköisesti kasvaa noin 20–30 %:lla tunnetuista eliölajeista, jos maapallon lämpeneminen ylittää 1,5–2,5 °C (suhteessa kauteen 1980–1999). Jos lämpeneminen ylittää noin 3,5 °C, sukupuuton riski voi mallien mukaan olla maailmanlaajuisesti 40–70 % (IPCC SYR 2007).

Nykyisten malliajojen perusteella Pohjois-Atlantin kiertoliike tulee hyvin todennäköisesti hidastumaan tämän vuosisadan aikana, Atlantin ja Euroopan lämpötilojen ennakoidaan kuitenkin nousevan. Kiertoliikkeen laajojen ja peruuntumattomien muutosten vaikutukset kohdistuisivat todennäköisesti meren ekosysteemien tuottavuuteen, kalastukseen, merten hiilensidontaan ja happipitoisuuksiin sekä maa-alueiden kasvillisuuteen. Merten ja maa-alueiden hiilensidonnan muutoksilla saattaa olla takaisinkytkentöjä ilmastojärjestelmään. Palautumattomia ja epälineaarisia muutoksia tarkastellaan perusteellisemmin viitteessä (Pimenoff et al. 2008).

2.3 Vaikutukset Suomeen

EU:n ehdotus kahden asteen tavoitteesta maapallon keskilämpötilan nousun rajoittamiseksi on tehty globaalista pitkän aikajänteestä näkökulmasta. Periaat-

teessa rajoitteen tulisi ottaa huomioon eri alueilla tehtyjä ilmastomuutoksen vaikutusten arvioita, mutta tutkimustieto on vielä osin puutteellista. Ilmastomuutoksen vaikutukset ja haitat ovat erilaisia eri aluilla.

Suomen ilmasto tulee todennäköisesti muuttumaan nopeammin kuin ilmasto keskimäärin maapallolla. Lämpötilan nousu on voimakkainta pohjoisilla manneralueilla, joihin Suomen aluekin kuuluu, joskin Pohjois-Atlantti lämpenee varsin hitaasti.

Suomen ilmaston muuttumisen arvioidaan jatkuvan ja mahdollisesti jopa kiihtyvän lähivuosisikymmeninä. Kehitys eri skenaariossa on samanlainen useiden vuosisikymmenien ajan, mikä kuvastaa maapallon järjestelmän suurta hitautta. Keskimäärin ilmasto lämpenee ja tulee kosteammaksi kaikkina vuodenaikoina. Talven lämpötilojen arvioidaan nousevan vuosien 1971–2000 keskiarvosta 4–6 °C kaudelle 2070–2099 ja kesän lämpötilojen 2–4 °C. Tässä kohdassa esitetyt arviot perustuvat lähinnä FINADAPT-ohjelman skenaariotarkasteluihin ja muihin tuloksiin (Finadapt 2007). Sään ääri-ilmiöistä aiheutuvia tuhoriskejä esimerkiksi maa- ja metsätaloudessa ei ole vielä juuri arvioitu.

Voimakkaat sateet voimistuvat ja aiheuttavat suuren osuuden kesän sademäärästä. Talven sateet lisääntyvät 10–20 % ja kesän muutamia prosentteja. Kesistä tulee aurinkoisempia ja kuivempia.

Lumipeite vähenee enemmän etelässä kuin pohjoisessa. Keskitalven lumimäärä vähenee Etelä-Suomessa 40–60 % ja Pohjois-Suomessa 25–40 %. Pakkasten esiintyminen vähenee ja routa-aika lyhenee. Kuumien päivien määrä kasvaa. Ilmaston äkillistä kylmenemistä Pohjois-Atlantin merivirtojen muutosten takia ei voida rajata pois, mutta tämä on hyvin epätodennäköistä tällä vuosisadalla (Finadapt 2007, Pimenoff et al. 2008).

Ilmaston muuttuminen vaikuttaa ekosysteemeihin Suomen alueella. Eteläiset lajit lisääntyvät ja pohjoiset vähenevät. Metsien lehtipuiden osuus kasvaa. Metsätalouden tuotanto lisääntyy. Biodiversiteetissä tapahtuu muutoksia. Vesistöjen lämmetessä levähaitat mahdollisesti lisääntyvät. Maataloudessa kasvukausi piteenee, ja on mahdollista käyttää uusia tuottoisampia lajikkeita ja viljelytapoja. Etelässä kastelun tarve lisääntyy. Kasvitaudit, tuholaiset ja rikkaruohot toisaalta myös lisääntyvät, millä on vaikutusta maa- ja metsätalouteen, mutta riskejä ei vielä tunneta hyvin. Valumat vesistöihin kasvavat, mikä vaikuttaa mm. Itämeren rehevöitymistilaan.

Yhteiskunnassa on monia järjestelmiä, joihin ilmastomuutos vaikuttaa. Tällaisia ovat mm. liikenne, rakennettu ympäristö sekä sen vesi-, viemäri- ja tiedonvälitysjärjestelmät. Sään ääri-ilmiöt, kuten myrskyt, rankkasateet, tulvat ja kuivuuskaudet aiheuttavat haittoja, joiden kustannukset voivat olla huomattavia, ja

toisaalta myös varautuminen näihin vaikutuksiin maksaa. Esimerkiksi varautuminen tulviin saattaa vaatia tulvavalleja, rakentamiskorkeuden korottamista sekä viemärien mitoitusta voimistuvien rankkasateiden mukaan. Lämpeneminen vaikuttaa myös terveyteen, mm. lämpöaaltojen on havaittu lisäävän kuolleisuutta.

Ilmaston muuttuminen vaikuttaa myös energiajärjestelmiin. Lämpötilan noustessa lämmitysenergian tarve vähenee, mutta toisaalta energiaa kuluu hiukan enemmän jäädytykseen. Vesivoiman määrä kasvaa valumien lisääntyessä ja myös vuodenaikaisjakauma muuttuu. Metsätalouden ja maatalouden paranevien olosuhteiden takia bioenergian potentiaali kasvaa, mutta toisaalta muutokseen liittyvät riskit kuten kasvitaudit ja tuholaiset voivat myös vaikuttaa kielteisesti, jos riskejä ei pystytä hallitsemaan. Tuulisuuden lisääntyminen todennäköisesti lisää hiukan tuulisähkön potentiaalia. Myrskyjen ja muiden sään ääri-ilmiöiden lisääntyminen lisää sähkönjakelun epävarmuutta haja-asutusalueilla, joilla käytetään ilmajohtoja sähkön siirrossa.

Ilmastomuutos vaikuttaa Suomeen myös epäsuorasti maailman talouden ja politiikan kautta. Ilmastomuutoksen aiheuttamista haitoista ja katastrofeista tulee häiriötä maailman talouteen. Näillä on vaikutusta mm. maailmantalouden hintoihin koskien energiaa, raaka-aineita ja teollisuustuotteita. Samoin myös suomalaisten vientituotteiden markkinat voivat häiriytyä. Vaikutuksia voi olla myös jälleenvakuutus- ja rahamarkkinoiden kautta. Ilmastomuutoksen haitat kärjistyvät monissa kehitysmaissa, usein poliittisesti epävakailta alueilla, joilla yhteiskunnan sopeutumiskyky on pieni. Haitat, kuten veden ja ruoan saatavuuden heikkeneminen, voivat myös aiheuttaa sekä pahentaa poliittisia ristiriitoja ja konflikteja, jotka voivat vaikuttaa Suomeen ja muihin kehittyneisiin maihin eri tavoin, myös taloudellisesti ja lisäämällä pakolaisuutta. (WGBU 2007)

2.4 Kahden asteen rajoitteen vaikutus riskien pienenemiseen

Kahden asteen lämpötilarajoite esiteolliseen aikaan nähden merkitsee noin 1,3 asteen rajoitetta nykyiseen lämpötilatasoon nähden. Merkittävimpänä rajoitteen vaikutuksena voitaneen pitää suurten peruuttamattomien muutosten riskin vähenemistä tai jopa poistumista. Tällaisia muutoksia ovat mm. Amazonin sademetsän häviäminen, pohjoisten havumetsien väheneminen, Pohjois-Atlantin termohaliinikiertoliikkeen pysähtyminen ja El Niño vaihtelun voimakkuuden kasvaminen sekä Länsi-Antarktiksien mannerjään sulaminen (Pimenoff et al. 2008, Lenton et al. 2008). Nämä muutokset voisivat tapahtua, jos maapallon keskilämpötilan nousu olisi yli kolme astetta nykytasosta ja noin neljä astetta esiteollisesta ajasta. Muutokset ovat hitaita ja tapahtuvat puolen vuosisadan tai vuosisadan kuluessa, Antarktiksien mannerjään sulamiseen liittyy jopa satojen vuosien tai vuosituhannen hitaus.

Länsi-Antarktiksens mannerjään sulaminen merkitsisi pitkällä aikavälillä noin viiden metrin merenpinnan nousua, joka peittäisi alleen alavia alueita ja mm. rannikkojen kaupunkeja laajalti. Toisaalta aikajänne on tässä pitkä, joten haittoja pystyttäisiin vuosisatojen mittaan pienentämään.

Pohjois-Atlantin termohaliini kierron pysähtyminen merkitsisi alueellista viilentymistä, jota kuitenkin kompensoisi maailmanlaajuinen lämpeneminen. El Niño-vaihtelujen voimistuminen lisäisi kuivuutta mm. Kaakkois-Aasiassa ja muualla.

Yli kahden asteen lämpeneminen merkitsisi myös suuria muutoksia ekosysteemeissä mm. kosteus- ja lämpöolosuhteiden muutosten takia. Näillä olisi edelleen merkittävä vaikutus yhteiskuntaan ja ihmisen toimintoihin.

Kahden asteen lämpeneminen merkitsee kuitenkin jo huomattavia geofysikaalisia muutoksia sekä muutoksia ekosysteemeihin ja sosioekonomiseen järjestelmään. Arktinen merijää tulee sulamaan kesäisin. Myös Grönlannin mannerjään sulaminen saattaa olla jo mahdollista kahden asteen lämpenemisen tapauksessa. Joka tapauksessa meren pinta kohoaa veden lämpölaajenemisen takia sekä osaksi mannerjäiden supistumisen takia, ja riski merkittäviin vahinkoihin etenkin alavilla suistoalueilla kasvaa. Monilla alueilla tapahtuu merkittävää kuivumista, mikä heikentää veden saatavuutta mm. ruoan tuotantoon. Korallit kuolevat laajoilta alueilta, ja lajien sukupuuttojen määrä kasvaa. Kasvillisuusalueet siirtyvät navoille päin. Olosuhteiden muutokset aiheuttavat monenlaisia haittoja yhteiskunnille, ja etenkin köyhissä maissa sopeutumiskyky on heikko ja haitat korostuvat.

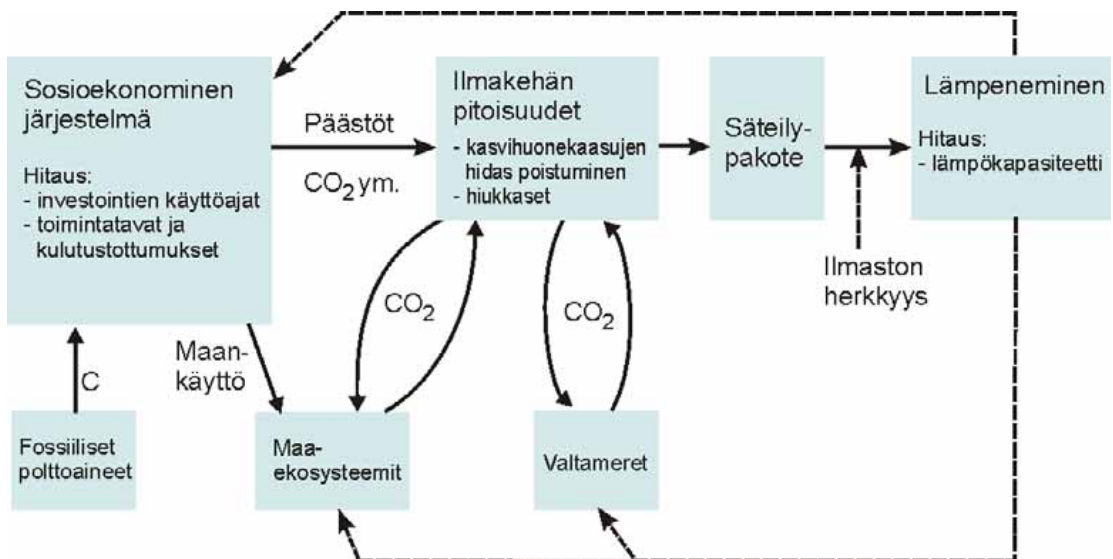
Jos maapallon keskilämpötilan nousu rajoitetaan kahteen asteeseen, pienennetään riskiä merkittävistä geofysikaalisista muutoksista, kuten mannerjään sulamisesta ja Pohjois-Atlantin kiertoliikkeen hidastumisesta (IPCC WG3 s. 230). Edelleen lämpötilan nousun rajoittuminen vähentäisi huomattavasti sukupuuttoon joutuvien eliölajien määrää ja rajoittaisi maaekosysteemien muuttumista hiilidioksidin lähteeksi. Yhteiskuntien kannalta merkittävää olisi mm. veden saantiin, kuivuuteen ja tulviin liittyvien riskien pieneneminen sekä ravinnon tuotannon riittävyyteen liittyvien riskien väheneminen. Tällaisten riskien vähenemisellä olisi myös merkittäviä vaikutuksia talouteen. Monien kehittyvien maiden yhteiskunnissa, joissa sopeutumiskyky on pieni, myös mitä ilmeisimmin kriisiherkkyys ja paineet poliittisiin konflikteihin vähenisivät.

3 LÄMPÖTILATAVOITTEEN SAAVUTTAMINEN

3.1 Luonnon järjestelmän ja sosioekonomisen järjestelmän kytkeytyminen toisiinsa

Sosioekonominen järjestelmä aiheuttaa kasvihuonekaasujen päästöjä mm. käyttämällä fossiilisia polttoaineita ja purkamalla ekosysteemin hiilivarastoja (kuva 3.1). Tämä on muuttanut ilmakehän kasvihuonekaasujen pitoisuuksia ja toisaalta myös muita maapallon fysikaalisia ominaisuuksia, jotka vaikuttavat maapallon säteilyenergiatasapainoon. Säteilyenergiatasapainon poikkeamaa kutsutaan säteilypakotteeksi.

Kuva 3.1 Sosioekonominen järjestelmä ja ilmaston lämpeneminen. Sosioekonominen toiminta aiheuttaa päästöjä mm. fossiilisten polttoaineiden käytöstä, jotka lisäävät ilmakehän kasvihuonekaasujen ja hiukkasten pitoisuuksia. Nämä, samoin kuin maankäytön muutokset, vaikuttavat säteilypakotteeseen, maapallon säteilyenergiatasapainon poikkeamaan, mikä johtaa lämpenemiseen.



Maapallon säteilytasapainon poikkeama, säteilypakote

Ilman ihmisen toiminnan vaikutusta maapallon termodynaaminen järjestelmä on likimain tasapainossa, jossa maapallolle auringosta tuleva säteilyenergia ja maapallon avaruuteen lähettämä säteilyenergia ovat yhtä suuret. Ihmisen toiminnan aiheuttamat kasvihuonekaasujen kohonneet pitoisuudet vähentävät maapallolta avaruuteen suuntautuvaa lämpösäteilyenergiaa, ja aiheuttavat poikkeaman

maapallon säteilyenergiatasapainoon. Tällaista poikkeamaa kutsutaan säteilypakotteeksi. Se voidaan tulkita maapallon termodynaamista järjestelmää lämmitäväksi lämmitystehoksi. Eri kasvihuonekaasujen pitoisuuksien vaikutus on yhdistettävissä säteilypakotteessa. Kohonneet kasvihuonekaasujen pitoisuudet aiheuttavat lämmittävän säteilypakotteen, ja taas lisääntyvä auringon säteilyn heijastuminen ilmakehän hiukkasten tai maan pintaolosuhteiden muutoksen takia aiheuttaa negatiivisen, jäädyttävän säteilypakotteen. Säteilypakote johtaa siihen, että maapallon lämpötila hakeutuu vähitellen kohti uutta tasapainoarvoa, jossa maapallolle tuleva ja sieltä lähtevä säteilyenergia ovat yhtä suuret.

Kahden asteen lämpötilan nousua vastaava säteilypakote on noin $2,6 \text{ W/m}^2$, jos ilmaston herkkyydeksi oletetaan IPCC:n paras arvio $3 \text{ }^\circ\text{C}$ vastaten hiilidioksidipitoisuuden kaksinkertaistumista esiteollisesta ajasta. Säteilypakote voidaan muuntaa ilmakehän hiilidioksidiekvivalenttiseksi pitoisuudeksi, joka tässä kahden asteen tapauksessa vastaa pitoisuutta 450 ppmCO_2 -ekvivalentti.

Nykyiset kasvihuonekaasujen pitoisuudet ja säteilypakote

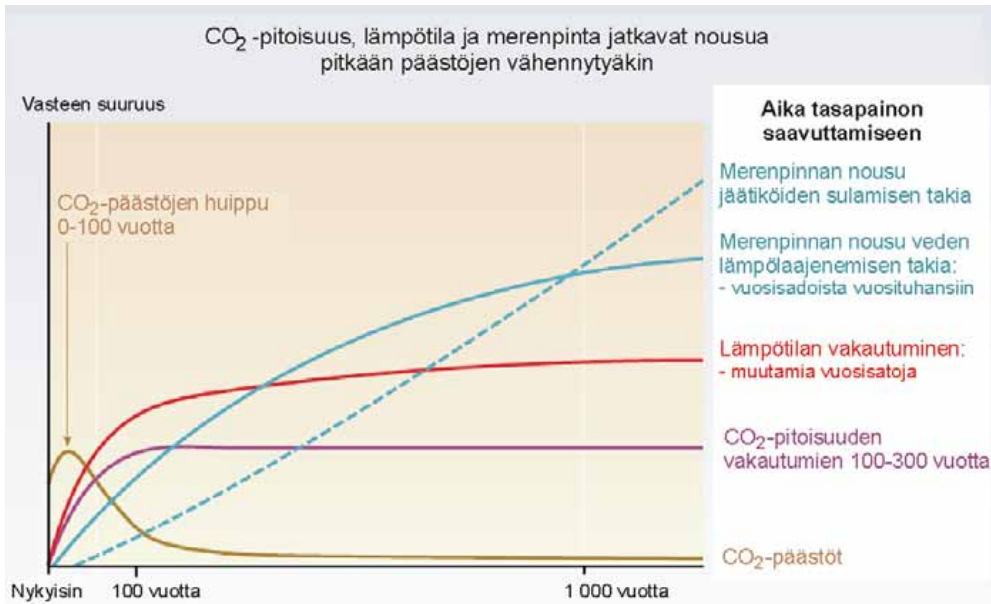
IPCC:n (2007) mukaan ilmakehän nykyinen CO_2 -pitoisuus on noin 380 ppm , minkä lisäksi muista Kioton kaasuista, lähinnä metaanista ja dityppioksidista (eli typpioksiduulista) aiheutuva hiilidioksidiekvivalenttinen pitoisuus on noin 50 ppmCO_2 -ekv. Nykyinen pitoisuuden kasvu on noin 2 ppm/vuosi , joten Kioton kaasujen hiilidioksidiekvivalenttipitoisuus saavuttaa 450 ppmCO_2 -ekvivalenttitasoa noin kymmenessä vuodessa. Jos otetaan huomioon ilmakehässä jo olevat CFC-kaasut, ekvivalenttinen pitoisuus on 455 ppmCO_2 -ekv., siis jo yli $2 \text{ }^\circ\text{C}$ -astetta vastaavan pitoisuustason.

Lämpötilan nousua viivästyttävät ihmisen toimesta ilmakehään tulevat hiukkaspäästöt, jotka pienentävät säteilypakotetta ja ilmakehän laskennallista ekvivalenttipitoisuutta, sekä toisaalta valtamerten suuri lämpökapasiteetti. Ilmakehän laskennallinen hiilidioksidiekvivalentti-pitoisuus on IPCC:n mukaan (IPCC SYR 2007) 375 ppmCO_2 -ekv., kun otetaan huomioon hiukkasten ja eräiden muiden tekijöiden vaikutus.

Lämpötilan kehitykseen liittyvät keskeiset tekijät

Kasvihuonekaasujen, mm. hiilidioksidin ja dityppioksidin, poistuminen ilmakehästä tapahtuu hitaasti vuosisatojen mittaan yli sadan vuoden aikavakioilla. Maapallon, erityisesti valtamerien lämpökapasiteetti on suuri, mikä hidastaa lämpenemistä. Tämä mallilaskujen perusteella arvioitu viive maapallon keskimääräisen pintalämpötilan suhteen on suuruusluokkaa 40 vuotta (meren pintakerros vaikuttaa), mutta jos tarkastellaan merenpinnan nousua lämpölaajenemisen takia (myös meren syvemmät kerrokset vaikuttavat), hitaus on yli kymmenen kertaa suurempi. Kuva 3.2 esittää ilmastomuutokseen liittyviä luonnon järjestelmän hitaustekijöitä.

Kuva 3.2. Ilmaston muuttumiseen liittyviä luonnon järjestelmän hitaustekijöitä. Jos ilmakehän pitoisuudet vakautetaan, lämpötilan nousu hidastuu huomattavasti. Meren pinnan nousu lämpölaajenemisen takia ja jäätiköiden sulamisen takia jatkuu kuitenkin vuosisatoja. Ilmakehän pitoisuuksien vakauttaminen vaatii päästöjen hyvin voimakasta rajoittamista. Kuva mukailtu IPCC:n kolmannesta arviointiraportista (IPCC 2001).



Myös sosioekonomisten järjestelmien muuttuminen on hidasta mm., koska monien investointien käyttöajat ovat pitkiä ja koska kulutustottumukset, toimintatavat ja yhteiskunnan säännöt muuttuvat hitaasti. Teknologian kehittyminen on hyvin keskeisessä asemassa päästöjen rajoittamisessa. On kuitenkin hyvin vaikea arvioida teknologian kehitystä ja uusia teknologisia ratkaisuja pitkällä aikavälillä.

Hitaustekijöiden vuoksi myös päästörajoitustoimet vaikuttavat hitaasti lämpenemiseen. Kun tarkastellaan lämpötilan nousun pysäyttämistä, ollaan tekemisissä käytännössä yli sata vuotta kestävä ajanjakson kanssa, kun hitaudet otetaan huomioon.

Päästöjen rajoittamisen kuitenkin tulee tapahtua varsin nopeasti muutamien vuosikymmenien kuluessa, jotta ilmakehän kasvihuonekaasujen pitoisuuksien nousu pysähtyisi. Viiveet päästöjen rajoittamisessa nostavat ilmakehän kasvihuonekaasujen pitoisuuksia ja vaikeuttavat huomattavasti kahden asteen tavoitteen saavuttamista.

Lämpötilan kehitykseen vaikuttavat keskeiset epävarmuudet ja ilmaston herkkyys

Monet lämpenemiseen vaikuttavat seikat tunnetaan myös puutteellisesti. Edellä on käytetty IPCC:n parasta arviota (3 °C) ilmaston herkkyydestä kahden asteen lämpenemistä vastaavaa pitoisuustasoa laskettaessa. IPCC:n mukaan ilmaston herkkyyden epävarmuusväli on huomattava, 2–4,5, °C eivätkä 4,5 °C suuremmat arvot ole kokonaan poissuljettuja. Ilmaston herkkyys -parametri sisältää monia prosesseja, kuten lämpenemisestä seuraavan veden kierron voimistumisen. Lämpeneminen lisää veden höyrystymistä, ja lisääntyvä ilmakehän vesihöyrymäärä vähentää avaruuteen karkaavaa lämpösäteilyä ja siten voimistaa edelleen lämpenemistä. Jos käytettäisiin IPCC:n raportoiman todennäköisen välin ala- tai ylärajaa, saataisiin huomattava väli pitoisuusarviolle (370–540 ppmCO₂-ekv.), joka vastaa kahden asteen lämpötilan nousua.

Ihmisen toiminnasta seuraavien hiukkasten vaikutus säteilypakotteeseen tunnetaan myös heikosti. Hiukkaset vaikuttavat paitsi suoraan heijastamalla auringon säteilyä, myös epäsuorasti vaikuttamalla pilvien syntyyn, mikä taas vaikuttaa auringon säteilyn heijastamiseen ja lämpösäteilyn absorptioon.

Sosioekonomisen järjestelmän kehitystä ei myöskään pystytä arvioimaan kovinkaan tarkasti. Näin päästöjen kehitys ja ohjaavien toimien vaikutus niihin on arvioitavissa vain puutteellisesti. Ihmisen järjestelmään liittyy kuitenkin myös itseohjautuvuus. Jolleivät tietyt toimet johda haluttuun tulokseen, voidaan kokeilla uusia toimia. Ilmastopolitiikka voidaan nähdä toimenpiteinä, joilla maat pyrkivät hillitsemään ilmaston muuttumista sopimalla ja toteuttamalla laajoja päästöjen rajoituksia ja muita toimia.

Maankäyttö on osa sosioekonomista järjestelmää. Maankäytöllä on monia ilmakehään ja ilmastoon vaikuttavia mekanismeja. Maankäytön päästöt ja nielut ovat merkittäviä, ja niihin vaikuttavat monet kehityspaineet, kuten myös ilmaston muuttuminen. Maankäyttö vaikuttaa myös auringon säteilyn heijastumiseen, albedoon⁴, ja siten säteilypakotteeseen. Maankäyttö vaikuttaa myös latentin ja tuntuvan lämmön suhteeseen ja siten maanpinnan lämpötilaan. Maankäytön muutokset voivat myös aiheuttaa lisäpäästöjä ilmakehään. Lisäksi ne vaikuttavat maanpinnan kykyyn absorboida hiilidioksidia. Lämpeneminen voi nopeuttaa maaperän hiilivarastojen hajoamista. Eri tekijöiden yhteisvaikutuksia ei kuitenkaan ole vielä kattavasti tutkittu.

⁴ Albedo kuvaa osuutta auringon säteilystä, joka heijastuu pinnalta pois. Tumman kappaleen albedo on pieni ja vaalean suuri.

Valtameri on tavallaan lopullinen nielu, johon lopulta fossiilisista polttoaineista peräisin oleva hiili pääosin joutuu. Nykyisin hiiltä siirtyy valtameriin suuruusluokkaa 2 mrd tonnia vuodessa, mutta hiilidioksidin vaihto ilmakehän ja meren välillä on suuruusluokkaa 90 mrd tonnia hiiltä vuodessa. Lämpeneminen myös todennäköisesti vähentää hiilidioksidin siirtymistä ilmakehästä valtameriin. Lämpimään veteen liukenee hiilidioksidia vähemmän kuin kylmään.

3.2 Kasvihuonekaasujen pitoisuuden lisääntyminen ja pitkän aikavälin lämpötilan nousu

EU:n kahden asteen lämpenemistavoitteen arvioitiin aiemmin vastaavan CO₂-pitoisuuksien (ei muita kaasuja mukana) rajoittamista alle 550 ppm -tason. Uudempi tieteellinen tieto on huomattavasti tiukentanut arvioita vaadittavista päästövähennyksistä. IPCC:n kolmannen arviointiraportin (2001) mukaan tämä johtaisi 2,5–5,5 °C lämpenemiseen, mikäli muut Kioton pöytäkirjan kaasut⁵ noudattaisivat ns. Business-as-usual -kehitystä⁶.

Uusimmat arviot, mm. IPCC (IPCC WG3 2007) osoittavat, että kaikkien Kioton pöytäkirjan kaasujen vakauttaminen tasolle 450 ppmCO₂-ekv. vastaisi noin kahden asteen lämpenemistä. Arvioissa on mukana huomattavaa epävarmuutta, mikä johtuu epävarmuuksista ilmaston herkkyydessä ja muiden kaasujen kuin hiilidioksidin sekä aerosolien päästökehityksessä sekä aerosolien suorassa ja etenkin epäsuorassa vaikutuksessa säteilypakotteeseen. IPCC (2007) arvioi, että mikäli kasvihuonekaasujen pitoisuudet vakautetaan noin tasolle 450 ppmCO₂-ekv., todennäköisyys, että kahden asteen lämpenemistavoite saavutetaan, on noin 50 % (Luokan I skenaariot Taulukossa 3.1) (ks. myös Kuva 3.3). Vastavasti mikäli kasvihuonekaasujen pitoisuudet vakautetaan noin tasolle 550 ppmCO₂-ekv. (535–590 CO₂-ekv., luokan II skenaariot Taulukossa 3.1), maapallon keskilämpötilan arvioidaan nousevan noin 2,8 °C–3,2 °C. Taulukossa 3.1 on ilmastonerkkyytenä käytetty arvoa 3 °C. Hiilen kierron epävarmuutta tai muutumista lämpenemisen takia ole otettu huomioon.

⁵ Hiilidioksidi (CO₂), metaani (CH₄), dityppioksidi (N₂O) ja ns. F-kaasut.

⁶ Business-as-usual - Odotettavissa oleva kehitys ilman korvaavia toimia.

Taulukko 3.1 IPCC:n kolmannen arviointiraportin (IPCC 2001) jälkeen esitettyjen vakautusskenaarioiden ominaisuudet sekä niitä vastaavat pitkän ajan tasapainolämpötilat ja merenpinnan nousut (vain veden lämpölaajeneminen otettu huomioon). Luokka I vastaa tapausta, jossa maapallon keskilämpötilan nousu rajoitetaan kahteen asteeseen esiteolliseen aikaan nähden. (IPCC SYR 2007)

Luokka	Vakautettu CO ₂ -pitoisuus (2005=379 ppm) ^b	Vakautettu ekvivalentti CO ₂ -pitoisuus (2005=375 ppm) ^b	CO ₂ -päästöjen huipun ajan-kohta ^{a,c}	CO ₂ -päästöjen muutos 2050 (vertailukohtana 2000) ^{a,c}	Keski-lämpötilan nousu ^{d,e}	Meren-pinnan nousu ^f	Skenaarioiden lukumäärä
	ppm	ppm	Vuosi	%	°C	m	
I	350 – 400	445 – 490	2000–2015	-85...-50	2,0 – 2,4	0,4 – 1,4	6
II	400 – 440	490 – 535	2000–2020	-60...-30	2,4 – 2,8	0,5 – 1,7	18
III	440 – 485	535 – 590	2010–2030	-30...+5	2,8 – 3,2	0,6 – 1,9	21
IV	485 – 570	590 – 710	2020–2060	+10...+60	3,2 – 4,0	0,6 – 2,4	118
V	570 – 660	710 – 855	2050–2080	+25...+85	4,0 – 4,9	0,8 – 2,9	9
VI	660 – 790	855 – 1130	2060–2090	+90...+140	4,9 – 6,1	1,0 – 3,7	5

Huomautuksia:

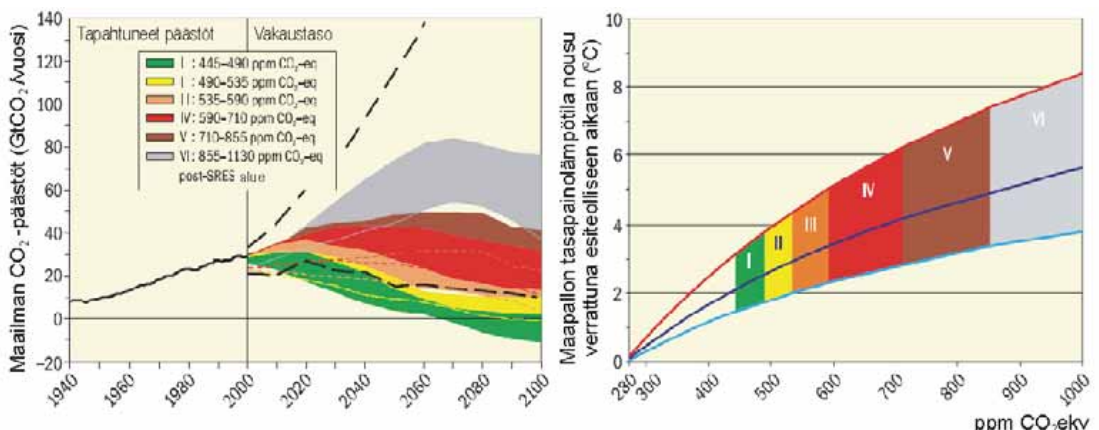
- ^a Tässä arvioiduissa tutkimuksissa saadut, tiettyä vakautustasoa vastaavat päästövähennykset voivat olla aliarvioituja, koska hiilen kierron ja ilmastomuutoksen välisiä takaisinkytkentöjä ei ole otettu huomioon.
- ^b Ilmakehän CO₂-pitoisuus oli 379 ppm vuonna 2005. Paras arvio kaikkien pitkäikäisten kasvihuonekaasujen ekvivalentille CO₂-pitoisuudelle tuona vuonna on noin 455 ppm; kun kaikki ihmistoiminnasta aiheutuvat ilmastopakotteet (edellisten lisäksi myös aerosolit) otetaan huomioon, vastaava arvo on 375 CO₂-ekv.
- ^c Vaihteluvälit vastaavat kolmannen arviointiraportin jälkeisten skenaarioiden jakauman 15. ja 85. prosenttipisteitä. Vain CO₂-päästöt on esitetty, joten useiden kaasujen skenaarioita voidaan verrata skenaarioihin, joissa on tarkasteltu vain hiilidioksidia.
- ^d Ilmaston herkkyyden paras arvio on 3 °C.
- ^e Vertailukohtana on esiteollisen ajan lämpötila. Ilmastojärjestelmän hitauden takia globaali keskilämpötila tasapainotilassa on eri kuin odotusarvo kasvihuonekaasujen pitoisuuksien vakautumisajankohdan keskilämpötilalle. Suurimmassa osassa arvioituja skenaarioita pitoisuuksien vakautuminen tapahtuu vuosien 2100 ja 2150 välillä.
- ^f Vertailukohtana on esiteollisen ajan merenpinta. Vain veden lämpölaajeneminen on otettu huomioon. Esitettyjen tasapainotilaa vastaavien pinnankorkeuksien saavuttamiseen kuluu vähintään useita vuosisatoja.

IPCC:n neljännen arviointiraportin luokan I skenaarioissa globaalien päästöjen on käännäyttävä laskuun vuosina 2000–2015. Globaalien hiilidioksidipäästöjen on vähennäyttävä vuoteen 2050 mennessä -50 %...-85 % vuoden 2000 tasosta. Lisäksi useissa skenaarioissa globaalit nettopäästöt ovat negatiivisia vuosisadan puolivälin jälkeen (Kuva 3.3). Käytännössä tämä saavutetaan mm. nettometsä-

kadon kääntämisellä metsitykseksi sekä joissakin skenaarioissa käyttämällä biomassaa voimalaitoksissa, joissa talteenotetaan ja loppusijoitetaan hiilidioksidi (CCS-teknologia).

Kuva 3.3 Vasen osio: Maailman CO₂-päästöt jaksolle 1940–2000 ja päästöjen vaihteluväli eri vakautusskenaarioiden luokille vuodesta 2000 vuoteen 2100.

Oikea osio: Vastaavat vakautustavoitteiden ja todennäköisten globaalien tasapainolämpötilojen nousujen suhteet. Erityisesti korkeilla vakautustasoilla tasapainotilan saavuttaminen voi kestää useita vuosisatoja. Väritetyt alueet osoittavat vakautusskenaariot ryhmiteltyinä tavoitetasojen mukaan (vakautusluokat I...VI). Oikea osio kertoo maapallon keskilämpötilojen muutokset esiteollisesta ajasta käyttäen (i) ilmastoherkkyyden parasta arviota 3 °C (musta viiva väritetyn alueen keskellä), (ii) herkkyyden todennäköistä ylärajaa 4,5 °C (punainen viiva), ja (iii) herkkyyden todennäköistä alarajaa 2 °C (sininen viiva). Vasemman osion mustat katkoviivat kertovat päästöjen vaihteluvälin SRES-skenaarioiden (2000) jälkeen julkaistuissa perusskenaarioissa. Vakautusskenaarioiden päästöjen vaihteluvälit sisältävät CO₂- ja monikaasuskenaariot ja vastaavat tulosten koko vaihteluvälin 10. ja 90. prosenttipisteitä.



Maapallon keskilämpötilan nousun pysäytys voidaan saavuttaa niin, että ilmakehän kasvihuonekaasujen pitoisuus nousee yli tasapainolämpötilaa vastaavan tason esimerkiksi joiksin vuosikymmeniksi, mutta laskee sitten tasapainolämpötilaa vastaavalle tasolle. Jos pitoisuuden ylitys on sopivan lyhytaikainen, lämpötila ei ehdi nousta yli tasapainoarvon, etenkin jos hiukkasten viilentävä vaikutus ei vähene kovin nopeasti. Tällaisia pitoisuuskehityksiä kutsutaan usein overshoot-skenaarioiksi. Jos teknologia on huomattavasti nykyistä tehokkaampaa muutaman vuosikymmenen kuluttua, voi olla kustannustehokasta painottaa päästönrajoitustoimia myöhemmille vuosikymmenille. Tällöin kuitenkin riski lämpötilan noususta yli kahden asteen kasvaa, jos pitoisuuden alenemista ei saada toteutumaan.

Pitoisuuksien saaminen laskevalle uralle huipun jälkeen on kuitenkin hyvin vaativaa hiilidioksidin hitaan poistumisen takia. Kun vielä otetaan huomioon monien investointien pitkät pitoajat, korostuu tällaisen kehityskulun vaikeus. VTT:n Global Times -mallilla tehdyissä tarkasteluissa, joissa on otettu huomioon edellä mainitut hitaustekijät, eivät suuren tavoitepitoisuuden ylityksen (overshooting) sisältävät skenaariot ole kustannusoptimaalisia. Skenaarioissa on kuitenkin oletettu, että CFC-päästöt lakkaavat ja CFC-pitoisuudet laskevat näiden kaasujen elinajan mukaisesti ilmakehässä (Syri et al. 2008).

Luvuissa 3.3 ja 3.4 tarkastellaan kahta merkittävää epävarmuustekijää, joita ei ole otettu huomioon kohdan 3.2 taulukossa 3.1. Lämpeneminen muuttaa hiilen kiertoa ja aiheuttaa päästöille lisävähennystarvetta, jotta pysyttäisiin valitun pitoisuustavoitteen alapuolella. Lisävähennystarvetta ei toistaiseksi osata tarkasti arvioida. Toinen vielä merkittävämpi epävarmuus liittyy ilmaston herkkyyteen.

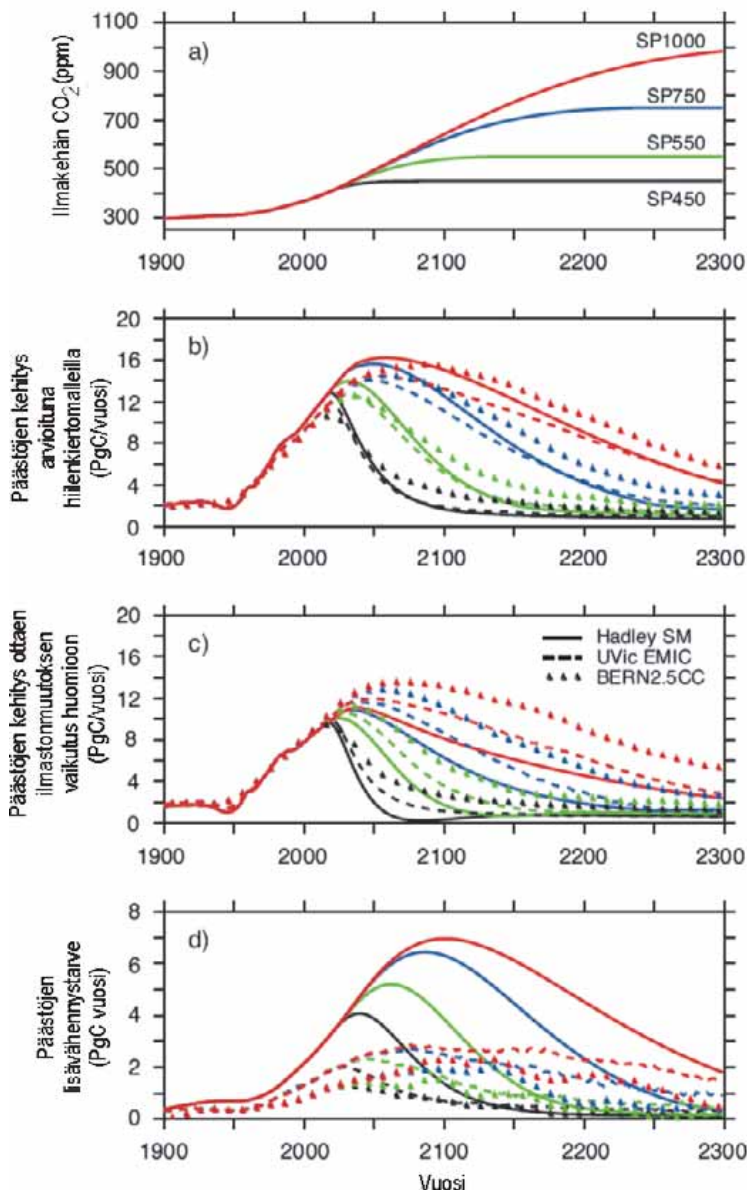
3.3 Hiilen kierron muuttumisen vaikutusarviot ja epävarmuudet

IPCC:n (IPCC WG1 2007) mukaan yhdistetyt ilmasto- ja hiilenkiertomallit osoittavat jo yksiselitteisesti, että tuleva ilmastomuutos tulee vähentämään maapallon maa- ja meriekosysteemien kykyä sitoa ilmakehän hiilidioksidia. Tämä ns. positiivinen takaisinkytkentä aiheuttaa hyvin negatiivisia vaikutuksia ihmiskunnan kannalta ja sen, että esimerkiksi SRES-raportin A2-skenaariossa yksinomaan vähenevä sitoutuminen lisää ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta 20–220 ppm vuoteen 2100 mennessä. Näissä skenaarioissa ilmakehän hiilidioksidipitoisuus on 730–1 020 ppm vuoteen 2100 mennessä. Ilman interaktiivista hiilen kierron mallinnusta vastaava arvio hiilidioksidipitoisuudelle on 836 ppm vuoteen 2100 mennessä. Tämä ero kuvastaa hiilen kierron muuttumisen aiheuttamaa epävarmuutta skenaarioissa. (IPCC WG3 2007)

Tämä ilmaston ja hiilen kierron välinen vuorovaikutus vaikeuttaa vastaavalla tavalla pitoisuuden vakauttamistavoitteiden saavuttamista. Mitä korkeampi pitoisuustaso sallitaan, sitä suurempi on vähenevästä hiilidioksidin absorboitumisesta johtuva lisävähennysvaatimus. CO₂-ekvivalenttipäästöjen vakauttaminen 450 ppm:iin, mikä johtaa todennäköisesti 1,4 °C ... 3,1 °C lämpenemiseen (todennäköisin arvo 2,1 °C), vaatisi nykypäästöjen vähentämisen -52 %...-90 % vuoteen 2100 mennessä. Positiivinen ilmaston ja hiilen kierron välinen vuorovaikutus aiheuttaa sen, että päästöjä on vähennettävä 105–300 GtC vastaava määrä enemmän kuin tapauksessa, jossa vuorovaikutusta ei tapahtuisi. Tämä lisävähennysmäärä on annettu kumulatiivisena päästönä vuosien 2000–2300 välillä, josta suurin osa on tehtävä ennen vuotta 2100. Päästönvähennys vuoteen 2100 mennessä ilman takaisinkytkentää olisi luokkaa 1 000 GtC perusurasta riippuen.

IPCC:n raportin (IPCC WG3 2007) kuvassa 10.21 (Kuva 3.4) on kuvattu tämä päästökahtymisen tiukennusvaatimus erona tilanteiden b) ja c) välillä.

Kuva 3.4 a) Ilmakehän CO₂-pitoisuuden vakautusskenaariot SP1000 (punainen), SP750 (sininen), SP550 (vihreä) ja SP450 (musta). b) Vakautusskenaarioiden kanssa yhteensopivat vuosittaiset päästöt laskettuna kolmen mallin avulla (Hadley'n yksinkertainen malli, yhtenäinen viiva; UVic EMIC, katkoviiva; ja BERN2.5CC EMIC, kolmiot) kolmelle vakautusskenaariolle ottamatta huomioon ilmastonmuutoksen vaikutusta hiilen kiertoon. c) Kuten b) mutta ilmastonmuutoksen vaikutus hiilen kiertoon otettu huomioon. d) Kuvien b) ja c) erotus, joka osoittaa ilmaston lämpenemisestä hiilen kiertoon tulevan takaisinkytkennän vaikutuksen tarvittaviin päästönrajoituksiin, jotta tarkasteltua pitoisuustasoa ei ylitetä. (IPCC WG1 2007).

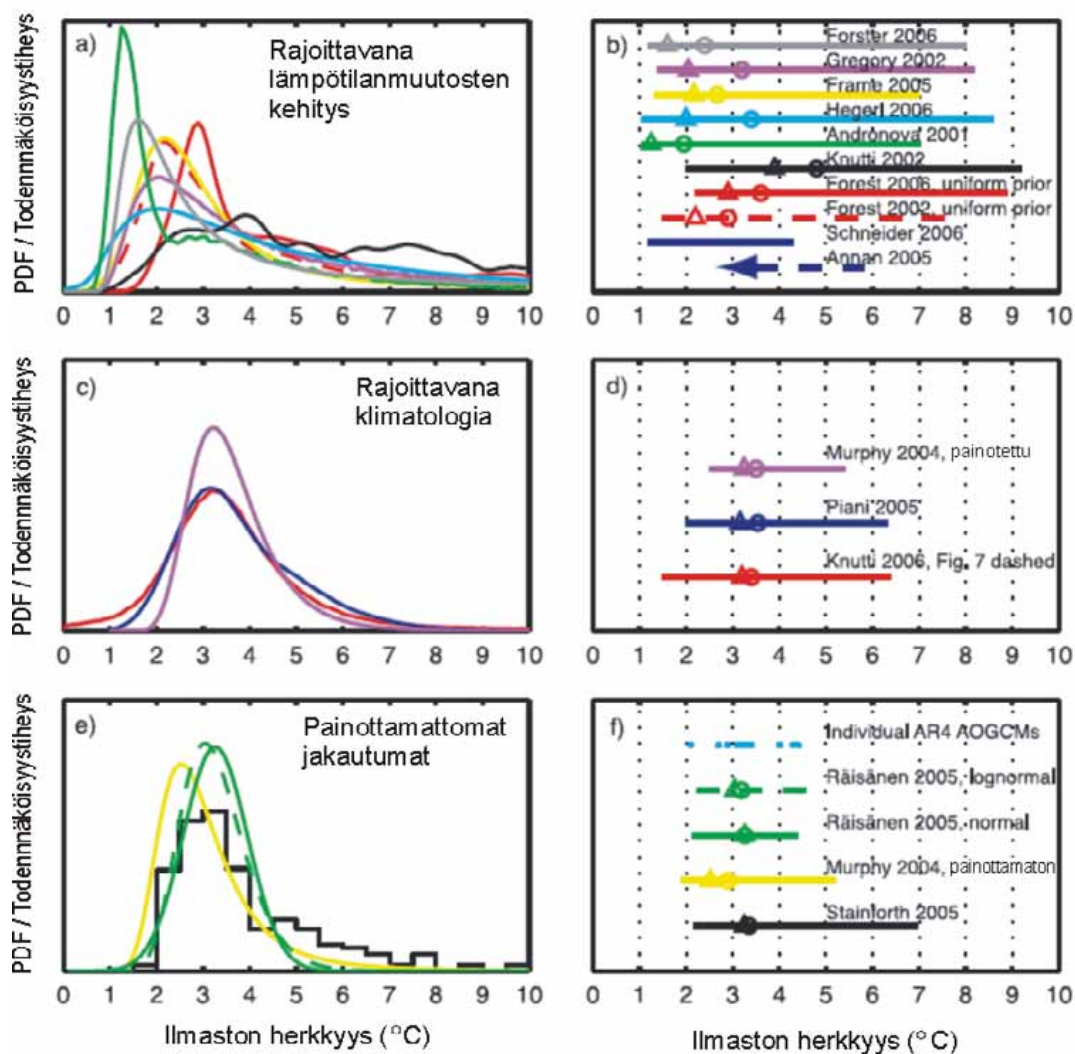


3.4 Ilmaston herkkyyden vaikutus lämpötilatavoitteen saavuttamiseen

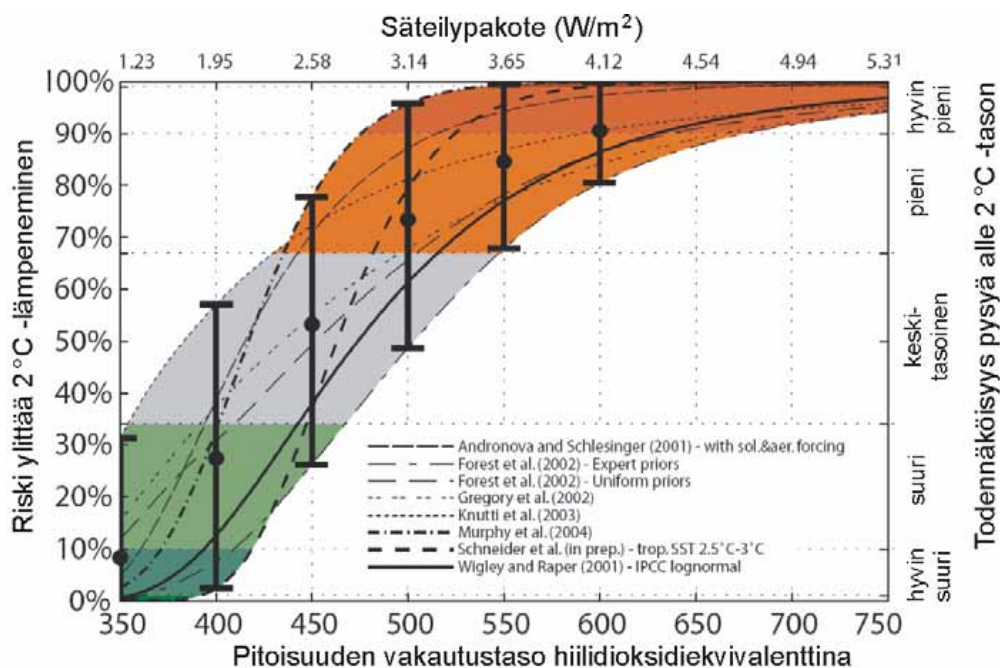
Eräs keskeinen ilmastomuutoksen hillintäskenaarioihin epävarmuutta tuova tekijä on ilmaston herkkyys kohonneille kasvihuonekaasujen pitoisuuksille. Ilmaston herkkyyttä kuvataan parametrilla, joka kertoo, montako astetta maapallon keskilämpötila nousee, kun kasvihuonekaasujen pitoisuudet kaksinkertaistuvat esiteolliseen aikaan verrattuna. IPCC (IPCC WG1 2007) arvioi että ilmaston herkkyyden ns. "paras arvio" on 3 °C. Vaihteluväli on kuitenkin 1,5 °C ... 10 °C (95 % luottamusasteella ilmoitettuna). IPCC:n mukaan ilmaston herkkyyden todennäköinen arvo on välillä 2 °C ... 4,5 °C, mutta myöskään mahdollisuutta huomattavasti suurempiin arvoihin ei voida sulkea pois (Kuva 3.5, Box 10.2, IPCC WG1 2007). Kuvassa 3.6 esitetään todennäköisyys pysyä alle kahden asteen tasapainolämpötilassa, kun ilmakehän pitoisuus vakautetaan eri tasoille.

Ilmaston herkkyys kertoo lähinnä erilaisten takaisinkytkentämekanismien vaikutuksesta lämpötilan nousuun. Merkittävimpiin mekanismeihin kuuluu veden kierroksen voimistuminen. Lämpötilan nousu lisää veden haihtumista ja ilmakehän vesihöyryn määriä, jotka pidättävät maapallolta avaruuteen suuntautuvaa lämpösäteilyä ja siten nostavat maapallon keskimääräistä pintalämpötilaa.

Kuva 3.5 a) Ilmaston herkkyyttä kuvaavia todennäköisyystiheysjakaumia arvioituna käyttäen rajoitteina ilmakehän lämpötilaa, säteilypakotetta ja lämmön siirtoa valtameriin. b) Kuten a) mutta 5 ja 95 %:n alue, mediaani (ympyrä) ja maksimitodennäköisyys (kolmio). c) ja d) kuten a) ja b) mutta käyttäen rajoitteena nykyistä klimatologiaa. e) ja f) eri jakaumista sovitettuja yhdistettyjä jakaumia. (IPCC WG3 2007).



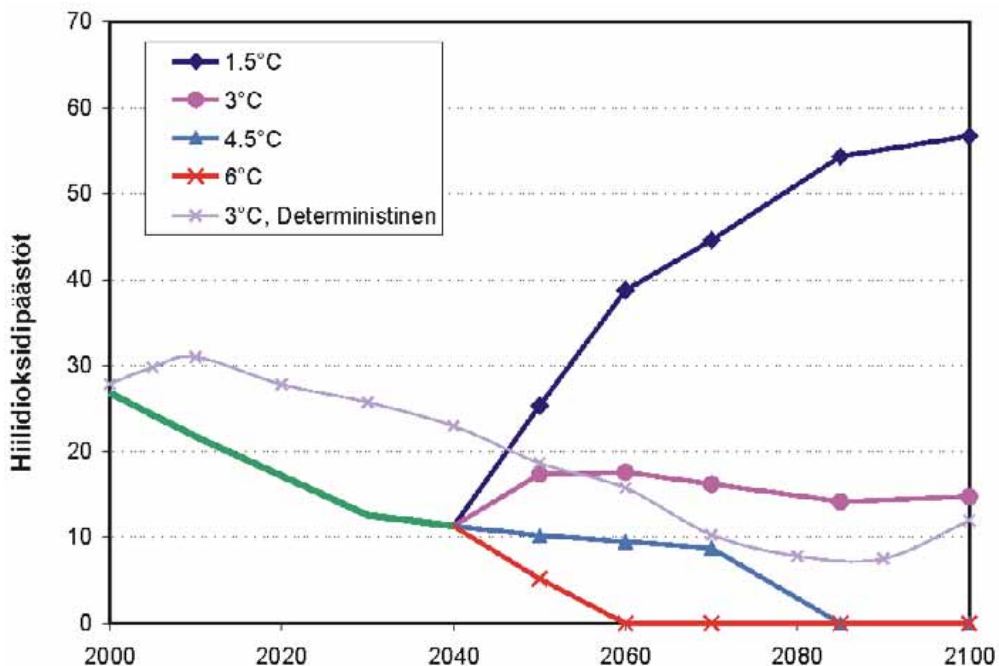
Kuva 3.6 Riski ylittää maapallon keskilämpötilan nousun kahden asteen rajoite erilaisilla CO₂-ekvivalenttipitoisuuden rajoitustasoilla (Meinshausen 2005). Pitoisuustaso 450 ppmCO₂-ekv. vastaa keskitasoisista todennäköisyyttä pysyä alle kahden asteen tasapainolämpötilassa.



Maapallon pitkäaikaisen säteilyenergiatasapainon saavuttamiseen liittyy kuitenkin myös hyvin hitaita prosesseja, kuten metsäpeitteen ja jäätiköiden muutoksia, jotka vaikuttavat maapallon heijastamaan auringon säteilyn määrään ja siten myös tasapainolämpötilaan pitkällä ajalla. Amerikkalainen tunnettu ilmastotutkija James Hansen (Hansen et al. 2008) esittää, että ilmaston herkkyys on paljon suurempi kuin IPCC:n esittämä todennäköinen arvo. Kyseisessä artikkelissa ehdotetaan, että ilmakehän hiilidioksidipitoisuus tulisi rajoittaa nykytasoa alemmalle tasolle.

Ilmaston herkkyydellä on erittäin suuri vaikutus siihen, miten tiukkoja globaaleja päästörajoituksia vaaditaan tietyn lämpötilatavoitteen saavuttamiseksi. Esimerkiksi Syri et al. (2008) on laskettu globaalilla TIAM- (Global Times) -energiajärjestelmämallilla esimerkkejä vaadittavasta globaalista päästökehityksestä ilmakehän herkkyyden arvoilla 1,5...6 °C (kuva 3.5). Kuvassa 3.7 on esitetty globaali päästökehitys, joka vaaditaan kahden asteen lämpötilatavoitteen saavuttamiseen vuonna 2100. Kuvasta nähdään, että mikäli ilmaston herkkyys on perusarviota 3 °C suurempi, tiukentuvat päästörajoitusvaatimukset erittäin merkittävästi (kuvassa tapaukset, joissa ilmakehän herkkyys on 4,5 °C tai 6 °C). Tällöin globaalien nettopäästöjen tulisi painua nollaan vuosisadan loppupuolella.

Kuva 3.7 Globaali päästöjen kehitys, joka vaaditaan kahden asteen lämpötilavoitteen saavuttamiseen vuonna 2100 eri oletuksilla ilmaston herkkyydestä (Syri et al. 2008).



Esimerkkilaskennassa on oletettu, että ilmakehän herkkyys tunnetaan hyvin vuonna 2040. Vastaavasti mikäli ilmakehän herkkyys olisikin vain 1,5 °C, päästöjä voitaisiin vuosisadan alkupuolen suojautumisstrategian jälkeen kasvattaa merkittävästi. Käytännössä tällöin globaali järjestelmä olisi jo muuttunut voimakkaasti vähähiiliseksi, ja olisi järkevää pyrkiä alempiin lämpötilatavoitteisiin.

Tarkastelussa oletetaan tieto ilmaston herkkyydestä saatavan vuonna 2040 paitisi deterministisessä tapauksessa (vaalean lila viiva), jossa oletetaan ilmaston herkkyydeksi 3 °C. Jos ilmaston herkkyys tiedetään vasta 2040, niin joka tapauksessa kannattaa rajoittaa päästöjä voimakkaammin kuin deterministisessä 3 asteen tapauksessa vuoteen 2040 saakka, jotta olisi mahdollista myös suuremmilla ilmaston herkkyyden arvoilla pysyä kahden asteen lämpötilan nousun puitteissa. Jos ilmaston herkkyys osoittautuu vuonna 2040 suureksi, tulee päästöt vähentää nollaan, mutta jos pieneksi, niin päästörajoituksia voidaan keventää.

IIASA⁷ (Keppo et al., 2006) on päätnyt vastaavanlaisiin johtopäätöksiin MES-SAGE-mallilla tehdyissä todennäköisyyspohjaisissa skenaariolaskelmissa. Laskelmien mukaan 3 asteen lämpenemistavoitteen saavuttamiseksi 33 %...66 %

⁷ IIASA - kansainvälinen sovelletun systeemanalyysin tutkimuskeskus.

todennäköisyydellä vaaditaan tämän vuosisadan aikana 30 %...60 % kumulatiivinen globaali vähennys ns. Baseline-skenaarioon verrattuna. Mikäli CO₂-ekvivalenttipitoisuudet rajoitetaan 480 ppm tasolle, saavutetaan 2 °C lämpenemistavoite 46 %...71 % todennäköisyydellä riippuen oletetusta ilmakehän herkkyyden todennäköisyysjakaumasta.

Keppo et al. (2006) toteavat, että keskeiset tekijät vaativien lämpötilatavoitteiden saavuttamiselle ovat se, miten nopeasti päästöttömiä teknologioita saadaan maailmanlaajuisesti käyttöön, sekä se, miten CO₂-pitoisuudet kehittyvät vuosisadan alkupuoliskon aikana. Siten lyhyen ja keskipitkän aikavälin päästörajoitukset ovat erittäin merkittäviä.

MNP⁸ (den Elzen & van Vuuren 2007, van Vuuren et al. 2007) on tehnyt skenaariotarkasteluja IMAGE- ja TIMER-malleilla CO₂-ekvivalenttipitoisuuksien rajoittamisesta tasoille 450 ppm, 550 ppm ja 650 ppm. Heidän johtopäätöksensä on, että pitoisuuksien rajoittaminen näille tasoille on mahdollista nykyisin tunnetuilla teknologioilla. Lisäksi he ovat alustavasti arvioineet mahdollisuuksia 400 ppm CO₂-ekvivalenttitavoitteen saavuttamiseen. Tämän saavuttaminen on heidän mukaansa mahdollista, mikäli oletetaan hyvin optimistiset oletukset saatavilla olevalle bioenergian määrälle, teknologian kehitykselle sekä oletetaan, että CCS-teknologia olisi laajasti käytettävissä bioenergiapohjaiselle energiantuotannolle. Keskeisinä epävarmuustekijöinä tekijät mainitsevat teknologian kehityksen ja eri teknologioiden yleisen hyväksyttävyyden tulevaisuudessa, perusrakenteen kehityksen tulevaisuudessa, maankäytön sekä bioenergian potentiaalin ja käyttömäärän tulevaisuudessa.

3.5 Päästöjen rajoittamisen kehityspolut, kustannukset ja ohjaukset

Ilmakehän kasvihuonekaasujen pitoisuuksien vakauttamisen edellytyksenä on päästöjen kasvun kääntyminen laskuun. Mitä alhaisempi vakautustaso, sitä aikaisemmin ja jyrkemmin päästöjen tulisi vähentyä. Seuraavien kahden tai kolmen vuosikymmenen aikana tehtävillä hillintätoimilla tulee olemaan suuri vaikutus mahdollisuuksiin saavuttaa alhaisia pitoisuustasoja. (IPCC WG3 2007)

Ilmakehän alhaisia kasvihuonekaasujen pitoisuustasoja voidaan saavuttaa käyttämällä niitä teknologioita, jotka ovat tällä hetkellä saatavilla tai joiden oletetaan kaupallistuvan tulevien vuosikymmenten aikana (ETP 2008). Tällöin kuitenkin tarvitaan tehokkaita kannustimia teknologioiden kehitykseen, hankintaan sekä levittämiseen.

⁸ MNP - Alankomaiden ympäristöarviointikeskus.

Energiatehokkuuden paranemisella on tärkeä osuus päästöjen vähentämisessä. Kahden asteen tavoitetta vastaavissa kehityskuluissa on huomattava paino energianlähteillä, joilla on alhaiset päästöt, kuten uusiutuva energia ja ydinvoima sekä CO₂:n talteenotto ja varastointi (CCS). Näissä skenaarioissa energiantuotannon ja koko talouden hiili-intensiteetin alenemisen tulee olla paljon nopeampaa kuin ollut aiemmin. Muiden kuin CO₂-päästöjen sekä maankäytön muutoksista ja metsätaloudesta tulevien CO₂-päästöjen sisällyttäminen hillintävaihtoehtoihin tuo suuremman jouston ja kustannustehokkuuden ilmakehän kasvihuonekaasujen pitoisuuksien vakauttamisen saavuttamiseen.

Alhaisten pitoisuuden vakautustasojen saavuttamiseen samoin kuin kustannuksien vähentämiseen vaaditaan investointeja sellaisiin teknologioihin, joiden käyttö aiheuttaa vain pieniä päästöjä. Tällaisten teknologioiden käyttöönottoa tulee edistää maailmanlaajuisesti. Kahden asteen tavoitteen saavuttamiseksi tarvitaan tehokasta T&K-työtä ja investointeja uusiin teknologioihin seuraavien vuosikymmenten aikana.

Vuonna 2050 globaalit keskimääräiset makrotaloudelliset kustannukset useiden kaasujen hillinnästä kohti pitoisuuksien vakautustasoa, joka vastaa kahden asteen lämpenemisrajoitetta (kun oletetaan ilmaston herkkyydeksi IPCC:n esittämä ns. paras arvio), olisivat suurimmillaan 5,5 % globaalista BKT:stä (IPCC ei anna kustannusten vaihteluväliä eikä keskiarvoa, koska tarkastelussa olleita skenaarioita oli vähän). BKT:n vuosittaisessa kasvussa tämä merkitsisi noin 0,12 prosenttiyksikön alenemaa (tyypillisesti kehittyneiden maiden BKT kasvaa 2–3 % vuodessa). Monien sektoreiden ja maiden kohdalla kustannukset poikkeavat selvästi globaalista keskiarvosta. Päästöjen rajoituksen toteuttaminen vaatii monenlaisia ohjauskeinoja.

Jos globaali rajoitelämpötila olisi esimerkiksi kolme astetta, haitallisia vaikutuksia pienennettäisiin selvästi paljon vähemmän, ja lisäksi palautumattomien vaikutusten todennäköisyys olisi suurempi kuin kahden asteen tapauksessa. Vastaavasti päästöjen rajoittaminen olisi vähäisempää ja kustannukset pienempiä. Haittojen ja kustannusten arviointi on kuitenkin hyvin vaikeaa ja epätarkkaa. Lisäksi haitat eivät jakaudu tasaisesti maapallolle.

Sternin raportin (2006) mukaan hillitsemättömän ilmastomuutoksen kustannukset vuoden 2050 tasolla ovat noin 5–20 % maailman BKT:stä ja toisaalta päästöjen hillinnän kustannukset luokkaa 1 % BKT:stä, kun tavoitteena on rajoittaa lämpeneminen tasolle 2,5–3 °C.

Päätöksenteko sopivasta maailmanlaajuisesta päästöjen hillinnän tasosta on iteratiivinen riskienhallintaprosessi. Tässä prosessissa tulee ottaa huomioon hillintä ja sopeutuminen, toteutuvat ja vältettävät ilmastomuutoksen aiheuttamat haitat sekä sivuhyödyt, kestävyys, oikeudenmukaisuus ja suhtautumisen

riskeihin. Kasvihuonekaasujen päästöjen rajoittamisen laajuuteen ja ajoitukseen liittyvät päätökset sisältävät nopean päästöjen vähennyksen taloudellisten kustannusten tasapainottamisen keskipitkän ja pitkän aikavälin ilmatoriskejä vastaan.

Vaarana on, että viivästyneet päästöjen vähennykset johtavat investointeihin, jotka lukitsevat yhteiskunnan päästöintensiiviseen infrastruktuuriin ja kehityspolkuihin. Tämä rajoittaa merkittävästi mahdollisuuksia saavuttaa alhaisia ilmakehän pitoisuuden vakautustasoja sekä nostaa riskiä peruuttamattomista ilmastomuutoksen vaikutuksista.

Monenlaisilla kansallisilla toimenpideohjelmilla ja ohjauskeinoilla voidaan luoda kannustimia hillintätoimille. Ilmastotoimenpiteiden yhdentäminen laajempiin kehitysohjelmiin tekee toimeenpanon ja esteiden ylittämisen helpommaksi.

Erilaisia keinoja on lukuisia. Niitä ovat esimerkiksi säännökset ja standardit, verot ja maksut, kaupattavat päästöoikeudet, taloudelliset kannusteet, vapaaehtoiset sopimukset, tiedotus sekä tutkimus ja kehitys.

Toimenpideohjelmat, jotka aikaansaavat todellisen tai epäsuoran päästöyksikön hinnan, luovat kannusteita tuottajille ja kuluttajille investoida merkittävästi alhaisen päästötason tuotteisiin, teknologioihin ja prosesseihin. Tällaiset toimenpideohjelmat voivat sisältää taloudellisia instrumentteja, hallituksen rahoitusta ja sääntelyä. Esimerkki tällaisesta on EU:n päästökauppajärjestelmä. Tehokas päästöyksikön hintasignaali saa toteutumaan merkittävän hillintäpotentiaalin kaikilla sektoreilla.

Julkisen hallinnon tuki on tärkeää tehokkaan teknologian kehittämiseksi, innovaatioille ja hyödyntämiselle. Tuki voi koostua taloudellisista avustuksista, verohyvityksistä, standardien asettamisesta ja markkinoiden luomisesta. Tutkimuksen ja kehityksen tuomat kokonaishyödyt ovat suurempia kuin ne hyödyt, joita saadaan yrityksissä tai yksityisellä sektorilla.

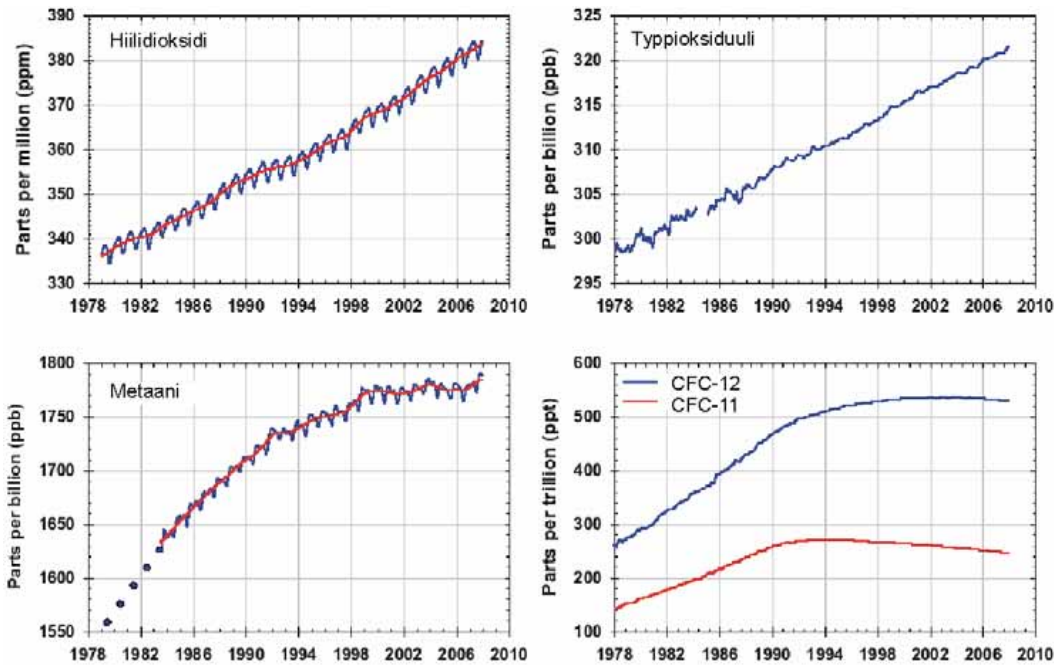
Ilmastomuutokseen liittyvät vastatoimet ja kestävä kehitys ovat suureksi osaksi synergistisiä. Ilmastomuutoksen hillintätoimet, jotka ovat yhteydessä energia- tehokkuuteen ja uusiutuvaan energiaan, ovat usein taloudellisesti hyödyllisiä, parantavat energiavarmuutta ja vähentävät paikallisia ilmansaasteita. Kestävää kehitystä voidaan myös vahvistaa ilmastomuutoksen hillintätoimilla, jotka koskevat jätehuolto-, liikenne- ja rakennussektoreita. Muuttamalla kehitystä kestävämmäksi voidaan sekä hillitä ilmastomuutosta että parantaa sopeutumiskykyä, vähentää sekä päästöjä että alttiutta ilmastomuutoksen haitoille. Hillinnän ja sopeutumisen välisiä positiivisia yhteisvaikutuksia on esimerkiksi asianmukaisesti suunniteltu biomassan tuotanto, suojeltujen alueiden muodostaminen, maankäyttö, rakennusten energiankäyttö ja metsätalous.

4 PÄÄSTÖJEN, PITOISUUKSIEN JA SÄTEILYPAKOTTEEN KEHITYS VIIME VUOSINA

Hiilidioksidi (CO_2), metaani (CH_4) ja typpioksiduuli (N_2O) ovat kolme merkittävintä ilmastoa lämmittävää kaasua. Seuraavaksi suurin vaikutus on CFC-kaasuilla, joiden jälkeen kaikkien muiden kaasujen yhteenlaskettu osuus lämmittävästä vaikutuksesta on noin 3 %. Kasvihuonekaasujen määrää mitataan pitoisuuksina ilmakehässä, ja kaasusta riippuen yksikkönä käytetään miljoonasosaa (ppm), miljardisosaa (ppb) ja jopa biljoonasosaa (ppt). Viiden eniten lämmittävän kaasun pitoisuuksien kehitys vuodesta 1978 nykyhetkeen on esitetty kuvassa 4.1. Kioton pöytäkirja koskee ihmisen toiminnan aiheuttamia hiilidioksidi-, metaani- ja typpioksiduulipäästöjä sekä niiden halogenoitujen (fluorattujen) hiilivetyjen päästöjä, jotka eivät sisällä klooria tai bromia (ns. F-kaasut). Montrealin pöytäkirja koskee niitä halogenoituja hiilivetyjä (mm. CFC:t), jotka sisältävät klooria tai bromia ja jotka siten edistävät yläilmakehän otsonikatoa. Montrealin pöytäkirjan kaasut ovat myös pitkäikäisiä kasvihuonekaasuja, joiden säteilypakotevaikutus on perusteltua ottaa huomioon, kun tarkastellaan kahden asteen lämpötilan nousun saavuttamista.

Hiilidioksidin ja typpioksiduulin pitoisuudet ovat kasvaneet tasaisesti koko mitausajan, mutta metaanin pitoisuus ilmakehässä on viime vuosina likimain vakiintunut, ja kuvan CFC-kaasujen pitoisuudet ovat kääntyneet jopa laskuun. Hiilidioksidin ja typpioksiduulin kasvussa ei näy taittumista eikä selvää muutosta ole odotettavissakaan Kioton sopimuksen lievien rajoitusten vuoksi, sillä kehittyville maille ei asetettu rajoitteita ja Yhdysvallat jättäytyi sopimuksen ulkopuolelle. Metaanin pitoisuuden vakiintumisen on arveltu johtuvan kehittyneiden maiden voimakkaista päästöjen vähennyksistä esimerkiksi kaatopaikoilla, hiilikaivoksissa ja öljykentillä (Savolainen et al. 2007), mutta viime vuosina metaanipitoisuus on kääntynyt uudelleen kasvuun. Kasvun syyt ovat vielä epävarmat, mutta todennäköisesti suurimmat päästöjen vähennykset kehittyneissä maissa on jo tehty, mutta kehittyvien maiden päästöt jatkavat edelleen kasvua, ja lämpeneminen kiihdyttää metaanin vapautumista esimerkiksi arktisilla alueilla. Positiivinen kehitys CFC-kaasujen osalta juontaa vuonna 1992 solmitusta Montrealin ilmastopöytäkirjasta, missä otsonikerrosta tuhoavien CFC-kaasujen käytöstä päätettiin luopua vaiheittain.

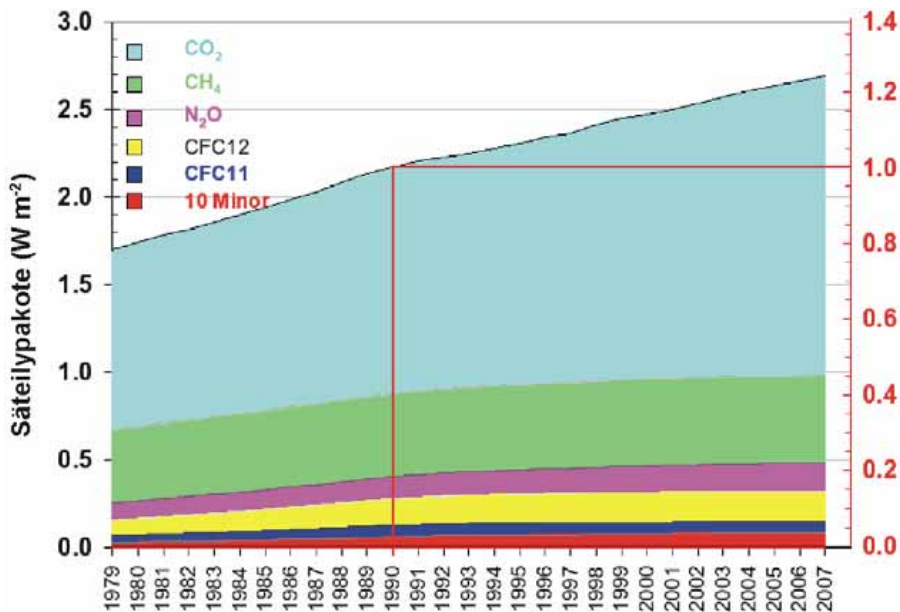
Kuva 4.1 Hiilidioksidin, typpioksiduulin, metaanin ja kahden CFC-kaasun pitoisuus ilmakehässä vuodesta 1978 vuoteen 2008. (NOAA annual greenhouse gas index).



Kasvihuonekaasujen lämmittävä vaikutus riippuu kaasusta. Hiilidioksidia on ilmakehässä merkittävästi enemmän kuin muita esitellyjä kaasuja, mutta esimerkiksi metaanin lämmittävä vaikutus massayksikköä kohti laskettuna on hiilidioksidiin verrattuna yli 20-kertainen, typpioksiduulin noin 300-kertainen ja osalla synteettisistä kaasuista lämmittävä vaikutus on yli 20 000-kertainen hiilidioksidiin verrattuna.

Ilmakehän kaasujen lämmittävä vaikutus voidaan suhteuttaa toisiinsa säteilypakotteen avulla. Säteilypakotteen yksikkö on wattia neliometriä kohden ja se kuvaa kaasun aiheuttamaa lämmittävää vaikutusta jokaisella neliometrillä maalla ja merellä. Koska maapallon pinta-ala on hyvin suuri, pienikin säteilypakote johtaa lämpenemiseen. Eri kaasujen yhteenlaskettu säteilypakote vuosina 1979–2007 on esitetty kuvassa 4.2.

Kuva 4.2 Merkittävimpien kasviuonekaasujen yhteenlaskettu säteilypakote vuosina 1979–2007. (NOAA annual greenhouse gas index).

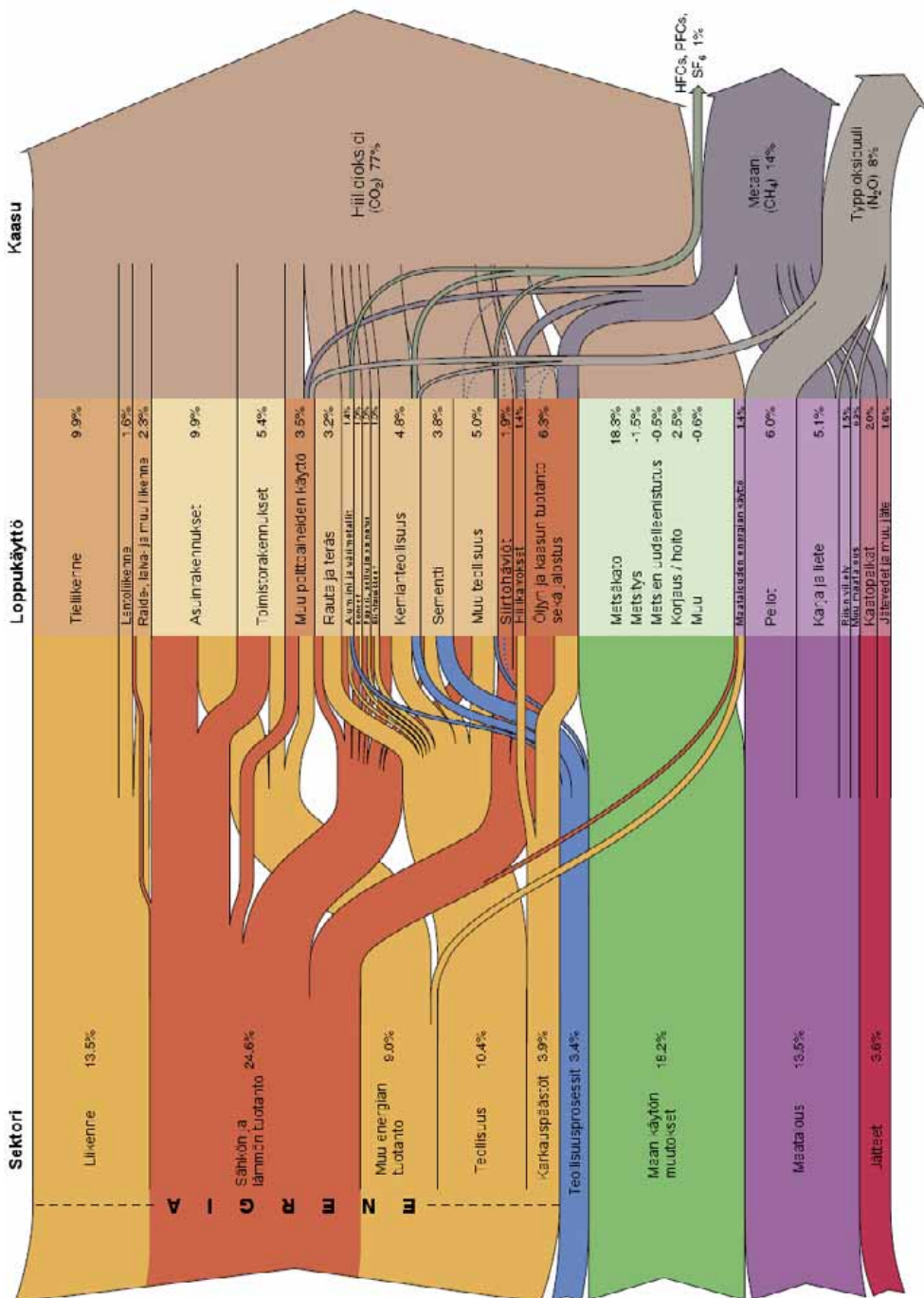


Valtaosa globaaleista hiilidioksidipäästöistä johtuu energian käytöstä ja muutoksista maankäytössä. Suurimmat metaanilähteet ovat metaanin muodostuminen jätehuollossa ja maataloudessa sekä päästöt öljykentiltä ja hiilikaivoksista. N₂O-päästöt ovat peräisin pääasiassa viljelysmaailta, mutta niitä syntyy myös energian käytössä ja jätehuollossa. Muut Kioton ja Montrealin pöytäkirjojen kaasut ovat peräisin teollisuudesta.

Kuvaan 4.3 on koostettu globaali sektorikohtainen tarkastelu Kioton pöytäkirjan kattamista kasviuonekaasuista ja niiden lähteistä. Kuvan vasemmassa laidassa päästölähteitä on tarkasteltu sektoreittain, keskellä loppukäytön perusteella ja oikeassa laidassa kasviuonekaasujen mukaan. Nuolet kuvan eri osien välillä kuvaavat tarkempia virtoja, ja niistä voi lukea, kuinka suuri osa esimerkiksi kemikaaliteollisuuden päästöistä syntyy sähkön ja lämmön tuotannossa, teollisuuden energian käytössä ja kuinka suuri osa teollisuusprosesseissa. Kemikaaliteollisuudesta lähtevät nuolet puolestaan kertovat eri kaasujen osuudet kemikaaliteollisuuden kokonaispäästöistä.

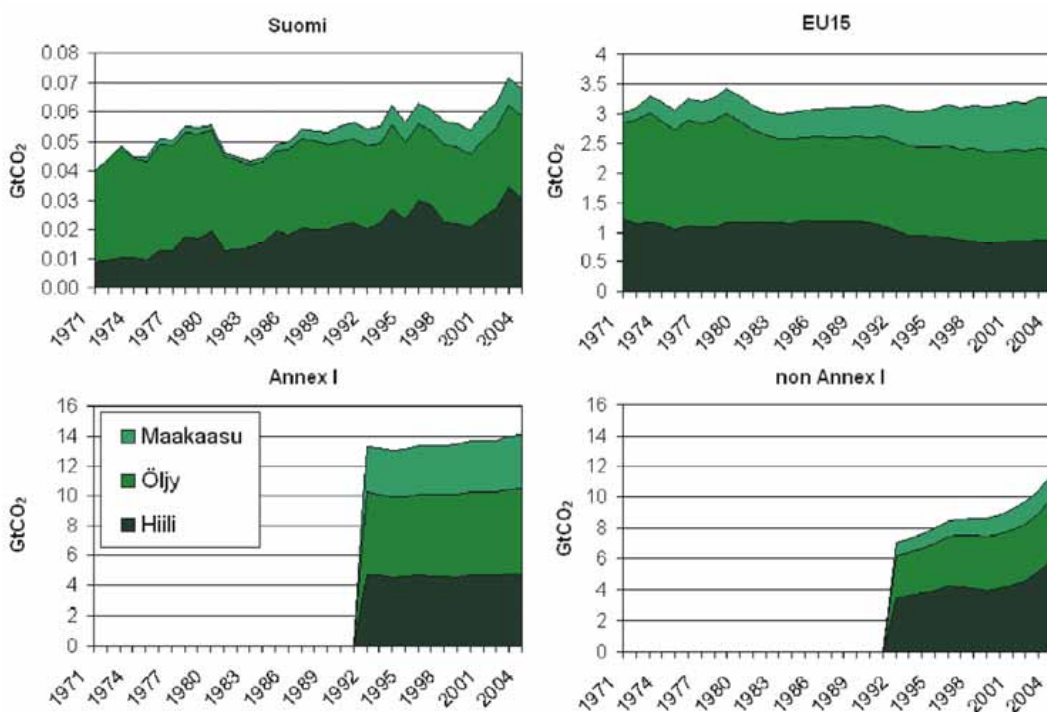
Suurin kasviuonekaasujen lähde on fossiilisten energianlähteiden valmistuksen ja polton päästöt, jotka yhteensä aiheuttavat miltei kaksi kolmasosaa kaikista päästöistä. Kuvan 4.3 mukaan liikenne tuotti 13,5 % kokonaispäästöistä, sähkön ja lämmön tuotanto 24,6 %, teollisuuden energiankäyttö 10,4 % ja muu energiasectori yhteensä 12,9 %. Energiankäytön jälkeen merkittävimmät lähteet ovat maankäyttö ja maanviljelys, joiden kokonaispäästöjen epävarmuus on suuri. Maankäytön päästöissä epävarmuus on merkittävän suuri, ja kokonaispäästöt voivat todellisuudessa olla puolet arvioidusta tai jopa kaksi kertaa suuremmat.

Kuva 4.3 Globaalit kasvihuonekaasupäästöt (paitsi CFCT) esitettyinä sektori-kohtaisesti, loppukäytön perusteella ja kasvihuonekaasuittain vuonna 2005. (Baumert et al. 2005).



Öljy on energiamäärältään eniten käytetty fossiilinen energianlähde, mutta sen käyttöä on nykyisellä tuotantokapasiteetilla huomattavasti vaikeampaa lisätä kuin hiilen tuotantoa. Lisäksi hiilen käyttöä suosivat laajat hiilivarat, varmuus saatavuudesta ja pieni hintariski. Näiden tekijöiden lisäksi hiilen aiheuttamat päästöt energiayksikköä kohden ovat suuremmat kuin öljyllä. Hiilen poltosta syntyvät globaalit päästöt nousivatkin öljyn polton päästöjä suuremmiksi jo vuonna 1995. Kuvassa 4.4 on esitetty Suomen, EU15:n, Kioton pöytäkirjan Annex I:n⁹ ja non Annex I:n CO₂-päästöt hiilen, öljyn ja maakaasun poltosta. IEA:n tilastoissa turpeen päästöt sisältyvät hiilen päästöihin.

Kuva 4.4 Maakaasun, öljyn ja hiilen poltosta aiheutuneet CO₂-päästöt Suomessa, EU15:ssä, Annex I:ssä (teollisuusmaat) ja non Annex I:ssä (kehitysmaat) [IEA].

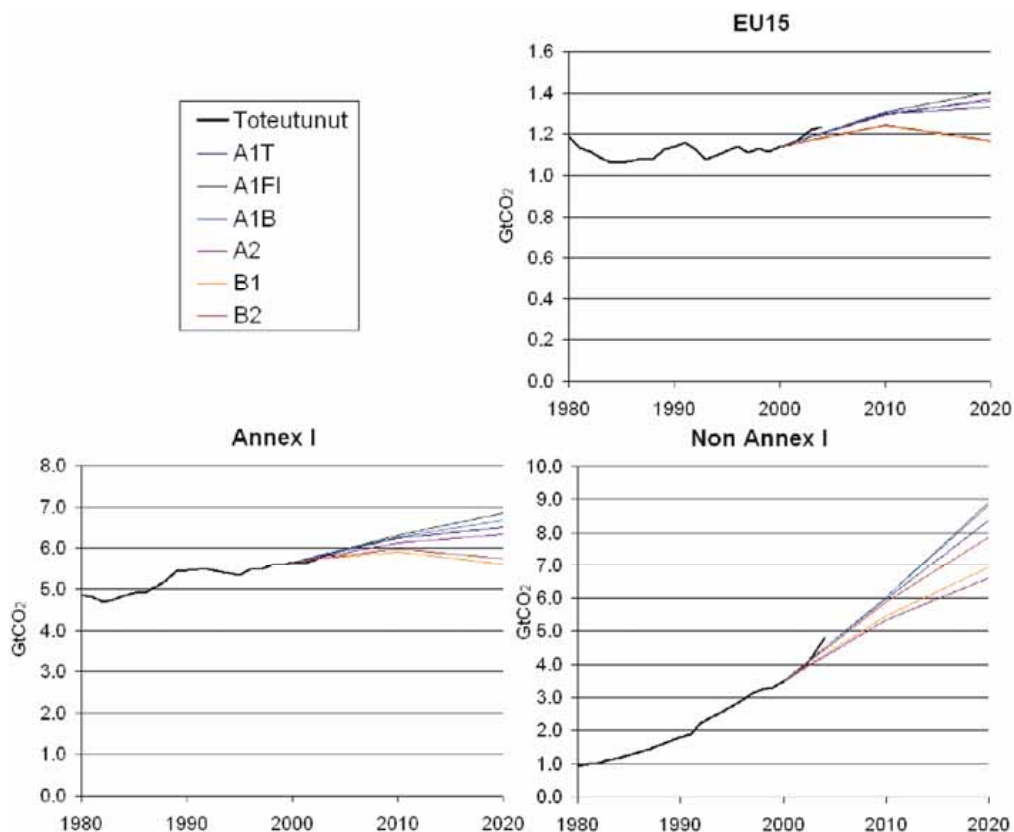


⁹ Annex I on ilmastopöytäkirjasta varten laadittu liite, joka listaa maat, joille ilmastopöytäkirja määrittelee kehittyneitä maita (teollisuusmaita) koskevat sopimusvelvoitteet. Näistä keskeisin on päästövähennysvelvoite. Vastaavasti liitteen I ulkopuolella (non-Annex I) ovat ns. kehittyvät maat (kehitysmaat), joita koskevat ilmastopöytäkirjan kaikkia osapuolia koskevat velvoitteet (esim. raportointivelvoite). Alkuperäinen jako on kohta jo 15 vuotta vanha ja sitä käytetään edelleen ilmastopöytäkirjassa huolimatta voimakkaasta talouskasvusta useissa kehittyvissä maissa. Käsillä olevassa selvityksessä maaryhmiin viitataan kehittyneinä ja kehittyvinä maina.

IPCC on skenaarioissaan pyrkinyt arvioimaan päästöjen kehitystä seuraavan viidenkymmenen ja sadan vuoden aikana, mutta tulevaisuuden ennakoiminen pitkällä aikavälillä on aina äärimmäisen haastavaa. Tästä epävarmuudesta johtuen IPCC on ottanut mukaan skenaarioita myös fossiili-intensiivisestä kehityksestä ja uusiutuvien energioiden ääripäistä. Skenaariot kattavat merkittävimmät kasvi-huonekaasut ja niiden lähteet, mutta epävarmuudet eri lähteissä ovat hyvin erisuuruisia. Sähkön ja lämmön tuotannon päästöjen ennustaminen on suhteellisen helppoa, sillä energian käyttö on yleensä parhaiten tilastoitu ja energia-sektorin sisällä sähkön ja lämmön tuotannossa muutokset tapahtuvat hitaimmin. Siksi onkin kiinnostava verrata miten IPCC:n skenaariot suhtautuvat lähivuosien kehitykseen.

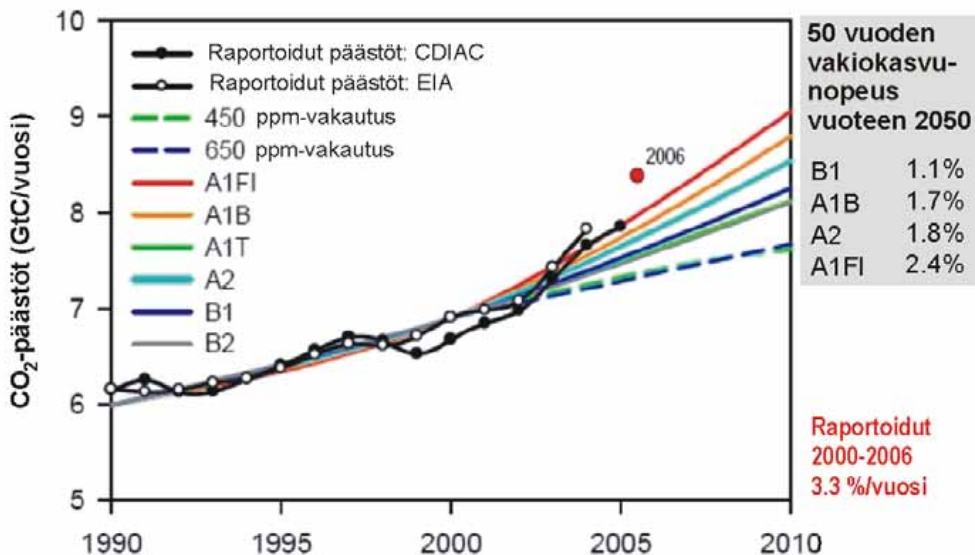
Sähkön tuotannon päästöistä kehittyneissä maissa on käytettävissä tilastoja vuoteen 2004 asti, ja IPCC:n skenaarioissa viimeinen tilastovuosi on 2000. Tapahtunut kehitys ja ennusteet on piirretty kuvaan 4.5. Sähköntuotannon päästöt ovat kasvaneet huomattavasti ennustettua nopeammin EU15:ssa ja Kioton pöytäkirjan Non-Annex I -maissa eli kehittyneissä maissa. Annex I -maiden eli kehittyneiden maiden kokonaispäästöt ovat kasvaneet ennusteiden rajoissa. Toteutuneet päästöt on otettu WRI:n CAIT tietokannasta ja IPCC:n skenaariot SRES-raportista. Näiden tietokantojen välillä oli eroavaisuuksia, ja vuoden 2000 päästömäärät erosivat hieman. Kuvassa 4.5 vuoden 2000 päästöt on sovitettu samalle tasolle, jotta päästöjen kehitystä ja skenaarioita olisi helpompi vertailla. Myös viitteen Zeng et al. (2008) tiedot tukevat johtopäätöstä Non-Annex I -maiden päästöjen voimakkaasta kasvusta. Kiinan hiilidioksidipäästöt kasvoivat vuosina 2002–2006 noin tasosta 1,0 GtC /vuosi tasolle 1,6 GtC /vuosi (Zeng et al. 2008), noin 15 % vuodessa.

Kuva 4.5 Toteutuneet kasvihuonekaasupäästöt sähkön ja lämmön tuotannossa verrattuna IPCC:n skenaarioihin EU15:ta, Annex I:ssä ja Non-Annex I:ssä (CAIT ja IPCC 2000). Kehittyvien, non-Annex I, maiden päästöt ovat IPCC:n skenaarioita voimakkaammassa kasvussa tarkasteluilla sektoreilla.



Myös Raupach et al. (2007) ovat verranneet toteutunutta päästöjen kehitystä IPCC:n raportoihin skenaarioihin (Kuva 4.6). Tämänkin tutkimuksen mukaan päästöt kasvavat nopeammin kuin skenaarioissa on arvioitu.

Kuva 4.6 Globaalien hiilidioksidipäästöjen kehityksen toteumaa kuvaavien arvioiden (CDIAC, EIA ja Biopact) sekä skenaarioiden mukaan (Raupach et al. 2007). Toteutuneet globaalit päästöt ovat ylittämässä IPCC:n skenaarioiden tason. (http://biopact.com/2007_10_21_archive.html).

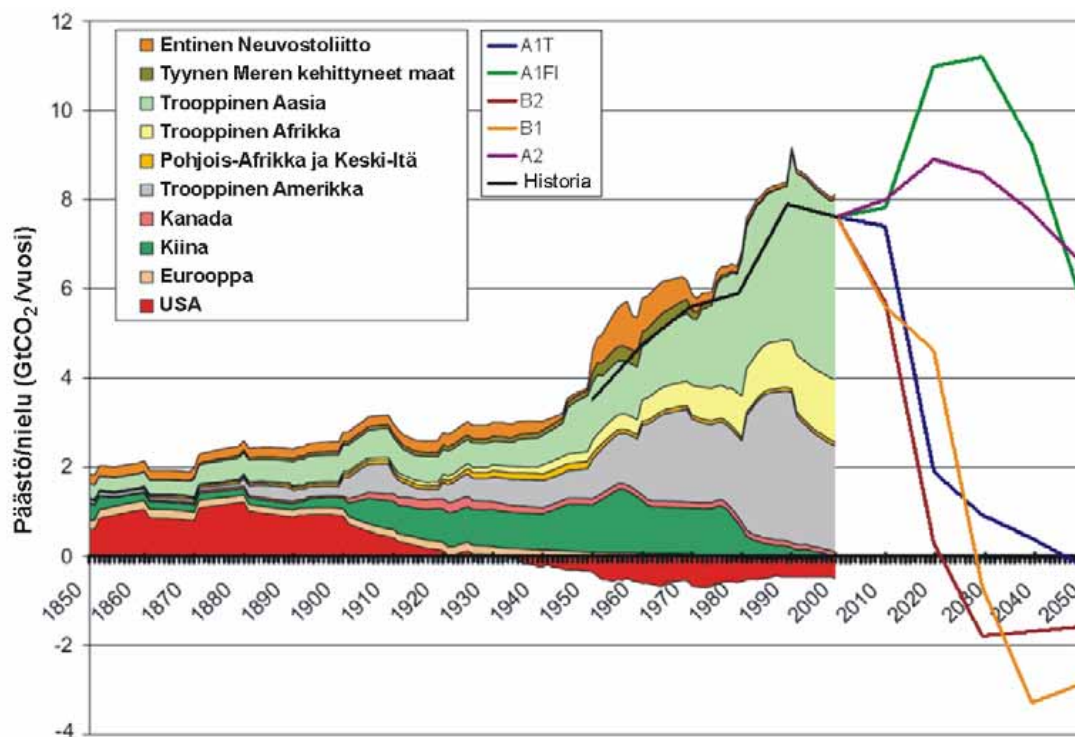


Maankäytön päästöjen epävarmuus on suurempi kuin muissa lähteissä, mutta niiden osuus kokonaispäästöistä oli yli 18 % vuonna 2005, joten niidenkin kehitystä on ennustettava. Kuvassa 4.7 on esitetty arvio maankäytön historiallisista päästöistä ja viisi IPCC:n skenaarioennustetta tulevasta kehityksestä.

Yhdysvaltojen päästöt maankäytöstä ovat olleet negatiivisia jo 1930-luvulta, eli metsiin ja maaperään on sitoutunut enemmän hiiltä kuin siitä on vapautunut. Myös Eurooppa ja Kiina ovat onnistuneet saamaan maankäytön taseen negatiiviseksi. Samaan aikaan kaikkien maiden kokonaispäästöt ovat kumminkin kasvaneet merkittävästi. Hiiltä vapautuu valtavia määriä Aasian, Afrikan ja Amerikan sademetsissä eivätkä nykyiset biopolttoainetavoitteet ainakaan hidasta tätä kehitystä. Jos maankäytön päästöt laskettaisiin kulutusperusteisesti, historiallinen kehitys voisi näyttää hyvin erilaiselta.

IPCC:n skenaarioiden arviot maankäytön tulevaisuuden päästöistä vaihtelevat valtavasti. Vuonna 2030 ero ääripäiden välillä on yli 12 gigatonnia hiilidioksidia vuodessa, mikä vastaa neljännestä vuoden 2000 kokonaispäästöistä. Tällä hetkellä ylemmät ennusteet näyttävät todennäköisemmiltä, mutta voimakkailla suojelutoimilla, energian säästöllä sekä selkeillä kestävyysperiaatteilla ruoan, rakennusmateriaalin ja polttoaineiden tuotannossa voi olla mahdollista päästä lähelle kolmea alemmaa skenaariota.

Kuva 4.7 Maankäytön historialliset päästöt (Houghton ja Hackler 2002) ja IPCC:n skenaarioennusteet (IPCC 2000).



5 MINKÄLAISIA SUOMEN PÄÄSTÖTAVOITTEITA KAHDEN ASTEEN TAVOITE VASTAA

Ilmastonmuutoksen hillintä ja kasvihuonekaasujen päästöjen rajoittaminen vaatii yhteistyötä kaikkien merkittävien päästöjä aiheuttavien maiden kesken, jotta saavutettaisiin kokonaisuutena riittävän suuria päästöjen vähennyksiä ja jotta päästöjen rajoitukset eivät kohtuuttomasti vaikuttaisi maiden väliseen kilpailukykyyn ja aiheuttaisi merkittävää hiilivuotoa. Kansainväliseen yhteistyöhön pyritään sopimusten avulla.

Maat ovat hyvin erilaisessa asemassa henkisten ja taloudellisten voimavarojen sekä teknologian suhteen. Päästörajoituksista sopiminen vaatii tällöin sitä, että pystytään ottamaan huomioon eri osapuolten tarpeet ja mahdollisuudet. Päästöjen rajoittamisen velvollisuudet jakautuvat siten tuskin tasan päästönvähennysprosentteilla mitattuna.

Päästöjen rajoitusten jakautumista eri maille ja maaryhmille tarkastellaan usein kahdesta eri näkökulmasta. Toisaalta lasketaan, mikä olisi kustannusoptimaalinen tapa jakaa päästöjen rajoitustoimenpiteet eri maiden kesken, ja toisaalta, mikä olisi oikeudenmukainen ja reilu tapa jakaa päästöjen vähentämisvelvoitteet. Nämä näkökulmat voidaan yhdistää niin, että päästöjen rajoittamisen velvoitteet jaetaan oikeudenmukaisella tavalla, mutta rajoitukset toteutetaan kustannusoptimaalisesti käyttäen toimenpiteiden kohdistamisessa markkinamekanismeja, kuten päästökauppaa ja nykyisen puhtaan kehityksen mekanismin kaltaisia lähestymistapoja.

5.1 Yleistä velvoitteenjaosta ja sen periaatteista

YK:n ilmastopöytäkirjaan sitoutuneet maat käyvät neuvotteluja päästöjen rajoittamisesta. Joulukuussa 2007 pidetyn Balin ilmastokokouksen ns. tiekartan mukaan sopua uudesta Kioton velvoitekauden jälkeistä aikaa koskevasta ilmastopöytäkirjasta tavoitellaan Kööpenhaminan ilmastokokouksessa 2009 (UNFCCC 2007). Voimassa olevan kansainvälisen juridiikan mukaan sopijapuolina sitovista päästövähennysvelvoitteista voivat olla vain maat tai maaryhmät (esim. EU), mutta eivät toimialat tai teollisuusorganisaatiot, jotka toimivat valtioiden kansallisen lainsäädännön alla (Kulovesi & Keinänen 2006).

Velvoitteenjaolla voidaan tarkoittaa sitä, miten päästöjen rajoittamis- ja vähentämisvelvoitteet, niiden kustannukset, sopeutumisen kustannukset tai ilmastonmuutoksen vaikutuksista aiheutuvat kustannukset jaetaan eri maiden kesken. Yleensä velvoitteenjaolla tarkoitetaan päästöjen rajoittamis- ja vähentämisvelvoitteiden jakamista erilaisten periaatteiden mukaisesti (Siikavirta 2005).

Velvoitteenjaossa keskeinen tekijä on oikeudenmukaisuus. Sen erilaiset ulottuvuudet muodostavat velvoitteenjaolle vaihtoehtoisia ohjaavia periaatteita. Velvoitteenjaossa voidaan pyrkiä oikeudenmukaiseen jakoon (suvereniteetti, egalitarismi, historiallinen vastuu), lopputulokseen (maksukyky) tai prosessiin (konsensus). Oikeudenmukaisuuden erilaiset ulottuvuudet ovat helposti ainakin osittain ristiriidassa keskenään, joten riippuu tulkitsijasta, mikä on kenenkin mielestä oikeudenmukaista. Ajatus ihmisten samanarvoisuudesta asettaa kuitenkin oikeudenmukaisuuden tulkinnalle tiettyjä raameja.

Velvoitteenjako voidaan suorittaa periaatteessa kahdella eri lähestymistavalla: neuvottelemalla eri maiden tai maaryhmien esittämien tavoitteiden pohjalta tai käyttämällä systemaattista menettelyä eri maiden tavoitteiden asettamisessa. Käytännössä tullaan todennäköisesti käyttämään näiden yhdistelmää. Systemaattinen menettely voi edelleen jakautua tietyistä periaatteista lähtevään menettelyyn (top-down) tai päästöjen vähennyskeinoista ja potentiaaleista lähtevään menettelyyn (bottom-up). Näitä voidaan pitää toisiaan täydentävinä menettelyinä. (Siikavirta 2005)

Velvoitteenjakoon on esitetty eri tahojen toimesta useita erilaisia ehdotuksia, jotka perustuvat yhteen tai useampaan kriteeriin ja vaihtelevat hyvin yksinkertaisista lähestymistavoista huomattavasti monimutkaisempiin. Vain yhteen kriteeriin perustuvien velvoitteenjakomenetelmien kohdalla käytetään usein termiä velvoitteenjakoperiaate, kun taas useampia kriteereitä sisältävät menetelmät mielletään usein velvoitteenjakomalleiksi. Tietyn periaatteen mukainen ja tiettyyn oikeudenmukaisuuden ulottuvuuteen pyrkivä velvoitteenjako (esim. kustannukset/maksukyky) voi yksinkertaisesta määrittelystään huolimatta vaatia huomattavan määrän tietoa ja hyvinkin monimutkaisia malleja tuekseen.

Velvoitteenjaossa käytettävän tiedon tulisi olla luotettavuudeltaan yleisesti hyväksyttävää ja kriittisen käsittelyn kestävästi läpinäkyvää. Tämä taas on helposti ristiriidassa monimutkaisen ratkaisun vaativien velvoitteenjakoperiaatteiden läskennan kanssa. Yksinkertaisten velvoitteenjakomenetelmien (esim. per capita, vähennä ja lähennä) hyvänä puolena on tiedon läpinäkyvyys ja parempi luotettavuus verrattuna monimutkaisempiin menetelmiin, kuten triptyykki tai kustannukset/maksukyky. Sijm et al. 2007 listasivat erityisesti EU:n vuoden 2012 jälkeistä aikaa koskeviksi velvoitteenjakovaihtoehtoiksi:

- Perintömenettely (grandfathering), jossa kaikille maille annettaisiin sama suhteellinen päästötavoite tiettyyn historialliseen vuoteen (esim. 1990) nähden
- Päästöt per capita -lähentyminen (Per capita convergence)
- Useisiin kriteereihin perustuva lähentyminen (Multi-criteria convergence), jossa päästövähennysvelvoitteet määräytyisivät BKT/capita, päästöt/capita ja päästöt/BKT -pohjalta

- Maksukyky (Ability to pay), jossa päästövähennysvelvoitteet määräytyisivät BKT/capita perusteisesti
- (Laajennettu) Triptyyksi (The (extended) Triptych approach), missä sovelletaan useita eri sektori- ja teknologiakriteereitä
- Yhtäläiset päästövähennyskustannukset (Equal mitigation costs), missä velvoitteenjako suoritettaisiin siten, että maiden päästövähennyskustannukset olisivat yhtäläiset (suhteutettuna maksukykyyn, esimerkiksi BKT:hen)

Yksinkertaisten velvoitteenjakomenetelmien merkittävimpana heikkoutena voidaan pitää niiden rajoittunutta tai hyvin rajoittunutta kykyä huomioida maakohtaisia ominaispiirteitä. Monimutkaisemmatkaan velvoitteenjakomenetelmät eivät välttämättä kykene huomioimaan maiden ominaispiirteitä realistisesti. Soimakallio et al. 2006 arvioivat Ecofysin kehittämän globaalin triptyykkimallin (versio 6.0), joka on yksi monimutkaisimmista velvoitteenjakoehdotuksista, soveltuvuutta maakohtaiseen velvoitteenjakoon. Raportissa todetaan, että keskeisiä kysymyksiä, heikkouksia ja kehitystarpeita ovat mm. yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon kuvaustapa, vertailuvuoden valinta, energia-intensiivisen ja muun teollisuuden käsittely yhtenä ryhmänä, per capita päästöjen käyttö ainoana laskentaparametrina muiden kuin energiantuotannon ja teollisuuden osalta sekä keskeisten parametrien kiinnitys ja tarkastelun teko tältä pohjalta ilman kustannus/taloustarkastelua (Soimakallio et al. 2006).

Velvoitteenjaon oikeudenmukaisuudella on useita ulottuvuuksia, jotka voivat poiketa toisistaan paljonkin. Keskenään ristiriidassa olevien kriteerien soveltaminen velvoitteenjaon perusteena johtaa siis väistämättä erilaiseen velvoitteenjakoon. Lisäksi tiettyyn oikeudenmukaisuuden ulottuvuuteen pyritessä saatetaan velvoitteenjakokriteeriä soveltaa virheellisesti tavoiteltavaan ulottuvuuteen nähden. Esimerkiksi pyritessä rajoittamaan kansakuntien asukkaiden aiheuttamat päästöt yhtäläisiksi (päästö per capita lähentymiskriteeri), saatetaan laskentakriteerissä soveltaa maiden tuotantoperusteisia päästöjä, mikä johtunee ainakin osittain kulutusperusteisen päästötiedon puutteesta. Tällöin jää kuitenkin huomaamatta maiden ja niiden kansalaisten keskimääräiset kulutusperusteiset päästöt, jolloin velvoitteenjako rankaisee paljon päästöintensiivisiä tuotteita vieviä maita epätarkoituksenmukaisesti. Riittävän laaja-alainen ja kattava globaali päästökauppajärjestelmä poistaisi tämän ongelman, sillä tällöin päästöjen hinta voitaisiin sisällyttää tuotteiden hintoihin. Eri kansakunnilla ja kansalaisilla on kuitenkin aivan erilainen maksukyky. Päästöjen sisällyttäminen tuotteiden hintoihin voisikin aiheuttaa negatiivisimmat seuraukset kaikkein köyhimmille. Velvoitteenjaon oikeudenmukaisuutta pohdittaessa tulisikin huomioida seuraukset toisaalta toimijoiden ja toisaalta kansalaisten kannalta.

Mahdollisimman hyvin maiden ominaispiirteitä ja niiden kykyä osallistua päästöjen vähennyksiin jäljittelevien velvoitteenjakomenetelmien keskeisimpänä ongelmana on menetelmien läpinäkyväisyys sekä tiedon saatavuus ja luotet-

tavuus. Esimerkiksi pyrittäessä velvoitteenjakoon, jossa maille aiheutuisi yhtäläiset kustannukset niiden maksukykyä kohden, joudutaan tunnistamaan mm. maiden talouden rakenne, ympäristöteknologian taso, luonnonvaraperusta, päästöjä vähentävien teknologioiden kustannukset sekä näiden että talouden ja väestön kehityssennusteet. Näihin tekijöihin liittyy paljon tietoaukkoja ja epävarmuuksia, mikä rajoittaa tällaisten menetelmien sovellettavuutta. Siitä huolimatta ne tuovat tärkeää näkökulmaa kansainvälisiin velvoitteenjakokeskusteluihin. Koska mikään velvoitteenjakomenetelmä ei ole aukoton, olisikin tärkeää, että velvoitteenjakoa analysoitaisiin mahdollisimman monipuolisesti hyödyntäen erilaisia kriteereitä ja lähestymistapoja.

5.2 Esimerkkejä velvoitteenjakoperiaatteista

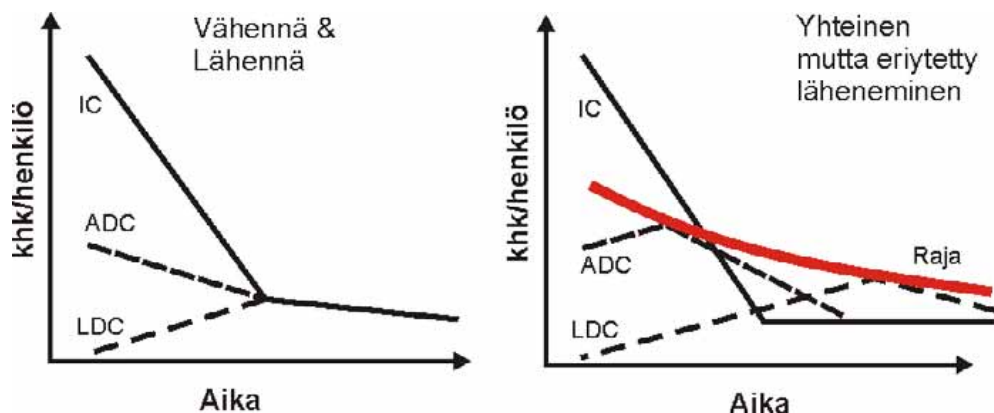
Yksinkertaiseen kriteeriin (esim. päästöt per capita) perustuva velvoitteenjako voidaan laskea maakohtaisesti hyvin helposti esimerkiksi vain tilastotietojen perusteella ilman erillistä mallia. Sen sijaan monimutkaisempia laskentoja vaativien kriteerien käyttö vaatii tuekseen tarkoitusta varten kehitetyn tai muuten siihen soveltuvan laskentamallin.

Varsinaisesti velvoitteenjakoa varten on toistaiseksi kehitetty vain kaksi mallia: FAIR (den Elzen and Lucas 2003, den Elzen 2005) ja EVOC (Höhne et al. 2003). Molemmilla malleilla voidaan nykyään laskea maakohtaisia päästötavoitteita yhteensä 192 eri maalle. Velvoitteenjakoperiaatteina malleissa voidaan tarkastella ainakin 'Vähennä ja lähennä', 'Yhteinen, mutta eriytetty lähentyminen', 'trip-tyyppi' ja 'monitasomalli' -lähestymistapoja. FAIR-mallissa voidaan tarkastella myös muutamia muita lähestymistapoja, kuten Brasilian ehdotusta ja päästötensiteettitavoitteita. EVOC-mallissa ei ole kytkentää päästöjen vähentämisestä tai velvoitteenjaosta aiheutuviin kustannuksiin, joten kustannuksiin perustuvaa velvoitteenjakoa tai velvoitteenjaon taloudellisia seurauksia ei voida mallilla analysoida lainkaan. FAIR-mallilla voidaan laskea päästövähennyskustannukset 51 eri maalle käyttäen marginaalikustannuskäyriä, jotka on mallissa annettu 17 eri alueelle.

'Vähennä ja lähennä' sekä 'Yhteinen, mutta eriytetty lähentyminen'

'Vähennä ja lähennä' -mallin (Contraction & Convergence, C&C) kehitti alun perin Global Commons -instituutti (GCI) vuonna 1990. Malli perustuu ajatukselle, jossa jokaisella maalla on oikeus yhtäläisiin asukasta kohden laskettuihin päästöihin. Mallin perusperiaatteena on, että kaikki maat hyväksyvät tietyn ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden vakauttamistavoitteen ja siihen johtavan päästökehityspolun. Tämän jälkeen sallitut globaalit vuosittaiset päästöt jaetaan eri maiden kesken per capita -periaatteella siten, että jokaisen maan sallitut asukasta kohden lasketut päästöt ovat yhtä suuret tietyntä tulevaisuuden vuotena. C&C-menetelmän periaate on esitetty kuvassa 5.1.

Kuva 5.1 Vähennä ja lähennä (Contraction & Convergence, C&C) sekä Yhteinen, mutta eriytetty lähentyminen (Common but differentiated convergence (CDC) -menetelmien asukasta kohden laskettujen kasvihuonekaasupäästöjen kehityksen periaate (Höhne et al. 2005).



C&C-menetelmän vahvuuksina voidaan pitää kokonaisvaltaisuutta (kaikki maat osallistuvat) sekä yksinkertaista ja läpinäkyvää veloitteenjakoperiaatetta, missä sitovat päästövähennysveloitteet eli sallitut päästötasot johdetaan hiilidioksidipitoisuuksien vakauttamistasoista. Näin ollen menetelmän ympäristövaikuttavuus on myös hyvä. Lisäksi se tarjoaisi köyhille maille kannusteen osallistua päästörajoituksiin ja hillitä päästöjen kasvua sekä kustannustehokkaan tavan rajoittaa globaaleja päästöjä, koska kaikki maat osallistuisivat sitoviin päästövähennysveloitteisiin, ja päästökaupan kautta päästövähennykset kohdistettaisiin edullisimpiin kohteisiin. Menetelmä ei kuitenkaan huomioi mitään muita kansallisia ominaispiirteitä kuin nykyiset asukasta kohden lasketut päästöt. Lisäksi vähiten kehittyneiden maiden aikainen mukaantulo sitoviin veloitteisiin aiheuttaisi todennäköisesti ongelmia päästöjen raportoinnissa ja sopimusmallin hyväksymisessä.

Ecofysin kehittämä 'Yhteinen, mutta eriytetty lähentyminen' -malli (CDC) on jalostettu C&C-menetelmästä siten, että teollisuusmaille kiinnitetään eri aikajänne ja ehdot kuin kehitysmailla (kuva 5.1). Toisin sanoen CDC-menetelmän periaatteena on, että kehittyneiden maiden (Annex I) asukasta kohden lasketut päästöt vähenevät alhaiselle tasolle ja lähenevät toisiaan muutaman vuosikymmenen päästä. Kehittyvien maiden (non-Annex I) asukasta kohden lasketut päästöt lähenevät samalle tasolle saman aikajakson aikana, mutta asukasta kohden laskettujen päästöjen pienenemistä vaaditaan vasta, kun näiden maiden asukasta kohden lasketut päästöt ovat muutaman prosentin globaalin keskiarvon yläpuolella, mikä toimii kynnyksenä siirtyä sitoviin päästövähennysveloitteisiin (alenee ajan myötä). Siihen asti maat voivat vapaaehtoisesti ottaa positiivisesti

sitovia tavoitteita. Tällä mekanismilla vähiten kehittyneiden maiden, kehittyneempien kehitysmaiden ja teollisuusmaiden ajallinen osallistuminen sitoviin päästöjen vähennyksiin eriytetään toisin kuin C&C-menetelmässä.

Triptyykki

Alun perin triptyykki-velvoitteenjakomalli kehitettiin hollantilaisen konsulttiryhmän toimesta (Blok et al. 1997) jakamaan EU:n sisäinen päästövähennysvaatimus Kioton ensimmäiselle velvoitekaudelle EU:n jäsenmaiden kesken. EU hyödynsi mallia ennen Kioton sopimusta tehdyssä alustavassa velvoitteenjaossa. Mallissa huomioitiin vain polton CO₂-päästöt, jotka jaettiin kolmelle päästösektorille: sähköntuotanto, energiantensiivinen teollisuus ja kotimainen sektori. Sittemmin triptyykki-mallista on kehitetty monia erilaisia versioita, jotka sisältävät mm. useampia kasvihuonekaasuja, maita tai sektoreita. Monet niistä on kehitetty jakamaan päästövähennysvaatimuksia Kioton ensimmäisen velvoitekauden jälkeiselle ajalle.

Hollantilainen konsulttiryhmä (Phylipsen et al. 2004) julkaisi loppuvuodesta 2004 uuden version triptyykki-mallista (Triptych 6.0), joka yhdistää erilaisten triptyykki-lähestymistapojen metodologiaa. Tämä uusi globaali triptyykkimalli on huomattavasti alkuperäistä versiota moniulotteisempi. Mallilla voidaan laskea maa-kohtainen päästövähennystavoite 192 eri maalle vuoteen 2100 saakka. Malli kattaa kaikki Kioton pöytäkirjassa tarkasteltavat kasvihuonekaasut ja asettaa tavoitteet sektoreittain 6–7:lle eri päästösektorille: sähköntuotanto, teollisuus, fossiilisten polttoaineiden tuotanto, maatalous, jäte ja muu kotimainen sektori sekä maankäytön muutokset (vapaavalintainen). Mallissa eri sektoreiden päästöt lähentyvät tiettyjen kriteerien mukaan.

Vuonna 2007 mallista on kehitetty uusi versio, Triptych 7, jonka keskeisimpänä erona edeltäjiinsä nähden on maiden eriytetty osallistumisaikataulu sitoviin päästövähennysvelvoitteisiin (den Elzen 2007). Näin ollen Triptych 7 -malli on eräänlainen sovellus monivaihemallista (ks. seuraava kappale). Triptych 7 -mallissa on myös toteutettu joitakin menetelmällisiä muutoksia edeltäjiinsä verrattuna, perustuen mm. Soimakallio et al. 2006 -raportin arvioihin Triptych 6.0 -mallin heikkouksista, mutta pääosin keskeisiä puutteita ei ole parannettu.

Monivaihemalli

Kehitys- ja teollisuusmaiden kykeneväisyys ja velvollisuus vastata ilmastonmuutoksen torjunnan haasteeseen on hyvin erilainen. Sen vuoksi mikään yksittäinen kriteeri, joka asettaa maat samalle lähtöviivalle, ei ole välttämättä poliittisesti realistinen. Sitovien velvoitteiden porrastusta tuskin voidaan välttää, mikä tekee ns. monivaihemallin tarpeelliseksi.

Erilaisia ehdotuksia monivaihemalleista ovat esittäneet mm. Gupta 1998 ja 2003, den Elzen et al. 2003 ja 2007, Höhne et al. 2003 ja 2005, Michaelowa et al. 2003, Criqui et al. 2003, Ott et al. 2004. Ehdotukset eroavat toisistaan mm. tarkasteltavien tasojen määrän, siirtymäfunktioiden tyypin ja käytettävien päästöjen rajoittamiskriteerien perusteella.

Höhne et al. 2005 -raportin ehdottamassa monivaihelähestymistavassa maat jaettaisiin eri vaiheisiin asukasta tai bruttokansantuotetta kohden laskettujen päästöjen perusteella. Maiden sijoittuminen eri vaiheisiin tarkistettaisiin kymmenen vuoden välein. Vaiheessa 1 (ei velvoitteita) olisivat kehittymättömimmät ja köyhimmät maat. Vaiheen 2 mailta vaadittaisiin kestävän kehityksen tavoitteet ja ohjelmat, joita seurattaisiin. Vaiheissa 3 (maltilliset päästötavoitteet) ja 4 (ehdottomat päästökiintiöt) olisivat voimakkaasti kehittyvät maat ja nykyiset kehittyneet maat (Annex 1). Triptyykkiin pohjautuvaa päästökiintiöiden asettamista valtioille on mahdollista käyttää vaiheille 3 ja 4. Vaiheet 3 ja 4 on myös mahdollista yhdistää vain yhdeksi vaiheeksi, jossa nopeimmin kasvavat maat voivat aluksi kasvattaa päästöjään.

Monivaihemallin ajatuksena on, että kynnys siirtyä alemmalta tasolta ylemmälle alenisi jatkuvasti, jotta lopulta kaikki maat olisivat mukana sitovissa päästöjen vähentämisvelvoitteissa ja jotta haluttu CO₂-tavoitetaso saavutettaisiin. Höhne et al. 2005 ehdotuksessa maiden siirtäminen suoraan jonkun tason yli (esim. tasolta 1 tasolle 3) voidaan estää esimerkiksi siten, että maan tulee olla vähintäänkin yksi kymmenvuotiskausi tietyllä tasolla ennen kuin se voidaan siirtää seuraavalle tasolle.

Monivaihemallin keskeiset tekijät ovat halutun CO₂-tavoitetason ja sen määräämän globaalin päästöpolun lisäksi tapa, jolla maat jaetaan eri vaiheisiin, joilla maat siirtyvät alemmalta tasolta ylemmälle sekä tapa, jolla päästökiintiöt jaetaan. Vaihejaottelussa ja siirtymisen kynnyssehtoina voidaan käyttää esimerkiksi asukasta tai bruttokansantuotetta kohden laskettuja päästöjä tai näitä molempia. Päästökiintiöiden jaossa voidaan käyttää esim. C&C-, CDC- tai triptyykkimenetelmää. Nämä tekijät määräävät yhdessä sen, kuinka tiukkoihin tai löyhiin päästövähennysvaatimuksiin monivaihemalli eri maiden kannalta johtaa.

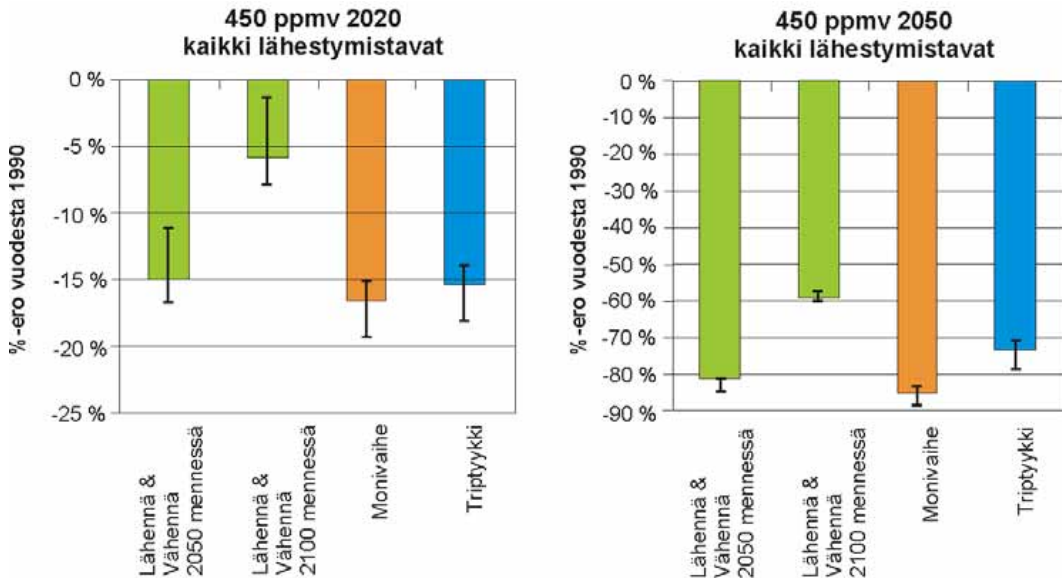
5.3 Esimerkkejä Suomen päästövähennystavoitteista

Suomea koskevia päästövähennystavoitteita erilaisista veloitteenjakovaihtoehtoista on esitetty varsin vähän, sillä julkaistuja kvantitatiivisia ehdotuksia on yleensä esitetty vain päästöiltään suurille maille. YM:n Ecofysiltä, VTT:ltä ja VATT:lta tilaamassa työssä tarkasteltiin lähinnä Triptyyksi-menetelmän soveltuvuutta Suomen ominaispiirteiden kuvaamiseen (Soimakallio et al. 2006), mutta raportissa esitettiin myös 450 ppmCO₂ -skenaarion mukaiset päästövähennystavoitteet Suomelle käyttäen muitakin EVOC-mallin veloitteenjakokriteereitä (kuva 5.2). Veloitteenjakomenetelmistä 'Vähennä ja lähennä', jossa päästöjen yhdentymisvuosi on asetettu kauas vuoteen 2100, tuottaa Suomen kannalta löysimmän päästövähennystavoitteen. Kaikki muut menetelmät tuottavat selvästi tiukemman ja keskenään suhteellisen vähän eroavan päästövähennystavoitteen (kuva 5.2).

Vastaavassa 450 ppmCO₂ -skenaariossa ja vastaavilla veloitteenjakomenetelmillä EU25-maiden yhteinen tavoite on veloitteenjakomenetelmästä ja talouden kehitysennusteesta riippuen vuodelle 2020 välillä -17 %...-34 % ja vuodelle 2050 välillä -70 %...-85 % (Höhne et al. 2005). Euroopan parlamentti on ehdottanut EU:n päästötavoitteeksi -30 % vuonna 2020 ja -60...-80 % vuonna 2050 verrattuna vuoteen 1990 (COM 2007). Välitavoitteenaan EU sitoutuu vähentämään yksipuolisesti päästöjään 20 % vuoteen 2020 mennessä vuoteen 1990 verrattuna, kunnes saadaan aikaiseksi kansainvälinen ilmastopöytäkirja, jossa muutkin teollisuusmaat sitoutuvat ottamaan EU:n kanssa vastaavansuuruisia päästövähennystavoitteita.

Tammikuussa 2008 EU julkaisi laajan energia- ja ilmastopaketin, jossa komissio ehdottaa, että päästökauppa- ja sen ulkopuolelle jäävät päästöt käsitellään erillisinä kokonaisuuksina (COM 2008a ja COM 2008b). Komissio ehdottaa päästökaupan ulkopuolelle jäävän ns. kansallisen osuuden päästövähennystavoitteiden veloitteenjaoksi eräänlaista maiden maksukykyyn pohjautuvaa menetelmää, jossa lisäksi päästöjen sallittu muutos vuodesta 2005 vuoteen 2020 mennessä on rajoitettu ± 20 %:iin. Suomen kansalliseksi päästötavoitteeksi vuodelle 2020 komission ehdotus antaa -16 % vuoteen 2005 verrattuna (COM 2008b).

Kuva 5.2 Suomen päästövähennystavoitteet 450 ppmCO₂ -skenaariossa vuonna 2020 ja 2050 Ecofysin EVOC-mallin mukaisissa velvoitteenjakovaihtoehdoissa. Palkkien virhemarginaali osoittaa eri kehitysennusteiden (IPCC:n SRES-skenaariot) aiheuttaman vaihteluvälin (Soimakallio et al. 2006). Vähennä ja lähennä: (2050 ja 2100 viittaavat päästöjen yhdentymisvuoteen).



Saikku & Soimakallio (2008) laskivat erilaisia yksinkertaisia velvoitteenjakokriteereitä käyttäen EU:n päästökauppasektorin ulkoisten sektorien osalta kansallisia päästövähennystavoitteita eri EU-maille. Laskelmien lähtökohtana huomioitiin maiden nykyiset päästöt sekä talouden ja väestön kehitysennusteet. Velvoitteenjakomenetelminä käytettiin mm. päästöt per capita -yhdentymistä sekä kolmea erilaista päästöt per BKT-kriteeriä (yhtäläinen vuosittainen muutos, yhtäläinen vuonna 2020 ja yhtäläinen historiallisen kehityksen kanssa vuosilta 1993–2005). Eri velvoitteenjakomenetelmät antoivat Suomelle kansallisen osuuden päästövähennystavoitteeksi -7 %...-36 % vuoteen 2005 verrattuna. Lisäksi oletuksia muuttamalla suoritettu herkkyystarkastelu antoi Suomelle tietyissä skenaarioissa jopa lähes -50 %:n tavoitteen (Saikku & Soimakallio 2008).

Saikku & Soimakallio sovelsivat mm. tätä selvitystä varten edellä mainittuja velvoitteenjakomenetelmiä Suomen vuoden 2050 kokonaispäästövähennystavoitteiden (päästökauppasektori oletettu kuuluvaksi kansalliseen kiintiöön) arviointiin olettamalla, että EU:n kokonaistavoite on joko -60 % tai -80 % vuonna 2050. BKT:n ja väestön kehitysennusteet oletettiin POLES-mallissa (Russ et al. 2007) käytettyjen arvioiden mukaisiksi. Suomen tavoitteeksi saatiin -57 %...-70 %, kun EU:n tavoite oli -60 % ja -79 %...-85 % kun EU:n tavoite oli -80 %. On syytä huomata, että EU:n teollisuusmaille vuodelle 2050 ehdottama -60 %...-80 %:n

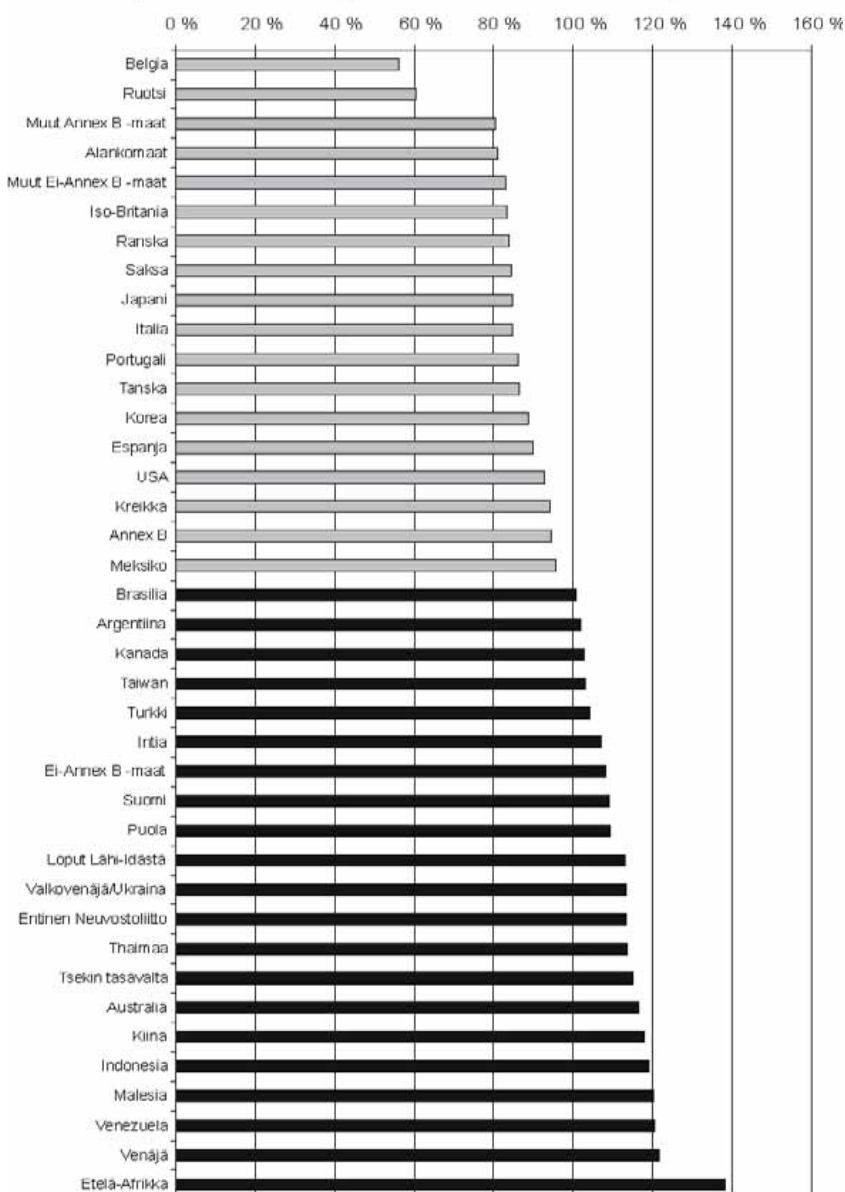
vähennystavoite vuoteen 1990 verrattuna ei globaalista velvoitteenjaosta riippuen ole välttämättä riittävä 450 ppmCO₂-ekvivalenttipitoisuusskenaarion saavuttamiseksi. IPCC (2007b) esittää ko. pitoisuustavoitteeseen pyrittäessä teollisuusmaiden päästöhaarukaksi -80 %...-95 % vuonna 2050 verrattuna vuoteen 1990. Laskennassa on käytetty useita erilaisia velvoitteenjakomenetelmiä, mm. triptyykkiä, monivaihemallia, intensiteettitavoitteita ja 'vähennä ja lähennä'-periaatetta. Raportin mukaan yksittäisten maiden päästötavoite voi kuitenkin olla esitetyn vaihteluvälin ulkopuolella, riippuen mm. käytetystä velvoitteenjakoperiaatteesta ja valituista parametreista (IPCC WG3 2007).

Tuotteiden, erityisesti energiantensiivisen teollisuuden, tuonnilla ja viennillä voi olla suuri vaikutus maiden päästömääriin. Mitkään edellä esitetyistä velvoitteenjakokriteereistä eivät tätä huomioi. Kulutusperusteisten päästöjen objektiivinen arviointi on tiedon ja aukottomien menetelmien puutteen vuoksi hankalaa ja aina jossain määrin kyseenalaista. Toimiala- ja maakohtaisia energiankulutus- ja päästötilastoja sekä tuotteiden kauppatilastoja hyödyntämällä voidaan kuitenkin suuntaa-antavasti arvioida maiden kulutusperusteisia päästöjä (kuva 5.3). Esimerkiksi Suomen kannalta kulutusperusteisten päästöarvioiden käyttö velvoitteenjaon kriteerinä voisi olla suotuisaa, sillä Suomi on arvioiden mukaan päästöjen nettoviejä (Suomen vientiin menevien tuotteiden valmistus aiheuttaa enemmän päästöjä kuin Suomeen tuotavien tuotteiden valmistus). EU on puolestaan päästöjen nettotuojia.

Koska EU osallistunee tuleviin ilmastopöimuksiin unionina, saattaisi kulutusperusteisen päästöjen käyttö velvoitteenjaon kriteerinä olla kuitenkin Suomenkin kannalta epäedullista, jos EU jakaa oman sisäisen taakkansa muita kriteereitä käyttäen. Kulutusperusteisten päästöarvioiden käyttö velvoitteenjaon kriteerinä voisi edesauttaa kansainvälisen ilmastopöimuksen syntyä esimerkiksi Kiinan ja Intian osalta, mutta hankaloittaa sitä esimerkiksi USA:n ja Japanin osalta.

Kuva 5.3 Eri maiden tuotantoperusteisten CO₂-päästöjen osuus niiden kulutusperusteisista päästöistä vuonna 2001 Peters & Hertwich (2008) -artikkelin mukaan. Maat, joilla osuus on alle 100 %, ovat päästöjen nettotuojia (näihin maihin tuotavien tuotteiden valmistus aiheuttaa enemmän päästöjä kuin näistä maista vietävien tuotteiden valmistus) ja muut ovat päästöjen nettoviejiä (tummennetut pylväät).

Tuotantoperustainen CO₂-päästö suhteessa kulutusperustaiseen



6 VIITTEET

- Baumert, K.A. et al; 2005; Navigating the Numbers – Greenhouse Gas Data and International Climate Policy; World Resource Institute.
- Blok, K., Phylipsen, G.J.M., Bode, J.W. 1997. The triptique approach. Burden differentiation of CO₂ emission reduction among European Union member states. Discussion paper for the informal workshop for the European Union Ad Hoc Group on Climate Zeist, The Netherlands, 16–17 January 1997.
- Climate Analysis Indicators Tool (CAIT) Version 5.0. (Washington, DC: World Resources Institute, 2008).
- COM 2008a. Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 2003/87/EC so as to improve and extend the greenhouse gas emission allowance trading system of the Community. Commission of the European Communities, COM(2008) 16 final, Brussels 23.1.2008.
- COM 2008b. Proposal for a Decision of the European Parliament and of Council on the effort of Member States to reduce their greenhouse gas emissions to meet the Community's greenhouse gas emission reduction commitments up to 2020. Commission of the European Communities, COM(2008) 17 final, Brussels 23.1.2008.
- COM 2007. Limiting Global Climate Change to 2 degrees Celsius - The way ahead for 2020 and beyond. Commission of the European Communities, COM(2007) 2 final, Brussels 10.1.2007.
- Criqui, P., Kitous, A., Berk, M., den Elzen, M., Eickhout, B., Lucas, P., van Vuuren, D., Kouvaritakis, N., Vanregemorter, D. 2003. Greenhouse Gas Reduction Pathways In The Unfccc Process Up To 2025 – Technical Report. Study Contract: B4 3040/2001/325703/MAR/E.1 for the European Commission, DG Environment http://europa.eu.int/comm/environment/climat/pdf/pm_techreport2025.pdf
- den Elzen, M.G.J., Höhne, N., Lucas, P.L., Moltmann, S., Kuramochi, T. 2007. The Triptych approach revisited – A staged sectoral approach for climate mitigation. MNP Report 500114008/2007. <http://www.mnp.nl/bibliotheek/rapporten/500114008.pdf>
- den Elzen, M.G.J., van Vuuren, D.P. 2007. Peaking profiles for achieving long-term temperature targets with more likelihood at lower costs. PNAS, 13 Nov. , vol 104, no. 26, 17931–17936.
- den Elzen et al. 2007. Exploring European countries' emission reduction targets, abatement costs and measures needed under the 2007 EU reduction objectives, MNP Report 500114009/2007.
- den Elzen, M.G.J. 2005. Countries' climate mitigation commitments under the "South-North Dialogue" Proposal a quantitative analysis using the FAIR 2.1 world model. Report 728001032/2005. Netherlands Environmental Assessment Agency (MNP), 2005. 96 p. [<http://www.mnp.nl/bibliotheek/rapporten/728001032.pdf>]
- den Elzen, M.G.J., Berk, M.M., Lucas, P., Eickhout, B. and Van Vuuren, D.P. 2003. Exploring climate regimes for differentiation of commitments to achieve the EU climate target. RIVM Report no. 728001023, National Institute of Public Health and the Environment, Bilthoven, the Netherlands http://arch.rivm.nl/iweb/iweb/Reports/728%20001%20023_final_V1.pdf

- den Elzen, M.G.J. and Lucas, P. 2003. FAIR 2.0 – A decision-support tool to assess the environmental and economic-consequences of future climate change. RIVM report 550015001/2003.
- ETP 2008. Energy Technology Perspectives. International Energy Agency, Paris.
- Finadapt 2007. Suomen kyky sopeutua ilmastonmuutokseen. Suomen Ympäristö 1/2007.
- Gupta, J. 1998. Encouraging developing country participation in the climate change regime. Institute for Environmental Studies (IVM), Vrije Universiteit, Amsterdam, The Netherlands.
- Gupta, J. 2003. Engaging developing countries in climate change: (KISS and Make-up!) in David Michel (ed.), (2003): "Climate Policy for the 21st Century, Meeting the Long-Term Challenge of Global Warming". Washington D.C., Center for Transatlantic Relations <http://transatlantic.sais-jhu.edu>
- Hansen, J., Sato, M., Kharecha, P., Beerling, D., Masson-Delmotte, V., Paganini, M., Raymo, M., Royer, D.L., Zachos, J.C.: Target Atmospheric CO₂: Where Should Humanity Aim?
- Houghton and Hackler (2002): 'Carbon Flux to the Atmosphere from Land-Use Changes'. Data stored at the Carbon Dioxide Information Analysis Centre (CDIAC)
- Höhne, N., Harnisch, J., Phylipsen, G.J.M., Blok, K., Galleguillos, C. 2003: Evolution of commitments under the UNFCCC: Involving newly industrialized economies and developing countries. Research Report 201 41 255. UBA-FB 000412 <http://www.umweltbundesamt.org/fpdf-l/2246.pdf>
- Höhne, N., Phylipsen, D., Ullrich, S., Blok, K. 2005. Options for the second commitment period of the Kyoto Protocol. Submitted for the German Federal Environmental Agency by Ecofys. Climate Change 02/05. <http://www.umweltbundesamt.de/>
- IPCC 2000. The IPCC Special Report on Emission Scenarios, 2000.
- IPCC 2001. Climate Change 2001. Mitigation. IPCC, Geneva, Switzerland.
- IPCC SYR 2007. Ilmastonmuutos 2007. Yhteenvetoraportti. Tiivistelmä päätöksentekijöille. Suomentanut Esko Kuusisto, aineistoa käytetty myös suorana lainauksena.
- IPCC WG1 2007. Climate Change 2007. The Physical Science Basis Working Group I. IPCC, Geneva, Switzerland.
- IPCC WG2 2007. Climate Change 2007. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working Group II. IPCC, Geneva, Switzerland.
- IPCC WG3 2007. Climate Change 2007. Mitigation of Climate Change Working Group III. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Keppo, I., O'Neill, B., Riahi, K., 2006. Probabilistic temperature change projections and energy system implications of greenhouse gas emission scenarios. Technological Forecasting & Social Change (in press), doi:10.1016/j.techfore.2006.05.024.
- Koljonen, T., Lehtilä, A., Savolainen, I. Global demand of the clean energy technology under developing climate policy. GHGT-8 Conference in Trondheim, Norway. June 2006.

- Kulovesi, K., Keinänen, K. 2006. Long-Term Climate Policy: International Legal Aspects of a Sector-Based Approach," available at <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=29397&lan=fi>
- Lenton, T. M., H. Held, E. Kriegler, J. W. Hall, W. Lucht, S. Rahmstorf and H. J. Schellnhuber, 2008. Tipping Elements in the Earth System, *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 105, 6, 1786–1793.
- Meinshausen, M. 2005. On the risk of overshooting 2 C. Paper presented at Scientific Symposium "Avoiding Dangerous Climate Change", MetOffice, Exeter, 1–3 February 2005
- Michaelowa, A., Butzengeiger, S., Jung, M. 2003. Graduation and Deepening - An ambitious post-2012 climate policy scenario. HWWA Discussion paper.
- NOAA annual greenhouse gas index (AGGI); <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/>; visited 25.4.2008
- Ott, H.E., Winkler, H., Brouns, B., Kartha, S., Mace, M., Huq, S., Kameyama, Y., Sari, A.P., Pan, J., Sokona, Y., Bhandari, P.M., Kassenberg, A., La Rovere, E.L., Rahman, A. 2004. South-North dialogue on equity in the greenhouse. A proposal for an adequate and equitable global climate agreement. GTZ, Eschborn, Germany.
- Peters, G., Hertwich, E., 2008. CO₂ embodied in international trade with implications for global climate policy. *Environmental science and technology* 42 (5), 1401–1407.
- Phylipsen, D., Höhne, N. and Janzic, R. 2004. Implementing Triptych 6.0 – Technical report. DM 70046 / ICC03080. Commissioned by RIVM. November 2004. 56 p.
- Pimenoff, N., Venäläinen, A., Pilli-Sihvola, K., Tuomenvirta, H., Järvinen, H., Ruosteenoja, K., Haapala, J. & Räisänen, J., (2008): Epälineaariset ja äärimmäiset ilmaston muutokset. Tulevaisuusselonteon taustaselvitys. Valtioneuvoston kanslian julkaisusarja 14/2008.
- Raupach, M.R., Marland, G., Ciais, P., Le Quere, C., Canadell, J.G., Klepper, G., Field, C.B. Global and regional drivers of accelerating CO₂ emissions. *PNAS*, Juna 2007, Vol. 104, no.24, p. 10288–10293.
- Russ P., Wiesenthal T., van Regemorter D., Ciscar J., 2007. Global Climate Policy Scenarios for 2030 and beyond. Analysis of Greenhouse Gas Emission Reduction Pathway scenarios with the POLES and GEM-E3 models. European Commission Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies, Sevilla, Spain.
- Räisänen, J. 2005. Probability distribution of CO₂ induced global warming as inferred directly from multimodel ensemble simulations. *Geophysica*, 24, pp. 19–30.
- Saikkku, L., Soimakallio, S. Top-down approaches for differentiating of emission reduction commitments – Uncertainties and sensitivities in the 27 European Union Member States. *Environmental Science and Policy*, in press.
- Savolainen, I., Monni, S., Syri, S., The mitigation of methane emissions from the industrialised countries can explain the atmospheric concentration level-off. *Proceedings of the 9th Conference on Energy for Clean Environment*, 2–5 July 2007, Povo de Varzim, Portugal.
- Sijm, J.P.M., Berk, M.M., den Elzen, M.G.J., van den Wijngaart, R.A. 2007. Options for post-2012 EU burden sharing and EU ETS allocation. *Climate Change, Scientific assessment and policy analysis*. ECN Report 500102009. Available at: www.mnp.nl

- Siikavirta 2005. Pitkän aikavälin ilmastopolitiikka: Sopimusarkkitehtuurivaihtoehtojen tarkastelu. YM, 14.6.2005.
- Soimakallio, S., Perrels, A., Honkatukia, J., Moltmann, S., Höhne, N. 2006. Analysis and Evaluation of the Trip-tych 6 – Case Finland. VTT Working Papers 48. Espoo 2006. 70 p. + app. 8. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2006/W48.pdf>
- Stern 2006. Stern Review on the Economics of Climate Change. Cambridge University Press.
- Syri, S., Lehtilä, A., Ekholm, T., Savolainen, I., Holttinen, H., Peltola, E. 2008. Global energy and emissions scenarios for effective climate change mitigation – deterministic and stochastic scenarios with the TIAM model. International Journal of Greenhouse Gas Control 2: 274–285.
- Syri, S., Lehtilä, A., Ekholm, T., Savolainen, I. 2007. Technologies needed for achieving the EU 2 °C climate target - deterministic and stochastic scenarios with the TIAM model. International Energy Workshop, 25–27 June 2007, Stanford University, California, U.S.A.
- UNFCCC 2007. Bali action plan, Decision -/CP.13.
http://unfccc.int/files/meetings/cop_13/application/pdf/cp_bali_action.pdf
- van Vuuren D., den Elzen M., Lucas P., Eickhout B., Strengers B., van Ruijven B., Wonink S., van Houdt R., 2007. Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: as assessment of reduction strategies and costs. Climatic Change 81:119-159.
- WGBU 2007. World in Transition – Climate Change as a Security Risk. German Advisory Council on Global Change.
- Zeng, N., Ding, Y., Pan, J., Wang, H., Gregg, J. Climate Change – the Chinese Challenge. Science, Vol. 319, 8 Feb. 2008. P. 730–731.



VALTIONEUVOSTON KANSLIA

SNELLMANINKATU 1, HELSINKI
PL 23, 00023 VALTIONEUVOSTO
p. (09) 16001, (09) 57811
f. (09) 1602 2165
julkaisut@vnk.fi
www.vnk.fi/julkaisut



441

697

Painotuote

ISBN 978-952-5631-77-7



9 789525 631777

Tätä julkaisua myy ja välittää:
Yliopistopainon kirjamyynti
www.yliopistopaino.fi/kirjamyynti
books@yliopistopaino.fi
PL 4 (Vuorikatu 3 A)
00014 HELSINGIN YLIOPISTO
Puhelin (09) 7010 2363
Fax (09) 7010 2374

ISBN 978-952-5631-77-7 (nid)
ISBN 978-952-5631-78-4 (pdf)
ISSN 0782-6028