

Juho Salmi

Ilmastomuutoksen systeemidynaaminen mallinnus ja simulointi

Sähkötekniikan korkeakoulu

Kandidaatintyö
Espoo 9.12.2013

Vastuupettaja:

TkT Pekka Forsman

Työn ohjaajat:

DI Tomi Sorasalmi

TkT Pekka Forsman

Tekijä: Juho Salmi

Työn nimi: Ilmastonmuutoksen systeemidynaaminen mallinnus ja simulointi

Päivämäärä: 9.12.2013

Kieli: Suomi

Sivumäärä:4+25

Koulutusohjelma: Automaatio- ja systeemitekniikka

Vastuuopettaja: TkT Pekka Forsman

Ohjaajat: DI Tomi Sorasalmi, TkT Pekka Forsman

Kandi vielä pikkasen kesken. Valmistuu ennen seminaaria.
Placeholderina alkuperäinen tehtävänanto: Systeemidynamiikkaa on käytetty paljon ympäristöongelmien sekä ilmastonmuutoksen mallintamisessa. Kandityön tarkoituksena on tehdä kirjallisuustarkastelu ilmastonmuutoksen mallintamisessa käytetyistä systeemidynaamisista malleista, eri lähestymistavoista, eri resoluution malleista ja sovellusalueista. Pyritäänkö malleilla ymmärtämään ilmastonmuutosta paremmin vai kommunikoidaan jo tiedossa olevia ongelmia. Käyttävätkö vain päättäjät malleja vai onko kehitetty suurelle yleisölle tarkoitettuja malleja/pelejä. Mitä uutta systeemidynaaminen mallintaminen on tuonut ilmastonmuutoksen mallintamiseen.

Avainsanat: Systeemidynamiikka, ilmastonmuutos, ilmastomalli, ilmaston lämpeneminen, C-ROADS, En-ROADS, FREE

Author: Juho Salmi

Title: Modeling and Simulating Climate Change with System Dynamics

Date: 9.12.2013

Language: Finnish

Number of pages:4+25

Degree programme: Automation and Systems Technology

Supervisor: D.Sc. (Tech.) Pekka Forsman

Advisors: M.Sc. (Tech.) Tomi Sorasalmi, D.Sc. (Tech.) Pekka Forsman

Abstract in English.

Keywords: System dynamics, climate change, climate model, global warming,
C-ROADS, En-ROADS, FREE

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	ii
Tiivistelmä (englanniksi)	iii
Sisällysluettelo	iv
1 Johdanto	1
2 Systeemidynamiikka	3
2.1 Systeemidynamiikan historia	3
2.2 Systeemiajattelu ja päätöksenteko	4
2.3 Takaisinkytketyt systeemit	6
2.4 Viiveet, varastot ja virtaukset	8
3 Ilmastonmuutoksen mallintaminen	10
3.1 Ilmastotieteen, -mallien ja -politiikan historia	11
3.2 C-ROADS-ilmastomalli	12
3.3 Muita systeemidynaamisia ilmastomalleja	19
4 Yhteenveto	22
Viitteet	23

1 Johdanto

Ihmiselle on luontaista ajatella, että asioille on selkeät ja suoraviivaiset syy-seuraussuhteet: yksi asia vaikuttaa toiseen. Maailma ei kuitenkaan olen niin yksinkertainen ja lineaarinen, vaan asiat ovat mitä moninaisimmin tavoin vuorovaikutuksessa toistensa kanssa. Systeemidynamiikka on tapa ymmärtää, mallintaa ja simuloida tätä vuorovaikutusta sekä niiden muodostamaa monimutkaista systeemiä.

Systeemidynaaminen malli rakentuu varantojen, virtausten sekä takaisinkytkettyjen silmukoiden varaan. Systeemidynamiikan tapa lähestyä asioita tarjoaa erinomaiset työkalut päätöksenteolle ja ajattelulle yleisesti. Yksi keskeinen systeemidynamiikan etu on sen ilmaisuvoima. Kausaalidiagrammit kiteyttävät hyvin, mistä systeemidynaamisessa mallissa on kyse. Lisäksi systeemidynaamisia malleja on verrattaen luonteva lähteä rakentamaan tunnettujen ja tutkittujen kausaaliteettien varaan. Systeemidynaamiset mallit ovat myös laskennallisesti kevyitä, joten mallin parametrien muuttamisen vaikutusten demonstroiminen käy hetkessä.

Ilmastonmuutos on tilastollisesti merkittävää ja pitkäkestoista muutosta globaalissa tai paikallisessa ilmastossa. Tässä kandidaatintyössä keskitytään ihmisen toiminnasta johtuvaan globaaliin ilmastonmuutokseen, erityisesti ilmaston lämpenemiseen.

Ilmastonmuutosta mallinnetaan, jotta kykenisimme arvioimaan, millaisia vaikutuksia toiminnallamme on, ja millaisin päätöksin voisimme saada ilmaston kehittymään haluttuun suuntaan. Ilmastoa ja sen muutosta mallinnetaan tieteellisiin tarkoituksiin pääasiassa tarkoilla fysikaalisilla malleilla. Tarkat mallit ovat laskennallisesti raskaita, eivätkä ne ole maallikon tai poliittisen päättäjän ymmärrettävissä. Systeemidynamiikalla voidaan ilmastomalli esittää ymmärrettävässä muodossa siten, että päättäjät kykenevät hahmottamaan, mistä mallissa on kyse. Tämän lisäksi systeemidynaaminen simulaatio on ajettavissa hetkessä, joten esimerkiksi ympäristöpoliittisten päätösten seuraukset on nopeasti havainnollistettavissa.

Systeemidynamiikan yksi keskeisistä sanomista on ymmärryksen luominen. Systeemidynamiikan yksi tunnustetuimmista asiantuntijoista, prof. John Sterman, kirjoittaa kirjassaan *Business Dynamics* [1], että kirjan lukijalla ei ole syytä huoleen, oli tämä matemaattisesti suuntautunut tai ei, sillä kirjasta löytyy ymmärrettävää ja mielenkiintoista sisältöä jokaiselle. Systeemidynamiikka on keino johdattaa kuka tahansa ymmärtämään toimintaympäristöään. Tämä ajatusmalli on pidetty mielessä tätä työtä kirjoitettaessa, ja pyrkimys on ollut, että työn sisältö olisi kenen tahansa omaksuttavissa. Työssä keskitytäänkin yksityiskohtaisten matemaattisten kaavojen sijaan kokonaisuuksien ymmärtämiseen ja systeemiajatteluun.

Tämän kandidaatintyön tavoite on tutustua systeemidynamiikkaan ja sekä tutkia sen soveltamista ilmastonmuutoksen mallintamiseen ja simulointiin.

Luvussa 2 otetaan katsaus systeemidynamiikan perusperiaatteisiin. Luvussa 3 tutustutaan ilmastonmuutokseen ja sen mallintamiseen. Ilmastonmuutoksen systeemidynaaminen mallintaminen havainnollistetaan kahta esimerkkiä käyttäen. Lopuksi luvussa 4 tehdään yhteenveto tämän kandidaatintyön löydöksistä ja havainnoista.

2 Systeemidynamiikka

Systeemi eli järjestelmä (eng. system) tarkoittaa toistensa kanssa vuorovaikutuksessa olevien osien muodostamaa kokonaisuutta [2]. Systeemidynamiikka (eng. system dynamics) on tietokoneavusteinen lähestymistapa päätöksentekoon ja mutkikkaiden systeemien (eng. complex system) mallintamiseen [3]. Mutkikkaalle systeemille ei ole yksikäsitteistä määritelmää [4], mutta systeemidynamiikalla kyetään mallintamaan erityisesti systeemien takaisinkytkentöjä ja epälineaarisuuksia [3], jotka ovat systeemin mutkikkautta lisääviä ominaisuuksia [4].

Tämän luvun tavoite on tutustuttaa lukija systeemidynamiikan peruseräiteisiin, jotka ovat välttämättömiä luvun 3 systeemidynaamisen ilmastomallien ymmärtämiseksi. Alaluvussa 2.1 selvitetään, miksi ja miten systeemidynamiikka syntyi ja kehittyi, alaluvussa 2.2 tutustutaan systeemiajatteluun ja päätöksentekoon, alaluvussa 2.3 systeemien takaisinkytkentöihin sekä alaluvussa 2.4 systeemien viiveisiin, varastoihin ja virtauksiin.

2.1 Systeemidynamiikan historia

Systeemidynamiikan on alunperin perustanut Jay W. Forrester, joka vuonna 1956 siirtyi MIT:ssä sähkötekniikan alalta Sloan School of Managementiin tekemään operaatiotutkimusta. Forrester alkoi tutkia, miksi General Electricin tehtailla työskenneltiin välillä kolmessa vuorossa ja välillä jouduttiin puolet työntekijöistä irtisanoimaan. Forrester alkoi yhdistellä säätö- ja systeemiteoriaa operaatiotutkimukseen ja ryhtyi simuloimaan teollisuustuotantoa sekä luomaan sille säätöjärjestelmiä tietokoneavusteisesti. Tämän tutkimuksen pohjalta syntyi systeemidynamiikka ja alan ensimmäinen julkaisu Industrial Dynamics [5]. [6]

Forresterin [7, s. 398–399] mukaan sen aikainen operaatiotutkimus ei tarjonnut hyviä työkaluja laajoihin, ylimmän tason johtamisen haasteisiin. Operaatiotutkimuksessa keskityttiin pääsääntöisesti yksittäisten, irrallisten päätösten seurausten hahmottelemiseen oletuksella, että päätöksen seuraukset eivät vaikuta päätöksentekoon vaikuttaviin tekijöihin. Tällaista oletusta kutsutaan avoimen silmukan (eng. open loop) oletukseksi. Tällaisella tarkastelulla pystyttiin yksinkeraistamaan analyysiä, mutta näin kyettiin tarkastelemaan riittävällä tarkkuudella vain yksinkertaisia, lineaarisia tilanteita, siinä missä systeemidynamiikalla pystytään ottamaan huomioon mutkikkaidenkin järjestelmän osien takaisinkytkennät ja epälineaarisuudet. Takaisinkytkettyjä systeemeitä oli jo pitkään tutkittu ja hyödynnetty insinööritieteissä, biologiassa ja taloustieteessä, mutta niitä oli vasta hiljattain alettu ymmär-

tää.

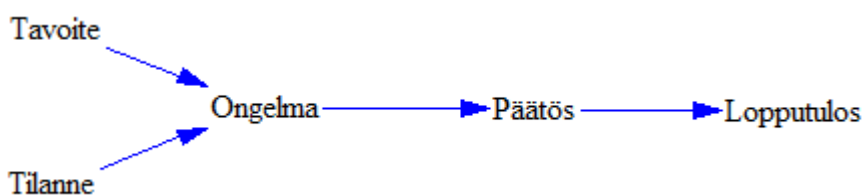
Samat takaisinkytkettyjen systeemien periaatteet olivat yleistettävissä eri tieteenaloille, minkä johdosta monilla aloilla otettiin systeemidynaamiikan menetelmiä käyttöön. Systeemidynaamiikasta kehittyikin nopeasti hyvin poikkitieteellinen ala. [1, 3, 7]

2.2 Systeemiajattelu ja päätöksenteko

Systeemiajattelu (eng. systems thinking) on tapa jäsentää maailma mielessään mutkikkaana systeeminä, ja sen työkaluna voi käyttää systeemidynaamiikkaa [1, s. 4–5]. Sterman [1, s. 4–5] vertaa systeemidynamista mallintamista lentosimulaattoriin: lentosimulaattori opettaa turvallisesti lentäjän lentämään ja systeemidynaamiikka johtajan systeemiajattelemaan eli hahmottamaan johtamansa organisaation systeeminä.

Systeemidynaamiikan asiantuntijat käyttävät usein sanontaa: "Tie helvettiin on kivetty hyvillä aikomuksilla." Stermanin [1, s. 5–6] mukaan hyvää tarkoittavilla päätöksillä saatetaan tehdä ongelmia pahemmiksi, sillä monilla päätöksillä on seurauksia, joita on vaikea ennalta arvioida.

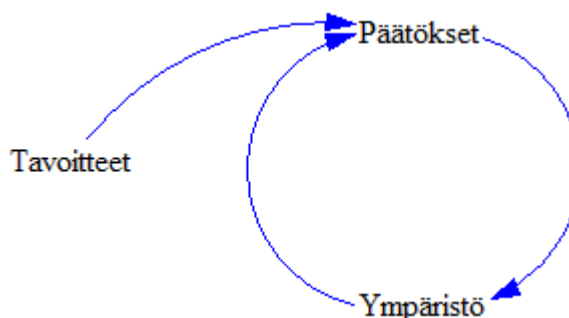
Päätöksenteon maailmankuvan voi jakaa tapahtumasuuntautuneeseen ja takaisinkytkentäsuuntautuneeseen. Seuraava kuva 1 esittää tapahtumasuuntautunutta maailmankuvaa. Tapahtumasuuntautuneisuus on ihmiselle luontevaa, sillä se on lineaarista ja suoraviivaista: jokaisella teolla on seurauksensa. Kun on tilanne ja asetetut tavoitteet, niin ongelma syntyy siitä, kun ne poikkeavat toisistaan. Mitä enemmän tilanne ja tavoite poikkeavat toisistaan, sitä suurempi ongelma. Ongelman ratkaisemiseksi tarvitaan päätös, joka johtaa haluttuun lopputulokseen. Päätös voi kuitenkin vaikuttaa ympäröivään tilanteeseen mitä moninaisimmin tavoin. Tapahtumasuuntautuneessa maailmankuvassa tätä ei tyypillisesti huomioida, ja päätöksistä saattaa seurata odottamattomia sivuvaikutuksia. [1, s. 10]



Kuva 1: Tapahtumasuuntautunut maailmankuva. [1, s. 10]

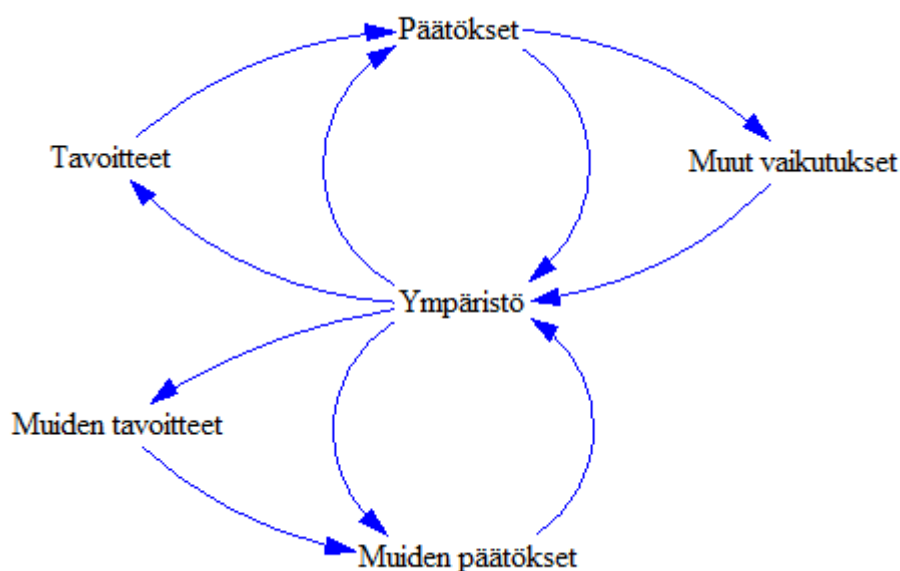
Stermanin [1, s. 11] mukaan sivuvaikutuksia ei ole todellisuudessa kuitenkaan olemassa. On vain olemassa vuorovaikutussuhteita, joita ei ole otettu huomioon. Seu-

raava kuva 2 esittää takaisinkytkentäsuuntautunutta maailmankuvaa. Systeemiajattelijan maailmankuva on takaisinkytkentäsuuntautunut, ja hän ymmärtää päätösten vaikuttavan ympäristön tekijöihin, jotka puolestaan vaikuttavat päätöksiin.



Kuva 2: Takaisinkytkentäsuuntautunut maailmankuva. [1, s. 11]

Maailmankuvaa voi edelleen laajentaa. Seuraava kuva 3 on laajennettu edellisestä kuvasta 2 ottamaan huomioon useampia systeemin tekijöitä. Systeemiajatteliija hahmottaa, että päätöksillä on myös muita seurauksia, ja nekin muuttavat ympäristöä. Muuttuva ympäristö vaikuttaa myös tavoitteisiin – niin omiin kuin muidenkin. Kun ympäristö ja muiden tavoitteet muuttuvat, tekevät muut päätöksiään sen pohjalta, mikä puolestaan muuttaa ympäristöä. [1, s. 11–12]



Kuva 3: Laajennettu takaisinkytkentäsuuntautunut maailmankuva. [1, s. 11]

2.3 Takaisinkytketyt systeemit

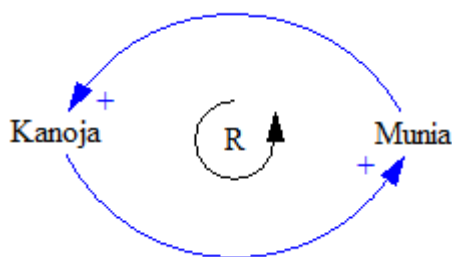
Systeemeissä on sisäsyntyisiä eli endogeenisiä (eng. endogenous) sekä ulkosyntyisiä eli eksogeenisiä (eng. exogenous) muuttujia. Sisäsyntyisen muuttujan arvo määräytyy systeemin sisäisen dynamiikan seurauksena, kun taas ulkosyntyisen muuttujan arvo annetaan systeemin ulkopuolelta, eikä näin ollen riipu systeemin tilasta. Ulkosyntyisten muuttujien arvoista voidaan käyttää termiä "parametri". Parametrien arvot virittävät systeemin käyttäytymään tietyllä tavalla. [1]

Systeemeillä on tuloja ja lähtöjä. Tulot (myös sisääntulo, eng. input) ovat systeemiin tulevia arvoja, jotka vaikuttavat systeemin käyttäytymiseen. Lähdöt (myös ulostulo, eng. output) ovat systeemin käyttäytymisestä seuraavia arvoja. Erilaisilla tuloilla saadaan systeemistä erilaiset lähdöt. Takaisinkytkentä (eng. feedback) tarkoittaa systeemin lähdön käyttämistä systeemin tulona. Tällöin systeemi kytkeytyy takaisin itseensä, muodostaa kytkennöistä silmukan (eng. loop) ja vaikuttaa itse itseensä. Takaisinkytkennästä käytetään erityisesti ihmistieteiden puolella myös termiä "palaute". [1, 3]

Stermanin [1, s. 12] mukaan takaisinkytkennät vaikuttavat systeemin mutkikkuuteen enemmän kuin järjestelmän osien mutkikkuus itse. Tämän vuoksi takaisinkytkentöjen löytäminen on keskeisin osa systeemidynaamista mallinnusta.

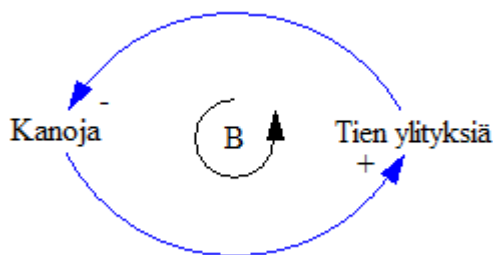
Systeemidynaamisia malleja esitetään kausaalidiagrammein, joihin merkitään systeemin osat eli muuttujanimet sekä niiden väliset vuorovaikutussuhteet kausaaliyhteysnuolten avulla. Nuolet piirretään lähtemään muuttujasta, joka vaikuttaa nuolen päätepisteen muuttujaan. Toisin sanoen nuoli kuvaa sitä, että nuolen alkupään muuttujan arvo eli lähtö toimii nuolen loppupään tulona. Nuoliin merkitään plus- tai miinusmerkki sen mukaan, kasvattaako vai vähentääkö lähtömuuttujan arvon kasvu tulomuuttujan arvoa. Nuolet piirretään kaareviksi, jotta systeemin dynamiikkaa, etenkin silmukat, olisi helpompi hahmottaa. [1]

Takaisinkytkettyjä silmukoita on kahdenlaisia: negatiivisia ja positiivisia. Positiiviset silmukat ovat itseään vahvistavia. Seuraavassa kuvassa 4 on positiivinen takaisinkytketty silmukka, jossa kanojen määrä lisää munien määrää, mikä puolestaan lisää kanojen määrää. Positiiviset silmukat merkitään kausaalidiagrammiin kuvan 4 mukaisesti R-kirjaimella, mikä tulee englannin kielen sanasta "reinforcing" eli suomeksi "vahvistava". [1, s. 12–13][3]



Kuva 4: Positiivinen takaisinkytketty silmukka. [1, s. 13]

Negatiiviset silmukat ovat itseään tasapainottavia. Seuraavassa kuvassa 5 on negatiivinen takaisinkytketty silmukka, jossa kanojen lisääntyminen johtaa siihen, että useampi niistä ylittää tien ja jää auton alle, mikä puolestaan vähentää kanojen määrää, mikä puolestaan vähentää tien ylityksiä. Negatiiviset silmukat merkitään kuvan 5 mukaisesti B-kirjaimella, mikä tulee englannin kielen sanasta "balancing" eli suomeksi "tasapainottava". [1, s. 12–14]



Kuva 5: Negatiivinen takaisinkytketty silmukka. [1, s. 13]

Silmukka on positiivinen, kun siinä on parillinen määrä negatiivisia kytkentöjä. Kuvan 4 positiivisessa silmukassa on nolla negatiivista kytkentää. Silmukka on negatiivinen, kun siinä on pariton määrä negatiivisia kytkentöjä. Kuvan 5 negatiivisessa silmukassa on yksi negatiivinen kytkentä. [1, s. 12–14]

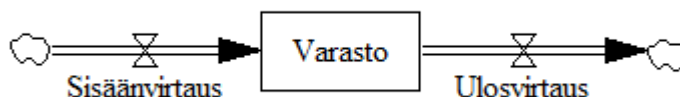
2.4 Viiveet, varastot ja virtaukset

Viiveet (eng. delay) aiheuttavat systeemiin hitautta, aiheuttavat värähtelyitä sekä johtavat siihen, että päätösten seuraukset johtavat pitkällä aikajänteellä erilaisiin tilanteisiin kuin lyhyellä aikajänteellä. Seuraavassa kuvassa 6 on esitetty systeemi, jossa hinnan nousu lisää viiveellä tuotantoa. Kausaalidiagrammeihin viiveet merkitään nuolen päälle joko kahdella poikkiviivalla tai laatikolla, jossa lukee "viive". [1, s. 150–152]



Kuva 6: Viiveellinen systeemi [1, s. 150]

Varastot (eng. stock) ovat systeemin osia, joiden arvo kertyy. Ne tuottavat systeemiin muistia sekä hitautta ja niillä voi kuvata viiveitä. Varastot myös kertovat päättäjille, mikä on systeemin tila. Varastoon voi kohdistua virtauksia (eng. flow), jotka muuttavat varaston arvoa. Sisäänvirtaukset kerryttävät ja ulosvirtaukset kuluttavat varaston arvoa. Seuraava kuva 7 on yksinkertainen kausaalidiagrammiesitys varastosta ja virtauksista. Varastot merkitään kausaalidiagrammiin suorakulmioilla, virtauskytkennät virtausnuolilla, virtausmuuttujat venttiilisymboleilla sekä systeemin ulkopuoliset lähteet (eng. source) ja nielut (eng. sink) pilvillä. [1, s. 191–197]



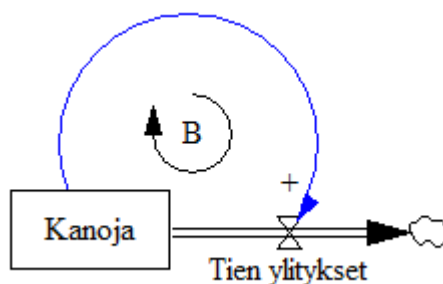
Kuva 7: Yksinkertainen kausaalidiagrammi varastoista ja virtauksista. [1, s. 150]

Varaston matemaattinen esitys vastaa integraattoria, joka integroi sisäänvirtauksen ja ulosvirtauksen erotusta alkuhetkestä t_0 hetkeen t :

$$Varasto(t) = \int_{t_0}^t \left(Sisäänvirtaus(s) - Ulosvirtaus(s) \right) ds + Varasto(t_0) \quad (1)$$

[1, s. 194–195]

Varastot ja virtaukset ovat intuitiivinen esitystapa, mutta saman dynamiikan voi esittää ilmankin niitä [1, s. 191–230]. Seuraavassa kuvassa 8 on esitetty kuvan 5 negatiivisesti takaisinkytketty silmukka varastojen ja virtausten avulla. Kanojen määrä voidaan ajatella varastona ja tien ylitykset virtauksena, joka vähentää kanojen määrää. Kanojen määrä säättää tien ylitykset -venttiiliä: mitä enemmän kanoja, sitä avonaisempi venttiili ja suurempi virta.



Kuva 8: Kuvan 5 negatiivisesti takaisinkytketyn silmukan esitys varastojen ja virtausten avulla.

Systeemidynamiikkaa käsittelevässä kirjallisuudessa käytetään usein kylpyammevertausta. Kylpyamme on varasto, jossa veden sisäänvirtaus tulee hanasta ja ulosvirtaus tapahtuu viemärin kautta. Jos sisäänvirtaus on suurempi kuin ulosvirtaus, kylpyammeen pinnankorkeus nousee ja päinvastoin, jos ulosvirtaus on suurempi, pinnankorkeus laskee. Kun virtaukset ovat yhtä suuret, systeemi on tasapainotilassa (eng. equilibrium). Vaikka konsepti on yksinkertainen, on ihmisillä vaikeuksia hahmottaa tällaista dynamiikkaa. Ihmiset kiinnittävät usein huomiota pelkästään sisään- tai ulosvirtaukseen sen sijaan, että kiinnittäisivät huomiota pinnankorkeuteen. Lopulta joudutaan tilanteeseen, jossa amme joko tulvii tai tyhjenee. [8]

3 Ilmastonmuutoksen mallintaminen

Ilmastonmuutos on tilastollisesti merkittävää ja pitkäkestoista muutosta globaalis-
sa tai paikallisessa ilmastossa. Nykyisin tiedetään, että hiilidioksidi ja muut kasvi-
huonekaasut estävät maapallon lämpösäteilyä karkaamasta avaruuteen. Kasvihu-
onekaasujen lisääntyminen ilmakehässä aiheuttaa näin ollen ilmaston lämpenemistä.
Tiedeyhteisössä vallitsee nykyisin konsensus, että ilmasto mitä todennäköisemmin
lämpenee ihmisen toiminnan seurauksena, ja että se aiheuttaa merkittäviä haasteita
ihmiskunnalle. Fossiilisten polttoaineiden käyttämisestä vapautuva hiilidioksidi on
merkittävin tekijä, jolla ihminen aiheuttaa ilmastomuutosta. [9]

Ilmastoa mallinnetaan ja simuloidaan, jotta ilmaston käyttäytymistä – etenkin il-
maston lämpenemistä ja sen seurauksia – ymmärrettäisiin paremmin. Kun ilmaston
käyttäytyminen tunnetaan, voidaan tehdä valistuneita ilmastopoliittisia päätöksiä
kasvihuonekaasupäästöjen leikkaamiseksi. [10] Päästöjen leikkaaminen heikentää ta-
louskasvua ja hyvinvointia lyhyellä aikajänteellä, mutta maksaa itsensä takaisin pit-
källä aikajänteellä, kun ihmiskunnan ei tarvitse käyttää resurssejaan lämpenemisestä
johtuvien ongelmien korjaamiseen. Kalliiksi tulee sekä liika päästöjen leikkaaminen
että liian vähäinen päästöjen leikkaaminen. Mallien avulla etsitäänkin keinoja, joilla
päästään optimaalisiin leikkauksiin. [11]

Ilmastonmuutoksen mallintamiseen tarvitaan aina jonkinlainen fysikaalinen mal-
li. Tarkimmissa fysikaalisissa malleissa ilmakehä ja meret saatetaan pilkkoa lukuisiin
alueisiin ja useisiin kerroksiin. Näiden osien keskinäistä vuorovaikutusta simuloidaan
erilaisin kasvihuonekaasujen määrin. Mitä tarkempi malli, sitä kauemmin sen simu-
loiminen kestää. [10]

Fysikaalisen mallin voi laajentaa ottamalla huomioon ihmiskunnan ja ilmaston
keskinäisen vuorovaikutuksen. Eri tieteenaloja yhdistelevistä malleista käytetään
tässä työssä nimitystä yhdistetty malli (eng. integrated assessment model). Yh-
distetyillä ilmastomalleilla voidaan esimerkiksi tutkia, miten ilmastomuutos, väes-
tönkasvu, talouskasvu ja hyvinvointi vaikuttavat toisiinsa. [12]

Tässä työssä ilmastomalleja esiteltäessä ja vertaillaessa keskitytään systeemi-
dynamiikan kannalta keskeisiin asioihin: Tutkitaan, mitä on mallinnettu ja jätetty
mallintamatta, millaisia ovat mallin keskeiset takaisinkytkennät ja mitkä muuttujat
on mallinnettu ulkosyntyisiksi.

Tämän luvun tavoite on tutustuttaa lukija ilmastomuutoksen mallintamiseen
ensin yleisesti ja sitten systeemidynaamisiin malleihin pureutuen. Aluksi aliluvus-
sa 3.1 otetaan katsaus ilmastotieteen, -mallien ja -politiikan historiaan. Historiao-
suuden tavoite on auttaa ymmärtämään taustaa, miksi mallintamiseen on alettu

käyttää myös systeemidynaamisia menetelmiä. Tässä työssä paneudutaan fysikaaliseen C-ROADS-ilmastomalliin aliluvussa 3.2 kunnolla, minkä jälkeen aliluvussa 3.3 otetaan nopea katsaus yhdistettyihin En-ROADS- ja FREE-ilmastomalleihin sekä ilmastomuutoksen seurausten systeemidynaamiseen mallinnukseen.

3.1 Ilmastotieteen, -mallien ja -politiikan historia

Vuonna 1889 tiedemies Svante Arrhenius teki ensimmäiset laskelmat siitä, että hiilidioksidin lisääntyminen ilmakehässä aiheuttaisi ilmaston lämpenemistä. Hän kuitenkin arveli, että sen hetkisillä hiilidioksidipäästöillä ilmaston lämpeneminen useammalla asteella veisi tuhansia vuosia. Hän myös uskoi tämän olevan ihmiskunnan kannalta hyödyllistä. [13]

1930-luvulla tehtiin ensimmäisiä havaintoja ilmaston lämpenemisestä. Keskustelu ilmaston lämpenemisestä jäi spekulatiiviselle tasolle, ja sitä pidettiin vain jonkinlaisena ilmastosyklinä. Lämpenemisen ei uskottu olevan ihmisen aiheuttamaa osittain siksi, että ihmistä pidettiin heikkona luonnonvoimien rinnalla. 1950-luvulla tehtiin ensimmäiset tieteelliset havainnot hiilidioksidin kertymisestä ilmakehään ja tästä seuraavasta ilmaston lämpenemisestä, mikä käynnisti ilmastomuutoksen tutkimuksen. [9] Vuonna 1950 kehitettiin ensimmäinen kaksiulotteinen ilmastomalli, jossa mallinnettiin Pohjois-Amerikan säätä 270:llä pisteellä, jotka olivat 700 km etäisyydellä toisistaan. Laskentatehoa ei tuolloin ollut vielä riittävästi, ja vuorokauden päähän tehdyn ennusteen laskeminen kesti vuorokauden. [14]

Mallit ja laskentateho jatkoivat kehittymistä. Malleihin lisättiin erottelukykyä, ilmakehän kerroksia sekä maan pinnanmuotoja ja ne laajennettiin kattamaan koko maapallo. 1960-luvun puoliväliin tultaessa oli kehitetty ensimmäinen kaksikerroksinen koko maapallon kattava yleinen virtausmalli (eng. general circulation model), joka otti huomioon vuorten, merien ja jäätiköiden vaikutukset. [14] Samaan aikaan tehtiin ensimmäiset löydökset ilmaston takaisinkytkennöistä, jotka saattaisivat tehdä ilmastosta yllättävänkin epävakaa. Ilmaston lämpenemistä ei kuitenkaan osattu nähdä vielä uhkana. [9]

Tarkkojen ilmastomallien lisäksi on kehitetty yksinkertaisia ilmastomalleja, joilla saatetaan esimerkiksi pureutua yksittäisiin ilmastokysymyksiin. Yksinkertaisissa malleissa maapallo voidaan esimerkiksi mallintaa yhtenä kokonaisuutena sen sijaan, että mallinnettaisiin ilmakehä lukuisiin palasiin jaettuna kolmiulotteisena hilana. Tällä tavalla ei tarvita niin paljoa laskentatehoa, mutta tutkittavan kysymyksen kannalta päästään riittävään tarkkuuteen. [13] Seuraavissa aliluvuissa esiteltävät systeemidynaamiset mallit ovat yksinkertaisia ilmastomalleja, joista ensimmäisen

julkaisi Tom Fiddaman väitöskirjassaan vuonna 1997 [15].

Ilmastotutkimus kehittyi hitaasti, mutta sai kunnon sykäyksen 1980-luvun lopulle tultaessa ilmastonmuutokseen jälleen havahduttaessa [9]. Tällöin perustettiin Hallitustenvälinen ilmastonmuutospaneeli IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) kokoamaan ja arvioimaan ihmisen aiheuttaman ilmaston lämpenemistä ja sen vaikutuksia koskevaa tieteellistä tutkimusta. [16].

1990-luvulla ilmastomallit olivat päässeet ennusteissa jo hyvään tarkkuuteen [9]. Tieteellinen tutkimus ei ole vielä antanut täyttä varmuutta kaikista ilmaston ominaisuuksista, joten ilmastomalleissa on väistämättä osia, jotka perustuvat spekulatioon [10]. Tästä syystä vuosikymmenten päähän ulottuvat ennusteet voivat antaa edelleen hyvin eriäviä tuloksia. Tästä huolimatta 2000-luvulle tultaessa tiedeyhteisö alkoi puhua jo konsensuksesta, että ilmasto mitä ilmeisimmin lämpenee ihmisen toiminnan seurauksena. Nyt tutkitaan, miten paljon ilmasto lämpenee, millaiset seuraukset sillä on ja miten sitä voitaisiin ehkäistä. [9]

Ilmastonmuutoksen torjumiseksi perustettiin vuonna 1992 YK:n ilmastonmuutoskonventti UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). Tämän työn kannalta keskeisimmät UNFCCC:n kokoukset ovat olleet Kioton, Cancúnin ja Kööpenhaminan ilmastokokoukset. Kioton ilmastokokouksessa vuonna 1997 lukuisat maat allekirjoittivat Kioton ilmastositoumuksen. Kioton ilmastositoumuksen ratifioineet maat sitoutuivat vähentämään tietyn prosenttiosuuden kasvihuonepäästöistään vuoden 1990 tasosta ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi. Kioton sopimus sai seuraajakseen Kööpenhaminan sopimuksen vuonna 2009 ja vuonna 2010 Cancúnin sopimuksessa asetettiin tavoitteeksi, ettei maapallon keskilämpötila nousisi esiteollisesta ajasta yli 2°C:ta. [17]

3.2 C-ROADS-ilmastomalli

Stermanin [10] mukaan ilmastoneuvotteluissa on kaksi keskeistä haastetta liittyen ilmastomalleihin. Ensinnäkin päättäjien ja neuvottelijoiden on vaikea ymmärtää ilmastomalleja ja toisekseen tarkkojen ilmastomallien simuloimiseen erilaisilla skenaarioilla neuvotteluiden aikana ei ole aikaa. Neuvotteluissa eri maat asettavat eri oletusarvot esimerkiksi väestönkasvulle, joten on tärkeää, että simulaatiot kyetään ajamaan nopeasti paikan päällä eri kasvuodotusparametrein. Tämä sulkee pois tarkat ilmastomallit, ja Stermanin [10] mukaan harva yksinkertaisista ilmastomalleista on riittävän nopea. Malleja vaivaa myös se, että ne eivät ole välttämättä julkisesti kaikkien saatavilla, ja niiden toimintaperiaatteita on vaikea ymmärtää. Ilman sopivia työkaluja neuvottelijat ja päättäjät joutuvat siis turvautumaan omaan intui-

tioonsa. Tässä aliluvussa tutustutaan Climate Interactiven kehittämään C-ROADS-ilmastomalliin ensin yleisesti sekä tutkitaan, miten mallilla on ratkaistu edellä mainittuja ongelmia. Tämän jälkeen tutustutaan mallin teknisen toteutuksen keskeisiin yksityiskohtiin.

C-ROADS (Climate-Rapid Overview And Decision Support) on yksinkertainen fysikaalinen ilmastomalli, joka perustuu Fiddamanin [15] kehittämään systeemidynaamiseen FREE-ilmastomalliin. C-ROADS:n keskeinen ulkosyntyinen muuttuja on kasvihuonekaasupäästöjen kehitys. Malliin voi asettaa myös haluamansa arvot esimerkiksi väestön ja bruttokansantuotteen kasvulle sekä herkkyyssparametrille hiilidioksidin ilmastoa lämmittävälle vaikutukselle. [10, 18] C-ROADS on viritetty ja osoitettu toimivaksi historiadatan ja sekä tarkkojen fysikaalisten mallien avulla. Malli kykenee siis toistamaan historiadatan käyttäytymistä sekä antaa eri parametrein samoja ennusteita kuin parhaat tarkimmista ilmastomalleista [10, 19].

Mallin tarkoitus on auttaa ihmisiä ymmärtämään, miten ilmasto toimii ja millaiset pitkän aikajänteen seuraukset erilaisilla ilmastopoliittisilla päätöksillä kasvihuonekaasupäästöjen leikkaamiseksi on. Mallista on pyritty kehittämään mahdollisimman nopea, läpinäkyvä ja helppokäyttöinen. C-ROADS-simulaation ajaa sekunnin murto-osassa, se on kattavasti dokumentoitu ja siinä on graafinen käyttöliittymä, jolla kuka tahansa voi kokeilla, millainen vaikutus erilaisilla kasvihuonekaasujen leikkauksilla ja kasvuodotusparametreilla on ilmastomuutokseen. Graafisen käyttöliittymän avulla pääsee myös tarkastelemaan kausaalidiagrammeja, joista malli on rakennettu. C-ROADS-mallissa maapallon voi jakaa yhteen tai useampaan alueeseen, joista kukin tekee ilmastopoliittiset päätökset itsenäisesti. [10, 18, 19] Kullekin valtiolle tai alueelle on määritetty omat bruttokansantuotteen ja väestönkasvun lukemat, jotka vaikuttavat syntyviin päästöihin [20]. Näin käyttäjä voi ajaa esimerkiksi simulaation tilanteessa, jossa Kiina vähentää päästöjään 50 % alle vuoden 2000 tason ja muu maailma 40 % alle vuoden 1990 tason. C-ROADS-mallin pohjalle on kehitetty myös roolipeli, World Climate, jossa kukin pelaaja edustaa eri maailman valtiota YK:n ilmastoneuvotteluissa. [19]

Climate Interactiven Andrew Jones [21] kertoo, että he pitävät tyypillisesti kahden tunnin tilaisuuksia, joiden aikana osallistujat oppivat ymmärtämään C-ROADS:n avulla ilmaston dynamiikkaa ja ilmastopäätösten seurauksia. Osallistujat oppivat myös simuloimaan erilaisia skenaarioita C-ROADS:n avulla.

C-ROADS onkin osoittautunut tehokkaaksi työkaluksi ja saanut laajaa suosiota. Lukuisat tutkijat, ympäristöministeriöt ja päättäjät ympäri maailman ovat ottaneet mallin käyttöönsä. [10, 19, 21]

C-ROADS-ilmastomallilla ennustettiin vuonna 2009, että ilmaston lämpenemisen rajoittamiseksi 2 °C:een olisi globaalisti hiilidioksidipäästöjä leikattava vuoteen 2050 mennessä 80 % vuoden 1990 tasosta ja metsien tuhoutumisesta syntyviä päästöjä 90 % vuoden 2009 tasosta [22, 23]. Ennusteen tekijät kuitenkin huomauttavat C-ROADS jättää huomiotta osan mahdollisista ilmaston takaisinkytkennöistä tai antaa niille heikon takaisinkytkennän voimakkuutta määrittävän herkkyyssparametrin. Tästä johtuen todellinen tarve kasvihuonepäästöjen vähennyksille saattaa olla ennusteen mukaista suurempi. [22, 23] Leikattavaa kasvihuonekaasupäästöissä olisi siis joka tapauksessa paljon enemmän, kuin millaisiin tavoitteisiin Kööpenhaminan ilmastokokouksessa päästiin vuonna 2009. [22, 24]

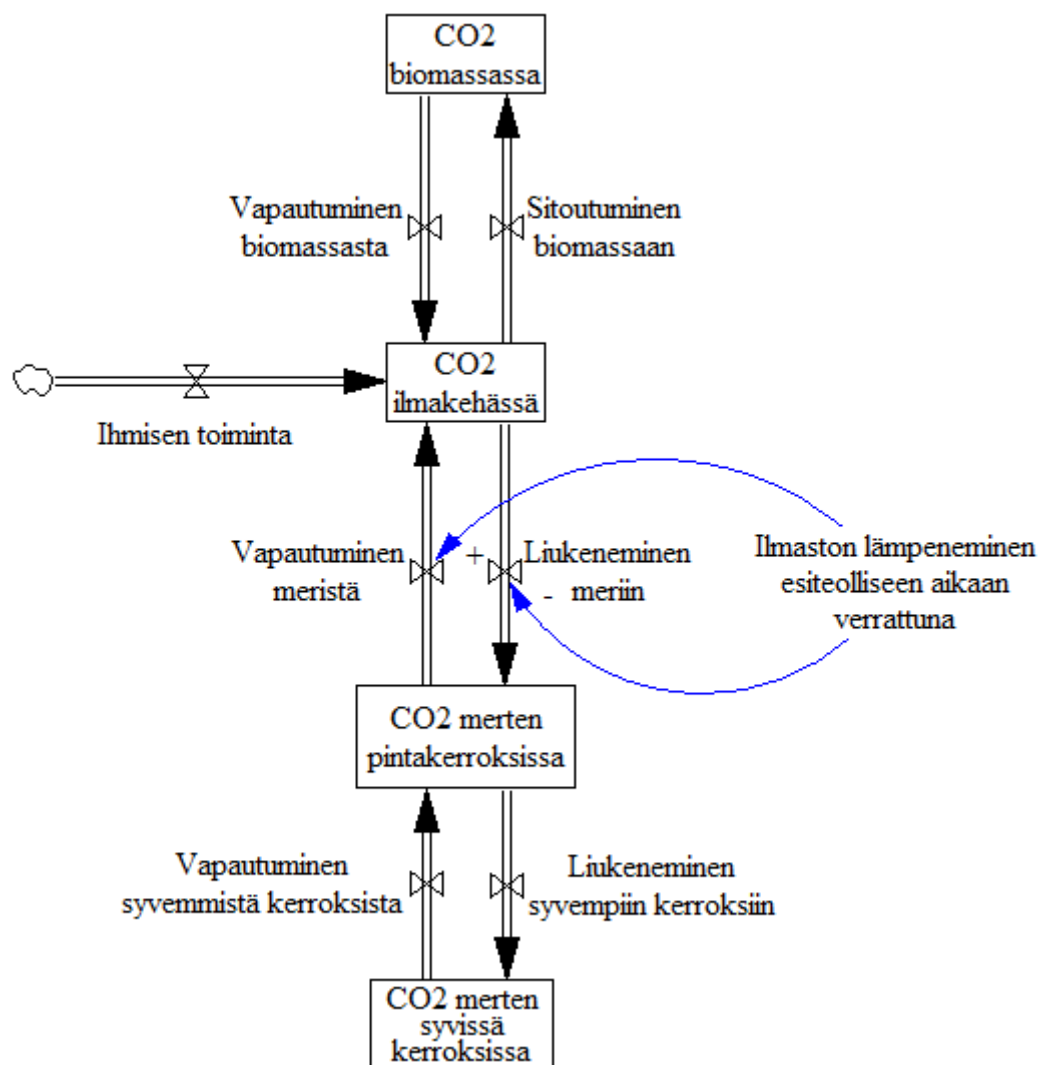
C-ROADS:n arviointiryhmä antoi vuonna 2009 lausunnon, että malli ajaa asian: sen käyttäytymisen noudattaa parhaiden ilmastomallien käyttäytymistä ja se toimii tehokkaana työkaluna kohdeyleisölle. Arviointiryhmä huomautti, että mallin pitäisi selkeämmin viestiä sen todellisia kykyjä mallintaa ilmastoa sekä kertoa epävarmuustekijöistä, jotka malliin liittyvät. Arviointiryhmä ehdotti myös, että malliin lisättäisiin osa pois jätetyistä takaisinkytkennöistä sekä Kioton ilmastosopimuksessa [25] mainittujen kasvihuonekaasujen rinnalle myös muut kasvihuonekaasut. [26] Tässä työssä käytetään C-ROADS:n versiota 3.012.034 [18], johon on lisätty alunperin puuttuneita kasvihuonekaasuja ja takaisinkytkentöjä.

C-ROADS-ilmastomalli koostuu useasta osamallista. Kullekin kasvihuonekaasulle on oma osamallinsa, samoin metsien kasvamiselle ja tuhoutumiselle, meren pinnan korkeudelle ja pH:lle sekä maapallolle kertyneelle lämpöenergialle. [10, 18, 20] Seuraavaksi tutustutaan C-ROADS:n teknisen toteutuksen kannalta keskeisiin hiilidioksidin ja lämpöenergian kiertokulkukujen osamalleihin sekä mallin takaisinkytkentöihin. Havainnollistamisessa käytetään apuna mallin yksinkertaistettuja kausaalidiagrammeja. Diagrammeista on selkeyden vuoksi piilotettu vähemmän merkitykselliset muuttujat ja vuorovaikutukset sekä nostettu esille keskeiset yksityiskohdat.

Hiilidioksidin kiertokulku

Seuraava kuva 9 on yksinkertaistettu hiilidioksidin osamalli. Varastomuuttujat kuvaavat hiilidioksidia ilmakehässä ja biomassassa sekä merten pinta- ja syvissä kerroksissa. Hiilidioksidia tulee systeemiin ihmisen toiminnan seurauksena eli pääasiassa fossiilisten polttoaineiden käytöstä. Ihmisen toiminnan tuottama hiilidioksidi vapautuu ilmakehään. Ilmakehä vaihtaa hiilidioksidia biomassan ja merten pintakerrosten kanssa. Biomassan kasvaessa vähenee ilmakehässä olevan hiilidioksidin määrä. Biomassaa voidaan lisätä metsiä kasvattamalla sekä ehkäisemällä niiden tuhoutumista.

[10, 18]



Kuva 9: C-ROADS-ilmastomallin hiilidioksidin kiertokulku yksinkertaistettuna. [18]

Ilmakehän hiilidioksidia liukenee merten pintakerrokseen, josta se voi liueta syvempiin kerroksiin. Virta ei ole kuitenkaan yksisuuntainen, vaan hiilidioksidi voi liueta syvemmistä kerroksista kohti pintaa ja vapautua pintakerroksista ilmakehään. Kuvaan 9 ei ole kausaaliyhteyttä sekavuuden välttämiseksi piirretty, mutta mitä enemmän ilmakehässä on hiilidioksidia ja mitä vähemmän sitä on merissä, sitä voimakkaammin sitä liukenee ilmakehästä meriin. Myös lämpötila vaikuttaa hiilidioksidin liukenemiseen mereen. Hiilidioksidi liukenee mereen sitä huonommin, mitä enemmän ilmasto lämpenee. [10, 18]

Systeemiin tulee hiilidioksidia, mutta sitä ei poistu lainkaan. Systeemi muistut-

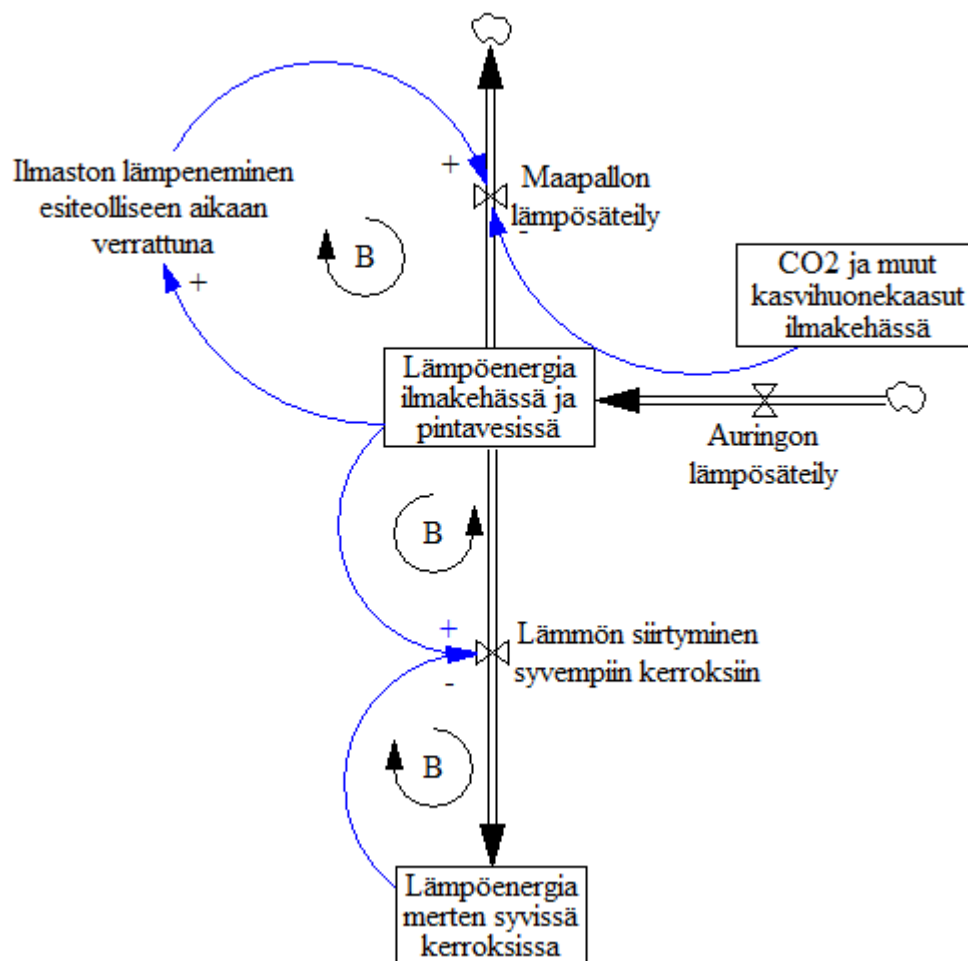
taa siis tulpattua kylpyammetta, johon tulee koko ajan lisää vettä. Ammeen koko on periaatteessa rajaton, mutta hiilidioksidin virta biomassaan on rajallinen ja meriin ei mahdu loputtomasti hiilidioksidia. Jos hiilidioksidia ei enää pysty virtaamaan riittävästi meriin tai biomassaan, voi ilmakehän hiilidioksidipitoisuus ja siten ilmaston lämpeneminen lähteä räjähtävään kasvuun ilmankin, että päästöt lisääntyvät. Tämä on yksi keskeinen asia, jota ihmisten on vaikea hahmottaa. [10]

Todellisuudessa systeemistä poistuu jonkin verran hiilidioksidia tai tarkalleen ottaen hiiltä, kun biomassasta vapautuu metaania. Tämä on C-ROADS:ssa myös mallinnettu, mutta sen merkitys hiilidioksidin kiertokulun kannalta on pieni. [18]

Lämpöenergian kiertokulku

Seuraava kuva 10 on C-ROADS-ilmastomallin lämpöenergian kiertokulun kausaalidiagrammi. Mallissa on kaksi varastomuuttujaa lämpöenergialle: ilmakehä ja pintavedet sekä merten syvät kerrokset. Lämpöenergiaa systeemiin tulee vakionopeudella auringon säteilystä ilmakehään ja pintavesiin, josta se voi siirtyä joko merten syvyyksiin tai säteillä avaruuteen. [10, 18]

Malliin on merkitty kolme tasapainottavaa silmukkaa. Alimmassa silmukassa merten syvien kerrosten lämpeneminen vähentää lämmön siirtymistä pintakerroksista syvempiin kerroksiin, mikä hidastaa syvien kerrosten lämpenemistä. Toisaalta keskimmaisessä silmukassa ilmaston lämpeneminen lisää lämmön siirtymistä syvempiin kerroksiin, mikä nopeuttaa syvien kerrosten lämpenemistä. Ylimmässä silmukassa ilmaston lämpeneminen lisää maapallon lämpösäteilyä avaruuteen, mikä vähentää ilmakehän ja pintavesien lämpöenergiaa. Hiilidioksidi ja muut kasvihuonekaasut puolestaan vähentävät maapallon lämpösäteilyä avaruuteen. [10, 18]



Kuva 10: C-ROADS-ilmastomallin lämpöenergian kiertokulku yksinkertaistettuna. [18]

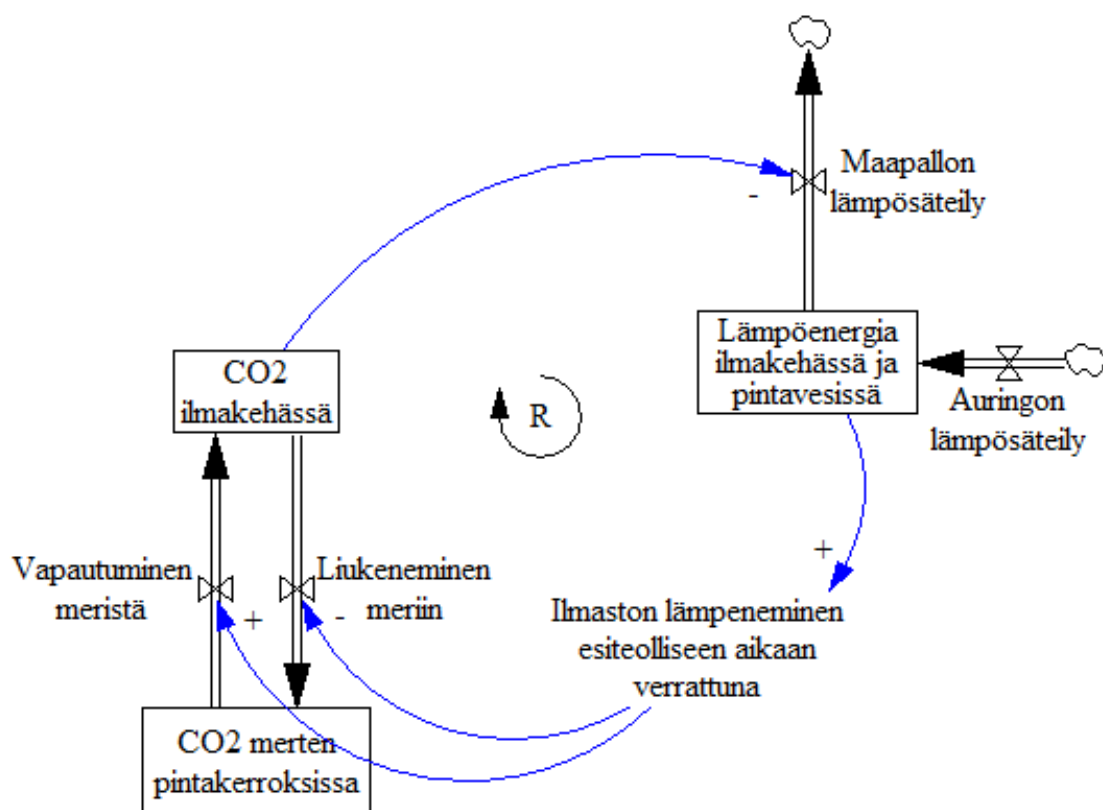
Takaisinkytkennät

Seuraava kuva 11 on esimerkki mallin takaisinkytkennästä, joka seuraa suoraan hiilidioksidin ja lämpöenergian kiertokulusta. Ilmakehässä olevan hiilidioksidin lisääntyessä heikentyy maapallon lämpösäteily avaruuteen, mikä hidastaa lämpöenergian poistumista ilmakehästä ja pintavesistä. Tämä johtaa keskilämpötilan nousuun, mikä heikentää hiilidioksidin liukoisuutta meriin, mikä puolestaan lisää hiilidioksidin määrää ilmakehässä. [10, 18]

Mallissa on enemmänkin vastaavanlaisia takaisinkytkentöjä. Esimerkiksi biomassan kasvu tehostuu ilmakehän hiilidioksidin lisääntyessä ja toisaalta heikkenee ilmaston lämmitessä. Lisäksi ilmaston lämpeneminen lisää metaanin määrää ilmakehässä, sillä lämpeneminen vapauttaa metaania sulavasta ikiroudasta ja saa biomassan tuot-

tamaan enemmän metaania. Metaani on kasvihuonekaasu, joten sen lisääntyminen ilmakehässä lämmittää ilmastoa. [10]

Takaisinkytkentöjen voimakkuutta säädetään herkkyysparametrein. Osaan näistä takaisinkytkennöistä on laitettu varovaiset herkkyysparametrit tai ne on kytketty kokonaan pois päältä, sillä ilmastotiede ei ole vielä kyennyt osoittamaan takaisinkytkentöjen todellista voimakkuutta. [10]



Kuva 11: C-ROADS-ilmastomallin mereen liuenneen hiilidioksidin ja ilmaston lämpenemisen vahvistava silmukka yksinkertaistettuna. [18]

3.3 Muita systeemidynaamisia ilmastomalleja

Tässä aliluvussa tutustutaan yhdistettyihin En-ROADS- ja FREE-ilmastomalleihin ja niitä vertaillaan toisiinsa sekä C-ROADS-ilmastomalliin. Lopuksi otetaan kevyt katsaus muutamaa ilmastomuutoksen vaikutuksia tutkivaan systeemidynaamiseen malliin.

En-ROADS-ilmastomalli

En-ROADS (Energy-Rapid Overview And Decision Support) on FREE-ilmastomalliin pohjautuva, systeemidynaaminen, yhdistetty ilmastomalli. En-ROADS on laajennettu C-ROADS-ilmastomallista yhdistämällä malliin ihmiskunnan energiatuotanto ja talous. Siinä missä C-ROADS-malli keskittyi pääasiassa tutkimaan kasvihuonekaasupäästöjen leikkausten vaikutuksia ilmastoon, tutkii En-ROADS kokonaisvaltaisemmin energiatuotannon, talouden ja ilmaston keskinäisiä vaikutuksia. En-ROADS tutkii puhtaasti maailmanlaajuisia kehitystä, eikä mallissa voi C-ROADS:n tavoin jakaa maailmaa itsenäisiin alueisiin. C-ROADS:n tavoin En-ROADS-simulaation ajaa sekunnin murto-osassa, vaikka se onkin paljon laajempi malli. [27–29]

En-ROADS:n ulkosyntyiset muuttujat on jaettu oletuksiin ja olosuhteisiin sekä toimenpiteisiin ja päätöksiin. Ne on jaettu edelleen energiatuotannollisiin ja taloudellisiin muuttujiin. Oletusten ja olosuhteiden avulla käyttäjä voi syöttää malliin haluamansa uskomukset maailman kehityksestä ja kokeilla, millaisia tuloksia saadaan erilaisin toimenpitein ja päätöksin. Energiatuotanto on jaettu kahdeksaan eri muotoon: fossiilisiin kivihiiileen, öljyyn ja maakaasuun, uusiutuviin bioenergiaan, vesivoimaan ja muihin uusiutuviin sekä ydinvoimaan ja uusiin energiatuotantomuotoihin. Eri tavat tuottaa energiaa vapauttavat ilmakehään eri määrän kasvihuonekaasuja. [29]

Mallissa voi tehdä useita erilaisia toimenpiteitä ja poliittisia päätöksiä energiatuotannon ja talouden ohjaamiseksi. Energiamuotoja voidaan verottaa tai tukea ja niiden houkuttelevuutta voidaan säätää, päästöille voidaan asettaa hinta, energiatehokkuutta voidaan parantaa ja uusien energiateknologioiden kehitykseen voidaan panostaa. Nämä toimenpiteet ja päätökset vaikuttavat energiatuotantoon ja talouteen sekä sen myötä päästöihin ja ilmaston lämpenemiseen. [28, 29] Harvey [28] esittää En-ROADS-ilmastomallilla tehtyjen tutkimusten perusteella, että lämpenemisen pysäyttäminen alle 2°C:een ei tarvitse tulla lyhyelläkään tähtäimellä erityisen kalliiksi, jos yhdistellään eri keinoja energiatehokkuudesta päästöveroihin.

ton lämpenemisestä. Hyvinvoinnille on puolestaan kertymähyötyfunktio. Hyödyksi katsotaan ihmisten mahdollisuus kuluttaa, mikä syntyy kansantuotteesta. Kertymähyötyfunktio laskee tarkasteluajanjakson hyötykertymän. Kertymää voidaan painottaa sukupolvien välistä oikeudenmukaisuutta kuvaavalla parametrilla, jolla voidaan esimerkiksi asettaa nykyhetken hyödyille suurempi painoarvo kuin vuoden 2050 hyödyille. [11, 15] Fiddaman [11] on etsinyt mallin avulla optimaalista tapaa vähentää kasvihuonekaasupäästöjä ja osoittanut, että päästölupien sijaan päästöverot on parhaan hyvinvoinnin tuottava tapa vähentää kasvihuonekaasupäästöjä.

4 Yhteenveto

Keskitytään hyvin paljon Stermanin ja Fiddamanin tutkimukseen, eikä esitetä kritiikkiä.

Viitteet

- [1] John D. Sterman. *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Boston: McGraw-Hill, 2000, s. 982. ISBN: 0-07-231135-5.
- [2] Robert L. Flood ja Ewart R. Carson. *Dealing with Complexity: An Introduction to the Theory and Application of Systems Science*. 2nd. New York: Plenum Publishing Corporation, 1988, s. 289. ISBN: 0-306-42715-X.
- [3] System Dynamics Society. *What is system dynamics?* URL: http://www.systemdynamics.org/what_is_system_dynamics.html (viitattu 24.11.2013).
- [4] Lotfi A. Zadeh. "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes". *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* SMC-3.1 (1973), s. 28–44. ISSN: 0018-9472. DOI: [10.1109/TSMC.1973.5408575](https://doi.org/10.1109/TSMC.1973.5408575). URL: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5408575>.
- [5] Jay W Forrester. *Industrial Dynamics*. 1961, s. 464. ISBN: 0-262-06003-5.
- [6] Jay W Forrester. *The Beginning of System Dynamics*. 1989. URL: http://leml.asu.edu/jingle/Web_Pages/EcoMod_Website/Readings/SD+STELLA/Forrester-Begin'g-SD_1989.pdf.
- [7] Jay W. Forrester. "Industrial Dynamics — After the First Decade". *Management Science* 14.7 (1968), s. 398–415.
- [8] Linda Booth Sweeney ja John D. Sterman. "Bathtub Dynamics : Initial Results of a Systems Thinking Inventory Bathtub Dynamics : Initial Results of a Systems Thinking Inventory". September (2000), s. 30. URL: <http://web.mit.edu/jsterman/www/Bathtub.pdf>.
- [9] American Institute of Physics. *The Discovery of Global Warming*. URL: <http://www.aip.org/history/climate/> (viitattu 07.12.2013).
- [10] John D. Sterman et al. "Management Flight Simulators to Support Climate Negotiations: The C-ROADS Climate Policy Model John D. Sterman". September (2011), s. 1–36.
- [11] Thomas S Fiddaman. "Exploring policy options with a behavioral climate-economy model". *System Dynamics Review* 18.2 (2002), s. 243–267. ISSN: 0883-7066. DOI: [10.1002/sdr.241](https://doi.org/10.1002/sdr.241). URL: <http://doi.wiley.com/10.1002/sdr.241>.

- [12] U.S. Department of Energy. *Climate Change Intergated Assessment Research*. Tekninen raportti. U.S. Department of Energy, 2009, s. 100. URL: [http://science.energy.gov/\\$\sim\\$/media/ber/pdf/ia_workshop_low_res_06_25_09.pdf](http://science.energy.gov/\sim/media/ber/pdf/ia_workshop_low_res_06_25_09.pdf).
- [13] American Institute of Physics. *The Discovery of Global Warming: Simple Models of Climate Change*. URL: <http://www.aip.org/history/climate/simple.htm> (viitattu 06.12.2013).
- [14] American Institute of Physics. *The Discovery of Global Warming: General Circulation Models of Climate*. URL: <http://www.aip.org/history/climate/GCM.htm> (viitattu 06.12.2013).
- [15] Thomas S Fiddaman. "Feedback Complexity in Integrated Climate-Economy Models by". Tohtorinväitöskirja. Massachusetts Institute of Technology, 1997, s. 360.
- [16] Intergovernmental Panel on Climate Change. *IPCC:n historiasivu*. URL: http://www.ipcc.ch/organization/organization_history.shtml (viitattu 05.12.2013).
- [17] UNFCCC. *UNFCC:n kotisivu*. URL: <http://unfccc.int/> (viitattu 06.12.2013).
- [18] Climate Interactive. *C-ROADS-ilmastomalli v.3.012.034*.
- [19] Climate Interactive. *C-ROADS-ilmastomallin kotisivu*. URL: <http://www.climateinteractive.org/simulations/C-ROADS/overview> (viitattu 27.11.2013).
- [20] Tom Fiddaman et al. *C-ROADS Simulator Reference Guide*. September. 2012, s. 210. URL: <http://www.climateinteractive.org/simulations/C-ROADS/technical/technical-reference/c-roads-reference-guide>.
- [21] Andrew Jones. *The Dynamics of Climate Change: Understanding and Influencing the Planet*. 2013. URL: <http://youtu.be/EDI7bZbGxNI>.
- [22] Elizabeth R. Sawin et al. "Current Emissions Reductions Proposals in the Lead-Up COP-15 Are Likely to be Insufficient to Stabilize Atmospheric CO2 Levels: Using C-ROADS – A Simple Computer Simulation of Climate Change – To Support Long-Term Climate Policy Development". March (2009), s. 1–12.

- [23] John D. Sterman. “Communicating climate change risks in a skeptical world”. *Climatic Change* 108.4 (elokuuta 2011), s. 811–826. ISSN: 0165-0009. DOI: [10.1007/s10584-011-0189-3](https://doi.org/10.1007/s10584-011-0189-3). URL: <http://link.springer.com/10.1007/s10584-011-0189-3>.
- [24] UNFCCC. *Kööpenhaminan ilmastokokouksen kotisivu*. URL: http://unfccc.int/meetings/copenhagen_dec_2009/meeting/6295.php (viitattu 08.12.2013).
- [25] United Nations Framework Convention on Climate Change. *Kyoto Protocol Reference Manual*. Bonn, 2008, s. 130. ISBN: 92-9219-055-5.
- [26] Robert Watson et al. *Summary Statement from the C-ROADS Scientific Review Panel*. Tekninen raportti. 2009, s. 1. URL: <http://www.climateinteractive.org/simulations/C-ROADS/technical/scientific-review/C-ROADSScientificReviewSummary-1.pdf>.
- [27] Climate Interactive. *En-ROADS-ilmastomallin kotisivu*. URL: <http://climateinteractive.org/simulations/en-roads> (viitattu 05.12.2013).
- [28] Hal Harvey, Franklin M. Orr ja Clara Vondrich. “A Trillion Tons”. *Daedalus* 142.1 (tammikuuta 2013), s. 8–25. ISSN: 0011-5266. DOI: [10.1162/DAED_a_00182](https://doi.org/10.1162/DAED_a_00182). URL: http://www.mitpressjournals.org/doi/abs/10.1162/DAED_a_00182.
- [29] Climate Interactive. *En-ROADS-ilmastomalli v.0.9*.
- [30] W D Nordhaus. “An optimal transition path for controlling greenhouse gases.” *Science (New York, N.Y.)* 258.5086 (marraskuuta 1992), s. 1315–9. ISSN: 0036-8075. DOI: [10.1126/science.258.5086.1315](https://doi.org/10.1126/science.258.5086.1315). URL: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17778354>.