

Juho Salmi

Ilmastomuutoksen systeemidynaaminen mallinnus ja simulointi

Sähkötekniikan korkeakoulu

Kandidaatintyö
Espoo 16.12.2013

Vastuupettaja:

TkT Pekka Forsman

Työn ohjaajat:

DI Tomi Sorasalmi

TkT Pekka Forsman

Tekijä: Juho Salmi		
Työn nimi: Ilmastomuutoksen systeemidynaaminen mallinnus ja simulointi		
Päivämäärä: 16.12.2013	Kieli: Suomi	Sivumäärä:3+25
Koulutusohjelma: Automaatio- ja systeemitekniikka		
Vastuupettaja: TkT Pekka Forsman		
Ohjaajat: DI Tomi Sorasalmi, TkT Pekka Forsman		
<p>Tämän kandidaatintyön tavoite on tutkia systeemidynamiikan soveltamista ilmastomuutoksen mallinnuksessa ja simuloinnissa. Työssä keskitytään tutkimaan systeemidynaamisen mallinnuksen etuja sekä erilaisten ilmastomallien eroja. Työssä tutustutaan systeemidynamiikan ja ilmastomallien peruseriaatteisiin sekä paneudutaan ilmastomuutoksen systeemidynaamiseen mallinnukseen kolmen systeemidynaamisen ilmastomallin avulla. Malleja vertaillaan keskenään ja muihin ilmastomalleihin.</p> <p>Työssä havaitaan, että ilmastomalleja on erilaisiin tarkoituksiin. C-ROADS-ilmastomallilla tutkitaan kasvihuonekaasupäästöjen leikkausten vaikutuksia ja EnROADS-ilmastomallilla tutkitaan poliittisten päätösten vaikutusta ilmaston lämpenemiseen. FREE-ilmastomallilla voidaan edellisten lisäksi tutkia poliittisten päätösten vaikutuksia ilmaston lämpenemisen myötä ihmisten hyvinvointiin.</p> <p>Työssä esitetään, että systeemidynamiikka soveltuu erinomaisesti yksinkertaisten fysikaalisten ja yhdistettyjen ilmastomallien kehittämiseen. Systeemidynamiikan suurin etu ilmastomuutoksen mallinnuksessa on sen ilmaisuvoimassa. Systeemidynaamisen mallien kausaalidiagrammeilla voidaan johdattaa ihmiset ymmärtämään systeemin dynamiikkaa paremmin kuin matemaattisilla yhtälöillä.</p>		
Avainsanat: Systeemidynamiikka, ilmastomuutos, ilmastomalli, ilmaston lämpeneminen, C-ROADS, En-ROADS, FREE		

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	ii
Sisällysluettelo	iii
1 Johdanto	1
2 Systeemidynamiikka	2
2.1 Systeemidynamiikan historia	2
2.2 Systeemiajattelu ja päätöksenteko	3
2.3 Takaisinkytketyt systeemit	5
2.4 Viiveet, varastot ja virtaukset	7
3 Ilmastonmuutoksen mallintaminen	9
3.1 Ilmastotieteen, -mallien ja -politiikan historia	10
3.2 C-ROADS-ilmastomalli	11
3.2.1 Lämpöenergian kiertokulku	14
3.2.2 Hiilidioksidin kiertokulku	15
3.2.3 Takaisinkytkennät	16
3.3 En-ROADS-ilmastomalli	17
3.4 FREE-ilmastomalli	18
4 Yhteenveto ja johtopäätökset	21
Viitteet	23

1 Johdanto

Systeemidynamiikka on tietokoneavusteinen lähestymistapa päätöksentekoon ja mutkikkaiden systeemien mallintamiseen. Sen yksi keskeisistä sanomista on ymmärryksen lisääminen. Systeemidynamiikan yksi tunnustetuimmista asiantuntijoista, professori 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 hahmottamiseen.

Systeemidynaaminen malli rakentuu varastojen, virtausten sekä takaisinkytkettyjen silmukoiden varaan. Systeemidynamiikan tapa lähestyä asioita tarjoaa erinomaiset työkalut päätöksenteolle sekä ajattelulle yleisesti. Yksi keskeinen systeemidynamiikan etu on sen ilmaisuvoima. Systeemidynaamisessa mallintamisessa käytetään kausaalidiagrammeja, joiden avulla on helppo tutkia systeemin vuorovaikutuksia ja ne kiteyttävät hyvin, mistä systeemidynaamisessa mallissa on kyse. Systeemidynaamiset mallit ovat laskennallisesti kevyitä, joten mallien parametrien muuttamisen vaikutusten tutkiminen käy hetkessä.

Ilmastonmuutos on tilastollisesti merkittävää ja pitkäkestoista muutosta globaalissa tai paikallisessa ilmastossa. Ilmastonmuutosta mallinnetaan, jotta kyettäisiin arvioimaan, miten ihmisen toiminta vaikuttaa ilmastoon, ja mitä siitä seuraa. Ilmastoa voidaan mallintaa monin eri tavoin. Eri asioiden tutkimiselle on omat mallinsa. Malleilla kyetään esimerkiksi tutkimaan lisääntyvien kasvihuonekaasujen vaikutuksia ilmaston lämpenemiseen tai erilaisten energiapoliittisten päätösten vaikutuksia kasvihuonekaasupäästöihin.

Tämän kandidaatintyön tavoite on tutkia systeemidynamiikan soveltamista ilmastonmuutoksen mallinnuksessa ja simuloinnissa. Erityisesti tavoitteena on tutkia, mitä lisäarvoa systeemidynamiikka tuo ilmastonmuutoksen mallintamiseen, ja mitä eroja erilaisilla ilmastomalleilla on. Tavoitteen saavuttamiseksi työ on jaettu johdannon lisäksi kolmeen lukuun. Aluksi luvussa 2 tutustutaan työn kannalta välttämättömiin systeemidynamiikan perusperiaatteisiin. Luvussa 3 otetaan katsaus ilmastotieteeseen ja ilmastonmuutoksen mallintamiseen sekä yleisesti että systeemidynamiisiin malleihin syventyen. Lopuksi luvussa 4 tehdään yhteenveto tämän kandidaatintyön löydöksistä.

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 peruseräpäätteisiin, jotka ovat välttämättömiä luvun 3 systeemidynamiikan 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] vuonna 1961. [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.

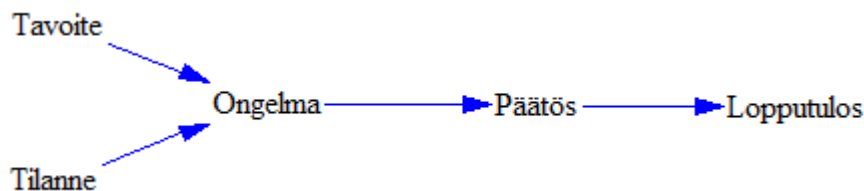
Samat takaisinkytkettyjen systeemien periaatteet olivat yleistettävissä eri tieteenaloille, minkä johdosta monilla aloilla otettiin systeemidynaamiikan menetelmiä käyttöön. Systeemidynaamiikasta kehittyikin nopeasti hyvin poikkitieteellinen ala. [1, 3, 7]

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.

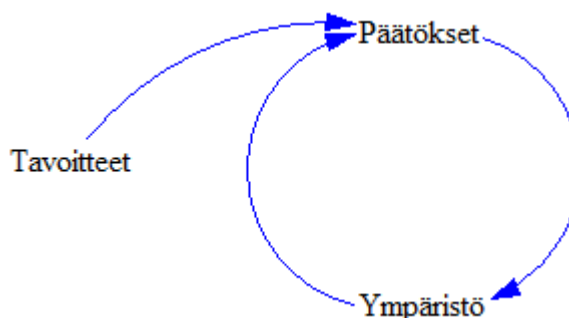
Päätöksenteon maailmankuvan voi jakaa tapahtumasuuntautuneeseen ja takaisinkytkentäsuuntautuneeseen. Seuraava kuva 1 esittää tapahtumasuuntautunutta maailmankuvaa. Tapahtumasuuntautuneisuus on ihmiselle luontevaa, sillä se on lineaarista ja suoraviivaista: jokaisella teolla on seurauksensa. Kun on tilanne 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 huomioda, ja päätöksistä saattaa seurata odottamattomia sivuvaikutuksia. [1, s. 10]



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

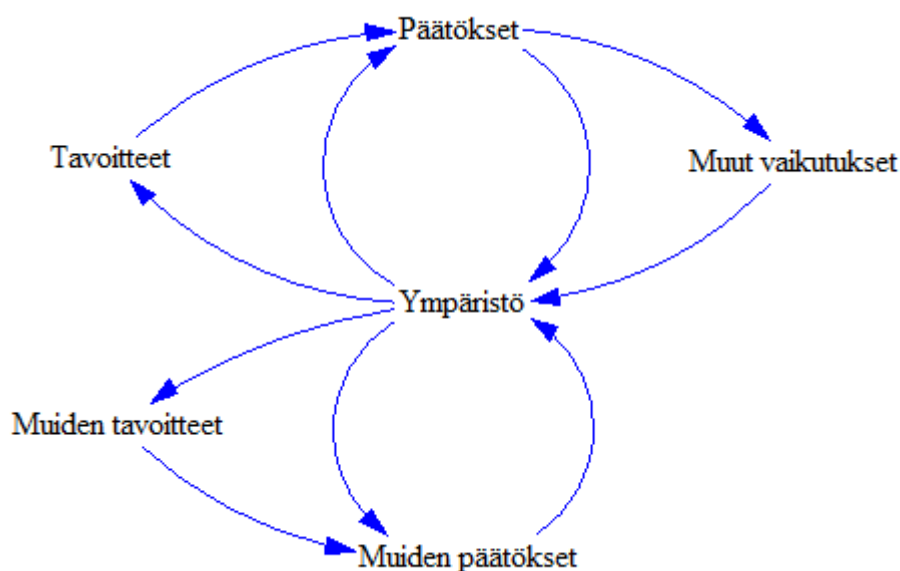
Stermanin [1, s. 11] mukaan sivuvaikutuksia ei ole todellisuudessa kuitenkaan olemassa. On vain olemassa vuorovaikutussuhteita, joita ei ole otettu huomioon. Seu-

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

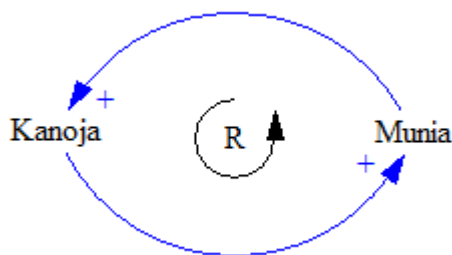
Systeemeissä on sisäsyntyisiä eli endogeenisiä (eng. endogenous) sekä ulkosyntyisiä eli eksogeenisiä (eng. exogenous) muuttujia. Sisäsyntyisen muuttujan arvo määräytyy systeemin sisäisen dynamiikan seurauksena, kun taas ulkosyntyisen muuttujan arvo annetaan systeemin ulkopuolelta, eikä näin ollen riipu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

Systeemeillä on tuloja ja lähtöjä. Tulot (myös sisäänvalo, 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. [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.

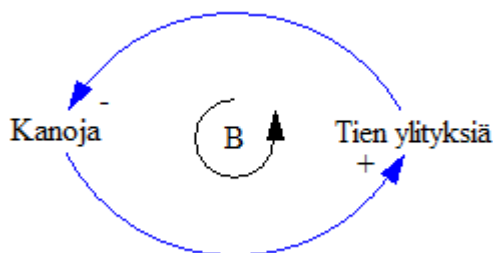
Systeemidynaamisia malleja esitetään kausaalidiagrammein, joihin merkitään systeemin osat eli muuttujanimet sekä niiden väliset vuorovaikutussuhteet kausaalilyhteysnuolten avulla. Nuolet piirretään lähtemään muuttujasta, joka vaikuttaa nuolen päätepisteen muuttujaan. Toisin sanoen nuoli kuvaa sitä, että 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: positiivisia ja negatiivisia. 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] Stermanin mukaan [8] viestittäessä takaisinkytkennöistä suurelle yleisölle, tulee välttää myönteisyyteen ja vastaisuuteen viittaavia termejä "positiivinen" ja "negatiivinen". Siksi tässä työssä käytetään silmukoiden yhteydessä termejä "vahvistava" ja "tasapainottava".

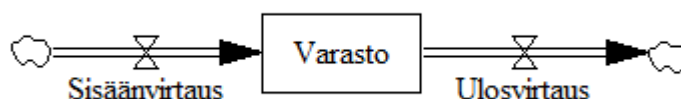
2.4 Viiveet, varastot ja virtaukset

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]



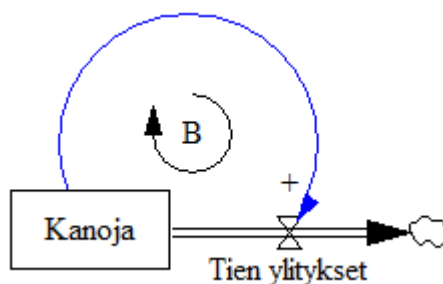
Kuva 7: Yksinkertainen kausaalidiagrammi varastoista ja virtauksista. [1, s. 150]

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. [9]

3 Ilmastomuutoksen mallintaminen

Ilmastomuutos on tilastollisesti merkittävää ja pitkäkestoista muutosta globaalissa tai paikallisessa ilmastossa. Nykyisin tiedetään, että hiilidioksidi ja muut kasvihuonekaasut hidastavat maapallon lämpösäteilyn karkaamista avaruuteen. Kasvihuonekaasujen 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. [10]

Ilmastoa mallinnetaan ja simuloidaan, jotta ilmaston käyttäytymistä – etenkin ilmaston lämpenemistä ja sen seurauksia – ymmärrettäisiin paremmin. Kun ilmaston käyttäytyminen tunnetaan, voidaan tehdä valistuneita ilmastopoliittisia päätöksiä kasvihuonekaasupäästöjen leikkaamiseksi. [11] Päästöjen leikkaaminen heikentää talouskasvua ja hyvinvointia lyhyellä aikajänteellä, mutta maksaa itsensä takaisin pitkällä aikajänteellä, kun ihmiskunnan ei tarvitse käyttää resurssejaan lämpenemisestä johtuvien ongelmien korjaamiseen. Kalliiksi tulee sekä liika päästöjen leikkaaminen että liian vähäinen päästöjen leikkaaminen. Leikkausten saavuttamiseksi voidaan käyttää monenlaisia keinoja päästöveroista päästöttömän energiatuotannon tukemiseen. Mallien avulla etsitäänkin optimaalisia leikkauksia sekä optimaalisia keinoja leikkausten saavuttamiseksi. [12]

Ilmastomuutoksen mallintamiseen tarvitaan aina jonkinlainen fysikaalinen malli. 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 simuloiminen kestää. [11]

Fysikaalista mallia voidaan laajentaa ottamalla huomioon ihmiskunnan ja ilmaston keskinäinen vuorovaikutus. Eri tieteenaloja yhdisteleivistä malleista käytetään tässä työssä nimitystä yhdistetty malli (eng. integrated assessment model). Yhdistetyillä ilmastomalleilla voidaan esimerkiksi tutkia, miten ilmastomuutos, väestönkasvu, talouskasvu ja hyvinvointi vaikuttavat toisiinsa. [13]

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. Historiaosuuden tavoite on auttaa ymmärtämään taustaa, miksi mallintamiseen on alettu käyttää myös systeemidynaamisia menetelmiä. Seuraavien alilukujen tavoite on esimerkkien kautta ymmärtää systeemidynaamisen ilmastomallinnuksen periaatteet. Aliluvussa 3.2 paneudutaan fysikaaliseen C-ROADS-ilmastomalliin. Tästä saavutettua ymmärrystä systeemidynaamisista ilmastomalleista laajennetaan aliluvuissa 3.3 ja 3.4 nopealla katsauksella yhdistettyihin systeemidynaamisiin En-ROADS- ja FREE-ilmastomalleihin.

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. [14]

1930-luvulla tehtiin ensimmäisiä havaintoja ilmaston lämpenemisestä. Keskustelu ilmaston lämpenemisestä jäi spekulatation 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. [10] 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. [15]

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. [15] Samaan aikaan tehtiin ensimmäiset löydökset ilmaston takaisinkytkennöistä, jotka saattaisivat tehdä ilmastosta yllättävänkin epävakaa. Ilmaston lämpenemistä ei kuitenkaan osattu nähdä vielä uhkana. [10]

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. [14] Seuraavissa aliluvuissa esiteltävät systeemidynaamiset mallit ovat yksinkertaisia ilmastomalleja, joista ensimmäisen julkaisi Tom Fiddaman väitöskirjassaan vuonna 1997 [16].

Ilmastotutkimus kehittyi hitaasti, mutta sai kunnon sykäyksen 1980-luvun lopulle tultaessa ilmastomuutokseen jälleen havahduttaessa [10]. Tällöin perustettiin Hallitustenvälinen ilmastomuutospaneeli IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) kokoamaan ja arvioimaan ihmisen aiheuttaman ilmaston lämpenemistä ja sen vaikutuksia koskevaa tieteellistä tutkimusta. [17].

1990-luvulla ilmastomallit olivat päässeet ennusteissa jo hyvään tarkkuuteen [10]. Tieteellinen tutkimus ei ole vielä kukaan antanut täyttä varmuutta kaikista ilmaston ominaisuuksista, joten ilmastomalleissa on väistämättä osia, jotka perustuvat spekulatioon [11]. 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. [10]

Ilmastomuutoksen torjumiseksi perustettiin vuonna 1992 YK:n ilmastomuutoskonventti 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 ilmastosopimuksen. Kioton ilmastosopimuksen ratifioineet maat sitoutuivat vähentämään tietyn prosenttiosuuden kasvihuonepäästöistään vuoden 1990 tasosta ilmastomuutoksen 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. [18]

3.2 C-ROADS-ilmastomalli

Stermanin [11] 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 tar-

kat ilmastomallit, ja Stermanin [11] mukaan harva yksinkertaisista ilmastomalleista on riittävän nopea. Malleja vaivaa myös se, että ne eivät ole välttämättä julkisesti ja helposti kaikkien saatavilla, ja niiden toimintaperiaatteita on vaikea ymmärtää. Ilman riittävää ymmärrystä ja sopivia työkaluja neuvottelijat ja päättäjät joutuvat siis turvautumaan omaan intuitioonsa. Tässä aliluvussa tutustutaan C-ROADS-ilmastomalliin ensin yleisesti sekä tutkitaan, miten mallilla on ratkaistu edellä mainittuja ongelmia. Tämän jälkeen tutustutaan mallin teknisen toteutuksen keskeisiin yksityiskohtiin.

Climate Interactiven kehittämä C-ROADS (Climate-Rapid Overview And Decision Support) on yksinkertainen fysikaalinen ilmastomalli, joka perustuu Fiddamanin [16] 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 herkkyysparametrille hiilidioksidin ilmastoa lämmittävälle vaikutukselle. [11, 19] C-ROADS on viritetty ja osoitettu toimivaksi historiadatan sekä tarkkojen fysikaalisten mallien avulla. Malli kykenee siis toistamaan historiadatan käyttäytymistä sekä antaa eri parametrein samoja ennusteita kuin parhaat tarkimmista ilmastomalleista [11, 20].

Mallia kehittäneen Stermanin mukaan [8] erinomainen tapa saada ihmiset ymmärtämään ilmastomuutosta on interaktiivisten simulaatioiden avulla, jossa henkilö pääsee itse kokeilemaan erilaisten toimenpiteiden seurauksia. C-ROADS-malli on kehitetty tämän ajatuksen pohjalta. Mallin tarkoitus on auttaa ihmisiä ymmärtämään, miten ilmasto toimii ja millaiset pitkän aikajänteen seuraukset erilaisilla ilmastopoliittisilla päätöksillä kasvihuonekaasupäästöjen leikkaamiseksi on. [11, 20]

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. [11, 19, 20] Kullekin valtiolle tai alueelle on määritetty omat bruttokansantuotteen ja väestönkasvun lukemat, jotka vaikuttavat syntyviin päästöihin [21]. 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. [20]

Climate Interactiven Andrew Jones [22] 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. [11, 20, 22]

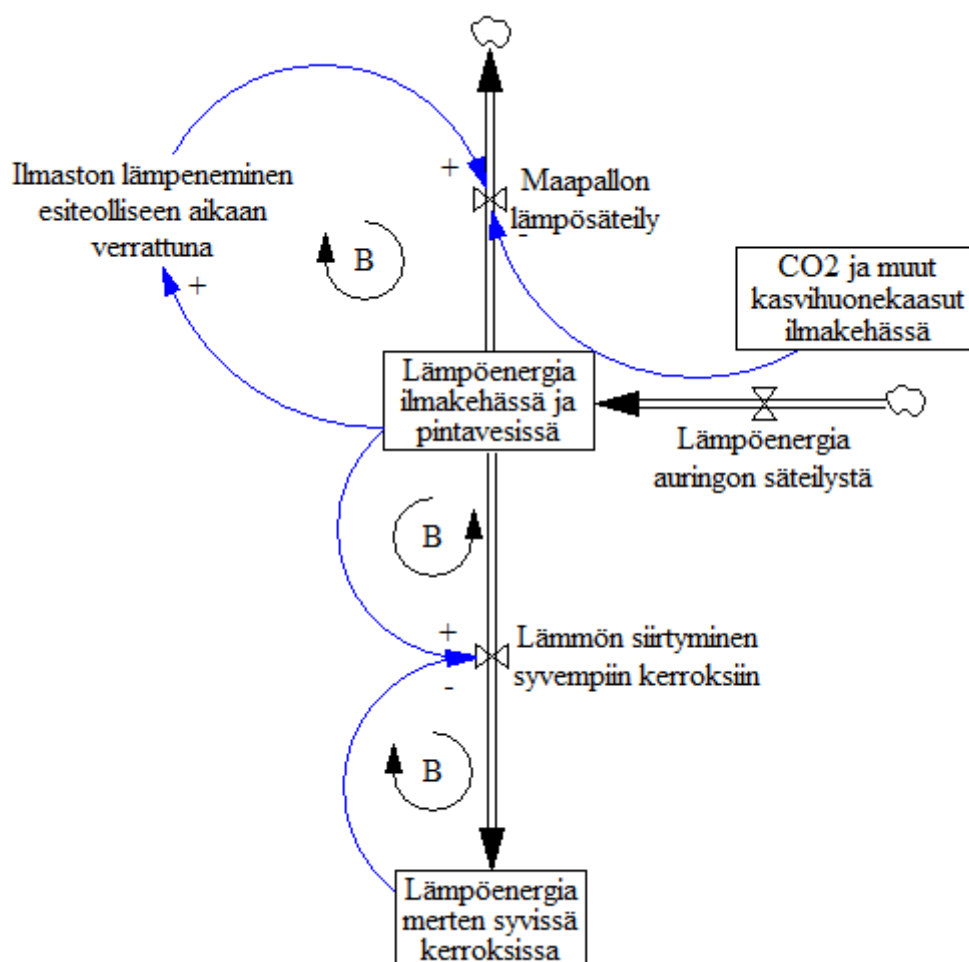
C-ROADS-ilmastomallilla ennustettiin vuonna 2009, että ilmaston lämpenemisen rajoittamiseksi 2 °C:een olisi globaalisti hiilidioksidipäästöjä leikattava vuoteen 2050 mennessä 80 % vuoden 1990 tasosta ja metsien tuhoutumisesta syntyviä päästöjä 90 % vuoden 2009 tasosta [8, 23]. Ennusteen tekijät kuitenkin huomauttavat C-ROADS jättää huomiotta osan mahdollisista ilmaston takaisinkytkennöistä tai antaa niille varovaisen takaisinkytkennän voimakkuutta määrittävän herkkyysparametrin. Tästä johtuen todellinen tarve kasvihuonepäästöjen vähennyksille saattaa olla ennusteen mukaista suurempi. [8, 23] Leikattavaa kasvihuonekaasupäästöissä olisi siis joka tapauksessa paljon enemmän, kuin millaisiin tavoitteisiin Kööpenhaminan ilmastokokouksessa päästiin vuonna 2009. [23, 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 [19], 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. [11, 19, 21] Seuraavaksi tutustutaan C-ROADS:n teknisen toteutuksen kannalta keskeisiin lämpöenergian ja hiilidioksidin 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.

3.2.1 Lämpöenergian kiertokulku

Seuraava kuva 9 on C-ROADS-ilmastomallin lämpöenergian kiertokulun kausaali-diagrammi. 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. [11, 19]



Kuva 9: C-ROADS-ilmastomallin lämpöenergian kiertokulku yksinkertaistettuna. [19]

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 ilmakehän lämpeneminen lisää lämmön siirtymistä syvempiin kerroksiin, mikä nopeuttaa syvien kerrosten lämpenemistä. Ylimmässä silmukas-

sa ilmaston lämpeneminen lisää maapallon lämpösäteilyä avaruuteen, mikä vähentää ilmakehän ja pintavesien lämpöenergiaa. Hiilidioksidi ja muut kasvihuonekaasut puolestaan vähentävät maapallon lämpösäteilyä avaruuteen. Tällöin häiriintyy tasapaino, jossa ilmakehään tulee yhtä paljon lämpöenergiaa kuin sieltä lähtee. Kasvihuonekaasujen lisääntyessä ilmasto siis lämpenee, kunnes lämpöenergia alkaa jälleen virrata pois ilmakehästä yhtä nopeasti kuin sitä tulee auringon lämpösäteilystä. [11, 19]

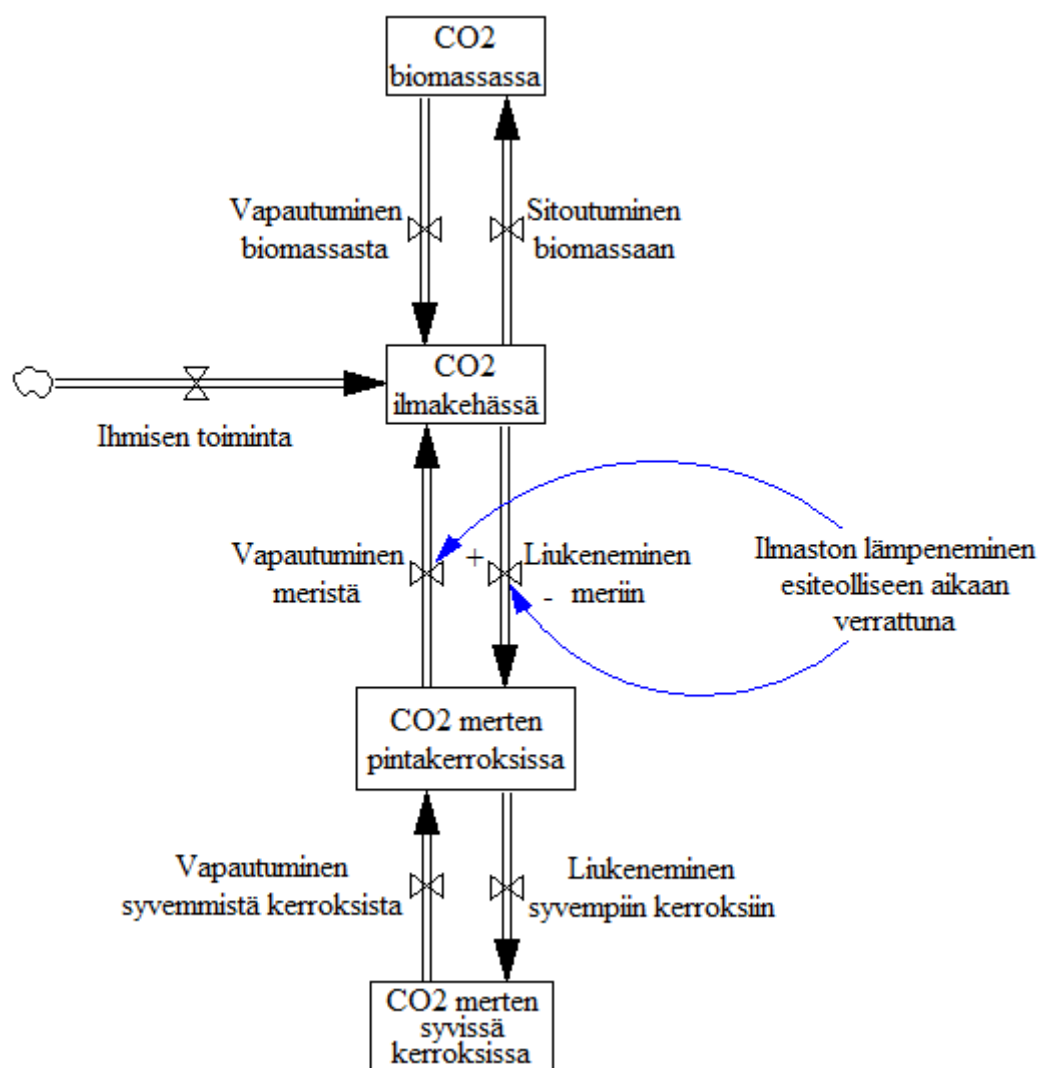
3.2.2 Hiilidioksidin kiertokulku

Seuraava kuva 10 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. [11, 19]

Ilmakehän hiilidioksidia liukenee merten pintakerrokseen, josta se voi liueta syvempiin kerrokseen. Virta ei ole kuitenkaan yksisuuntainen, vaan hiilidioksidi voi liueta syvemmistä kerroksista kohti pintaa ja vapautua pintakerroksista ilmakehään. Kuvaan 10 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. [11, 19]

Biomassan kasvattaminen sitoo ilmakehän hiilidioksidia. Mallissa pystyy lisäämään biomassan määrää lisäämällä metsien kasvattamista sekä vähentämällä niiden tuhoutumista. Mallissa ainoat keinot vaikuttaa ilmakehän kasvihuonekaasujen määrään sekä siten ilmaston lämpenemiseen ovat päästöjen vähentäminen ja biomassan lisääminen. [19]

Systeemiin tulee hiilidioksidia, mutta sitä ei poistu lainkaan. Systeemi muistuttaa 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. Olennaista ei ole, kuinka paljon hiilidioksidia ilmakehään milläkin hetkellä vapautuu, vaan kuinka paljon sinne on aikojen saatossa hiilidioksidia vapautunut. Tämä



Kuva 10: C-ROADS-ilmastomallin hiilidioksidin kiertokulku yksinkertaistettuna. [19]

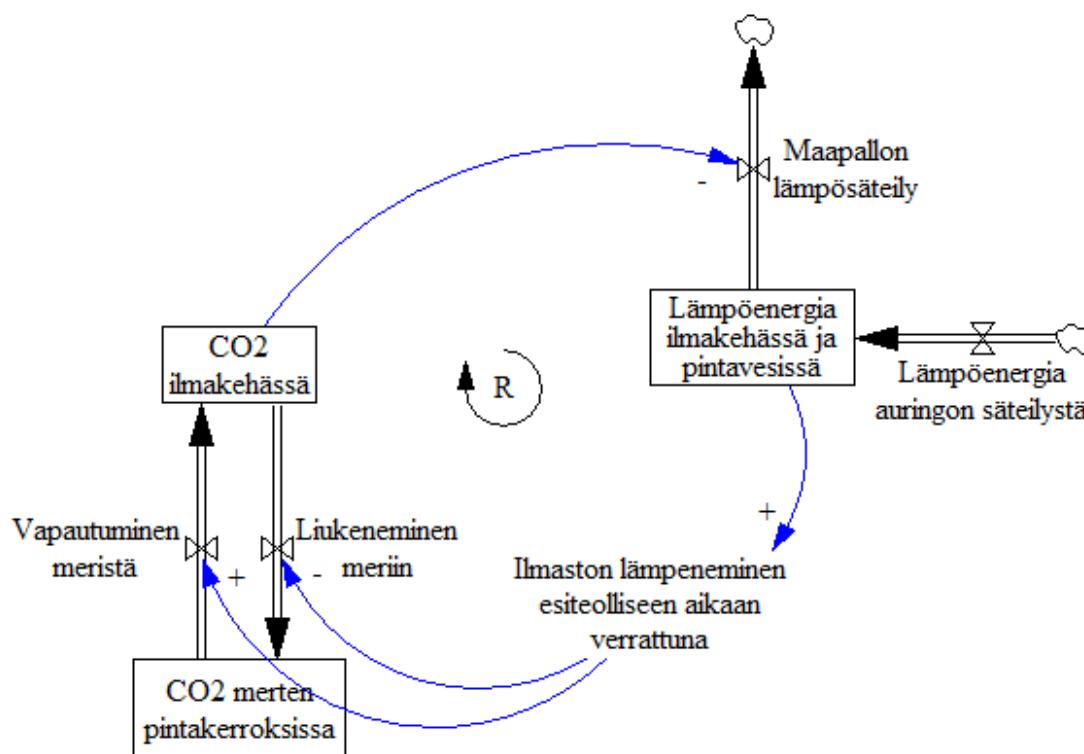
on yksi keskeinen asia, jota ihmisten on vaikea hahmottaa. [11]

Todellisuudessa systeemistä poistuu jonkin verran hiilidioksidia – tai tarkalleen ottaen hiiltä – biomassan vapauttaessa metaania. Tämä on C-ROADS:ssa myös mallinnettu, mutta sen merkitys hiilidioksidin kiertokulun kannalta on pieni. [19]

3.2.3 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 ilmaston lämpenemiseen, mi-

kä heikentää hiilidioksidin liukoisuutta meriin, mikä puolestaan lisää hiilidioksidin määrää ilmakehässä. [11, 19]



Kuva 11: C-ROADS-ilmastomallin mereen liuenneen hiilidioksidin ja ilmaston lämpenemisen vahvistava silmukka yksinkertaistettuna. [19]

Mallissa on enemmänkin vastaavanlaisia takaisinkytkentöjä. Esimerkiksi biomasan 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 tuottamaan enemmän metaania. Metaani on kasvihuonekaasu, joten sen lisääntyminen ilmakehässä lämmittää ilmastoa. [11]

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. [11]

3.3 En-ROADS-ilmastomalli

Climate Interactiven kehittämä En-ROADS (Energy-Rapid Overview And Decision Support) on FREE-ilmastomalliin pohjautuva, systeemidynaaminen, yhdistet-

ty 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 maailmanlaajuisista kehityksestä, 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 energiatuotantollisiin 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 kivihiileen, öljyyn ja maakaasuun, uusiutuviin bioenergiaan, vesivoimaan ja muihin uusiutuviin sekä ydinvoimaan ja uusiin energiatuotantomuotoihin. Eri tavat tuottaa energiaa vapauttavat ilmakehään eri määrän kasvihuonekaasuja. [29]

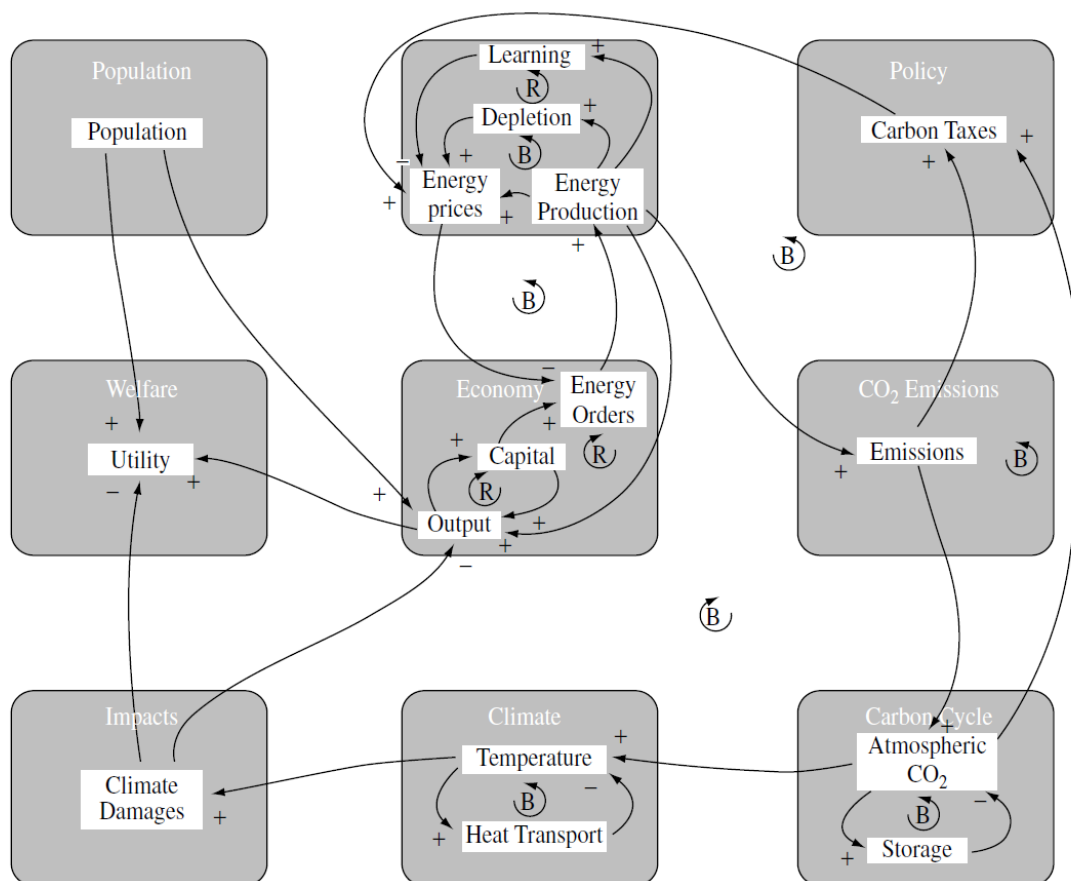
Mallissa voi tehdä useita erilaisia toimenpiteitä ja poliittisia päätöksiä energiatuotannon ja talouden ohjaamiseksi. Energiamuotoja voidaan verottaa tai tukea ja niiden houkuttelevuutta voidaan säätää, päästöille voidaan asettaa hinta, energiatehokkuutta voidaan parantaa ja uusien energiateknologioiden kehitykseen voidaan panostaa. Nämä toimenpiteet ja päätökset vaikuttavat energiatuotantoon ja talouteen sekä sen myötä päästöihin ja ilmaston lämpenemiseen. [28, 29] Harvey ym. [28] esittävät 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.

3.4 FREE-ilmastomalli

FREE (Feedback-Rich Energy-Economy) on Tom Fiddamanin kehittämä systemdynaaminen, yhdistetty ilmastomalli, jonka hän julkaisi väitöskirjassaan vuonna 1997. Malli on rakennettu Nordhausin DICE-ilmastomallin [30] pohjalta. [16] En-ROADS on hyvin pitkälti FREE:n pohjalta rakennettu malli, joten mallit ovat yleisellä tasolla hyvin samanlaiset. Fiddaman kritisoi [12], että tyypillisesti sen aikaisissa yhdistetyissä malleissa on runsaasti ulkosyntyisiä muuttujia, äärettömiä ja lineaarisia hiilidioksidinieluja, sekä puutteelliset viiveet, takaisinkytkennät ja vuorovaikutukset. Lisäksi ne antavat enemmän painoarvoa rikkaiden maiden ja nykyisten

sukupolvien hyvinvoinnille ja olettavat toimintaa täydellisen tiedon valossa. Näitä ongelmia Fiddeman on korjannut FREE-malliin.

Seuraava kuva 12 on FREE-ilmastomallin rakenteen yleiskuva ylätasen kausaalidiagrammilla kuvattuna. Malli koostuu yhdeksästä osamallista, joista kaksi on jätetty En-ROADS:ssa mallintamatta. Nämä osamallit ovat ihmiskunnan hyvinvointi sekä ilmastomuutoksen aiheuttamat vahingot niin talouteen kuin ihmiskunnan hyvinvointiin. Ilmaston lämpeneminen heikentää kansantuotetta ja ihmisten hyvinvointia. Kansantuotteen kasvu puolestaan parantaa ihmisten hyvinvointia. [12, 16]



Kuva 12: FREE-ilmastomallin rakenne. [12]

Ilmaston lämpenemisen aiheuttamat vahingot lasketaan suoraviivaisesti ilmaston lämpenemisestä. Hyvinvoinnille on puolestaan kertymähyötyfunktio. Hyödyksi katsotaan ihmisten mahdollisuus kuluttaa, mikä syntyy kansantuotteesta. Kertymähyötyfunktio laskee tarkasteluajanjakson hyötykertymän. Kertymää voidaan painottaa hyvintasoeroja kuvaavalla parametrilla sekä sukupolvien välistä oikeudenmukaisuutta kuvaavalla parametrilla, jolla voidaan esimerkiksi asettaa nykyhetken

hyödylle suurempi painoarvo kuin vuoden 2050 hyödylle. [12, 16] Fiddaman [12] on etsinyt mallin avulla optimaalista tapaa vähentää kasvihuonekaasupäästöjä ja hän esittää, että päästölupien sijaan päästöverot on parhaan hyvinvoinnin tuottava tapa niiden vähentämiseksi.

4 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tämän kandidaatintyön tavoitteeksi asetettiin tutkia systeemidynamiikan soveltamista ilmastomuutoksen mallinnukseen ja simulointiin. Erityisesti oltiin kiinnostuneita tietämään, mitä lisäarvoa systeemidynamiikka tuo ilmastomuutoksen mallintamiseen, ja mitä eroja erilaisilla ilmastomalleilla on. Luvussa 2 tutustuttiin työn kannalta välttämättömiin systeemidynamiikan perusperiaatteisiin: systeemiajatteluun, päätöksentekoon, takaisinkytkentöihin, viiveisiin, varastoihin ja virtauksiin. Luvussa 3 otettiin katsaus ilmastotieteeseen ja ilmastomuutoksen mallintamiseen sekä yleisesti että systeemidynamiisiin malleihin syventyen. Aliluvussa 3.2 tutkittiin C-ROADS-ilmastomallia. Ensin tutustuttiin mallin ratkaisemiin ilmastoneuvotteluihin liittyviin ilmastomallien ongelmiin ja sitten mallin tekniseen toteutuksen keskeisiin osiin: lämpöenergian ja hiilidioksidin kiertokulkuihin sekä takaisinkytkentöihin. Tästä saavutettua ymmärrystä systeemidynamiisista ilmastomalleista laajennettiin aliluvuissa 3.3 ja 3.4 tutustumalla yhdistettyihin systeemidynamiisiin En-ROADS- ja FREE-ilmastomalleihin. Tässä luvussa käsitellään työssä tehtyjä löydöksiä.

Systeemidynamiikassa keskitytään kausaalidiagrammien avulla tutkimaan takaisinkytkentöjä, epälineaarisuuksia, viiveitä, varastoja ja virtauksia. Tämä vaikuttaisi tehokkaalta lähestymistavalta yksinkertaisten ilmastomallien kehittämiseen, sillä systeemidynamiisten mallien ennusteet noudattavat historiadataa sekä parhaiden tarkkojen ilmastomallien ennusteita. Systeemidynamiisiin malleihin voidaan myös mallintaa spekulatiivisia osia, kuten takaisinkytkentöjä, joiden käyttäytymistä ei täysin tunneta. Niiden herkkyysparametreja säätämällä voidaan spekuloida systeemin todellista käyttäytymistä. Lisäksi systeemidynamiisen ilmastosimulaation ajaa sekunnin murto-osassa. Nämä ovat kuitenkin vain perusedellytykset hyvälle yksinkertaiselle ilmastomallille.

Merkityksellisemmät hyödyt systeemidynamiikasta on mallin käyttäjälle, joka voidaan mallin avulla johdattaa oppivaksi systeemiajattelijaksi. Kausaalidiagrammien ilmaisuvoimaisuuden ansiosta systeemin vuorovaikutukset on kenen tahansa hahmotettavissa ainakin pääpiirteittäin. Kausaalidiagrammeihin voidaan ohjata tyyppillisesti tapahtumaorientoituneesti ajatteleva käyttäjä hahmottamaan ilmaston takaisinkytkentöjä, epälineaarisuuksia, viiveitä, varastoja ja virtauksia. Sama ei onnistu matemaattisten yhtälöiden avulla. Myös mallin simulointi sekunnin murto-osassa helpottaa käyttäjää, joka voi hetkessä kokeilla, miten ilmasto muuttuu eri parametrien arvoilla. C-ROADS:n erityinen etu on mallin vapaa saatavuus ja malliin rakennettu käyttöliittymä, jotka tuovat ilmaston simuloinnin ja sen tutkimisen kenen tahansa saataville.

On tyypillistä, että systeemidynaaminen malli tehdään jonkin ongelman ratkaisemisen tueksi, eikä niinkään mahdollisimman tarkkaa todellisuuden mallintamista varten [1]. Mitä ilmeisimmin tämän vuoksi Climate Interactivella on olemassa erikseen C-ROADS- ja En-ROADS-ilmastomallit, vaikka En-ROADS sisältääkin C-ROADS:n toiminnallisuuden. Samoin En-ROADS ei sisällä kaikkea FREE-mallin toiminnallisuutta, sillä mallit painottavat eri asioita. C-ROADS:lla tutkitaan päästöleikkausten vaikutuksia ilmaston lämpenemiseen ja En-ROADS:lla tutkitaan poliittisten päätösten ja toimenpiteiden vaikutuksia energiatuotantoon, talouteen, päästökehitykseen sekä siten ilmaston lämpenemiseen. FREE on puolestaan kuin En-ROADS, mutta tutkii asiaa vahvemmin ihmiskunnan hyvinvoinnin, hyvinvointierojen ja sukupolvien välisen oikeudenmukaisuuden näkökulmasta.

Työssä keskityttiin jokseenkin yksipuolisesti Climate Interactiven sekä siinä mukana olevien Stermanin ja Fiddamanin tutkimuksiin ja systeemidynaamisiin ilmastomalleihin. Tämä johtuu siitä, että muita systeemidynaamisia malleja löytyi vain yksi [31], ja sekin pohjautuu FREE-ilmastomalliin. Muut löydetty systeemidynaamiset ilmastomuutosta läheisesti käsittelevät mallit keskittyivät pääasiassa tutkimaan energiatuotantoa ja päästöjä [32–34]. Systeemidynamiikka on kuitenkin vain eräänlainen esitystapa ja ajatusmalli. Fiddaman oli ilmastomuutoksen systeemidynaamista mallinnusta tutkiessaan ja FREE-ilmastomallia kehittäessään tehnyt DICE-ilmastomallista systeemidynaamisen esityksen. Sama onnistunee myös muille yksinkertaisille ilmastomalleille. Kuten mainittua, systeemidynaamisten mallien etu ei niinkään kumpua matemaattisista yhtälöistä, vaan kausaalidiagrammien ilmaisuvoimasta sekä pyrkimyksestä ohjata ihmiset systeemiajatteluun.

Tälle työlle jatkotutkimuksena voisi systeemidynaamisten ja muiden mallien ilmaisuvoimaa vertailla keskenään. Lisäksi, Fiddamanin tavoin, voisi muita yksinkertaisia ilmastomalleja tutkia systeemidynamiikan perspektiivistä.

Näkisin, että systeemidynamiikka soveltuu erinomaisesti yksinkertaisten fyysikaalisten ja yhdistettyjen ilmastomallien kehittämiseen. Systeemidynamiikka ja -ajattelu parhaimmillaan helpottavat todellisuutta vastaavan mallin luomista. Niiden suurin etu syntyy kuitenkin systeemidynaamisista kausaalidiagrammeista, joiden ilmaisuvoimalla voidaan ihmiset johdattaa ymmärtämään systeemin dynamiikkaa. Ilmaston takaisinkytkentöjen selittäminen ja hiilidioksidin kertyminen ilmakehään on merkittävästi helpompi esittää systeemidynaamisilla kausaalidiagrammeilla kuin matemaattisilla yhtälöillä.

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).
- [5] Jay W Forrester. *Industrial Dynamics*. 1961, s. 464. ISBN: 0-262-06003-5.
- [6] Jay W Forrester. "The Beginning of System Dynamics". *The McKinsey Quarterly* 4 (1995), s. 4–16. ISSN: 0047-5394.
- [7] Jay W. Forrester. "Industrial Dynamics — After the First Decade". *Management Science* 14.7 (1968), s. 398–415. ISSN: 0025-1909.
- [8] John D. Sterman. "Communicating climate change risks in a skeptical world". *Climatic Change* 108.4 (elokuu 2011), s. 811–826. ISSN: 0165-0009. DOI: [10.1007/s10584-011-0189-3](https://doi.org/10.1007/s10584-011-0189-3).
- [9] Linda Booth Sweeney ja John D. Sterman. *Bathtub Dynamics: Initial Results of a Systems Thinking Inventory Bathtub*. 2000. URL: <http://web.mit.edu/jsterman/www/Bathtub.pdf> (viitattu 07. 12. 2013).
- [10] American Institute of Physics. *The Discovery of Global Warming*. URL: <http://www.aip.org/history/climate/> (viitattu 07. 12. 2013).
- [11] 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. ISSN: 0034-6535.
- [12] 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).

- [13] 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).
- [14] 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).
- [15] 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).
- [16] Thomas S Fiddaman. "Feedback Complexity in Integrated Climate-Economy Models". Tohtorinväitöskirja. Massachusetts Institute of Technology, 1997, s. 360.
- [17] Intergovernmental Panel on Climate Change. *IPCC:n historiasivu*. URL: http://www.ipcc.ch/organization/organization_history.shtml (viitattu 05. 12. 2013).
- [18] UNFCCC. *UNFCC:n kotisivu*. URL: <http://unfccc.int/> (viitattu 06. 12. 2013).
- [19] Climate Interactive. *C-ROADS-ilmastomalli v.3.012.034*.
- [20] Climate Interactive. *C-ROADS-ilmastomallin kotisivu*. URL: <http://www.climateinteractive.org/simulations/C-ROADS/overview> (viitattu 27. 11. 2013).
- [21] 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>.
- [22] Andrew Jones. *The Dynamics of Climate Change: Understanding and Influencing the Planet*. 2013. URL: <http://youtu.be/EDI7bZbGxNI> (viitattu 06. 12. 2013).
- [23] 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. URL: <http://climateinteractive.org/scoreboard/scoreboard-science-and-data/C-ROADSAnalysisofCurrentProposals090311.pdf>.
- [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-ROADSScientificReviewS1.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 (tammikuu 2013), s. 8–25. ISSN: 0011-5266. DOI: [10.1162/DAED_a_00182](https://doi.org/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 (marraskuu 1992), s. 1315–9. ISSN: 0036-8075. DOI: [10.1126/science.258.5086.1315](https://doi.org/10.1126/science.258.5086.1315).
- [31] G. R. Davies Evan. "Modelling feedback in the society-biosphere-climate system". Tohtorinväitöskirja. The University of Western Ontario, 2007, s. 347. ISBN: 978-0-494-39349-9.
- [32] P.L. Kunsch, J. Springael ja J.-P. Brans. "The zero-emission certificates: A novel CO2-pollution reduction instrument applied to the electricity market". *European Journal of Operational Research* 153.2 (maaliskuu 2003), s. 386–399. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/S0377-2217\(03\)00160-7](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00160-7).
- [33] Eleeja Shrestha et al. "The carbon footprint of water management policy options". *Energy Policy* 42 (maaliskuu 2012), s. 201–212. ISSN: 03014215. DOI: [10.1016/j.enpol.2011.11.074](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.11.074).
- [34] Margarita Mediavilla et al. "The transition towards renewable energies: Physical limits and temporal conditions". *Energy Policy* 52 (tammikuu 2013), s. 297–311. ISSN: 03014215. DOI: [10.1016/j.enpol.2012.09.033](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.09.033).