

Juho Salmi

## **Ilmastomuutoksen systeemidynaaminen mallinnus ja simulointi**

**Sähkötekniikan korkeakoulu**

Kandidaatintyö  
Espoo 5.10.2013

**Vastuupettaja:**

TkT Pekka Forsman

**Työn ohjaajat:**

DI Tomi Sorasalmi

TkT Pekka Forsman

Tekijä: Juho Salmi

Työn nimi: Ilmastonmuutoksen systeemidynaaminen mallinnus ja simulointi

Päivämäärä: 5.10.2013

Kieli: Suomi

Sivumäärä:6+12

Koulutusohjelma: Automaatio- ja systeemitekniikka

Vastuuopettaja: TkT Pekka Forsman

Ohjaajat: DI Tomi Sorasalmi, TkT Pekka Forsman

Placeholderina alkuperäinen tehtävänanto: Systeemidynamiikkaa on käytetty paljon ympäristöongelmien sekä ilmastonmuutoksen mallintamisessa. Kandidityön 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

Author: Juho Salmi

Title: Modeling and Simulating Climate Change with System Dynamics

Date: 5.10.2013

Language: Finnish

Number of pages:6+12

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

# Esipuhe

Otaniemi, 24.9.2013

Juho T. Salmi

# Sisällysluettelo

<b>Tiivistelmä</b>	<b>ii</b>
<b>Tiivistelmä (englanniksi)</b>	<b>iii</b>
<b>Esipuhe</b>	<b>iv</b>
<b>Sisällysluettelo</b>	<b>v</b>
<b>Symbolit ja lyhenteet</b>	<b>vi</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>2 Systeemidynamiikka</b>	<b>3</b>
2.1 Systeemidynamiikan historia . . . . .	3
2.2 Systeemiajattelu ja päätöksenteko . . . . .	4
2.3 Takaisinkytketyt systeemit . . . . .	6
2.4 Viiveet, varastot ja virtaukset . . . . .	7
<b>3 Ilmastonmuutoksen mallintaminen</b>	<b>9</b>
3.1 Ilmastomallien historia . . . . .	9
3.2 C-roads-ilmastomalli . . . . .	9
3.3 En-Roads-ilmastomalli . . . . .	10
3.4 Muita ilmastomalleja . . . . .	10
<b>4 Yhteenveto</b>	<b>11</b>
<b>Viitteet</b>	<b>12</b>

# Symbolit ja lyhenteet

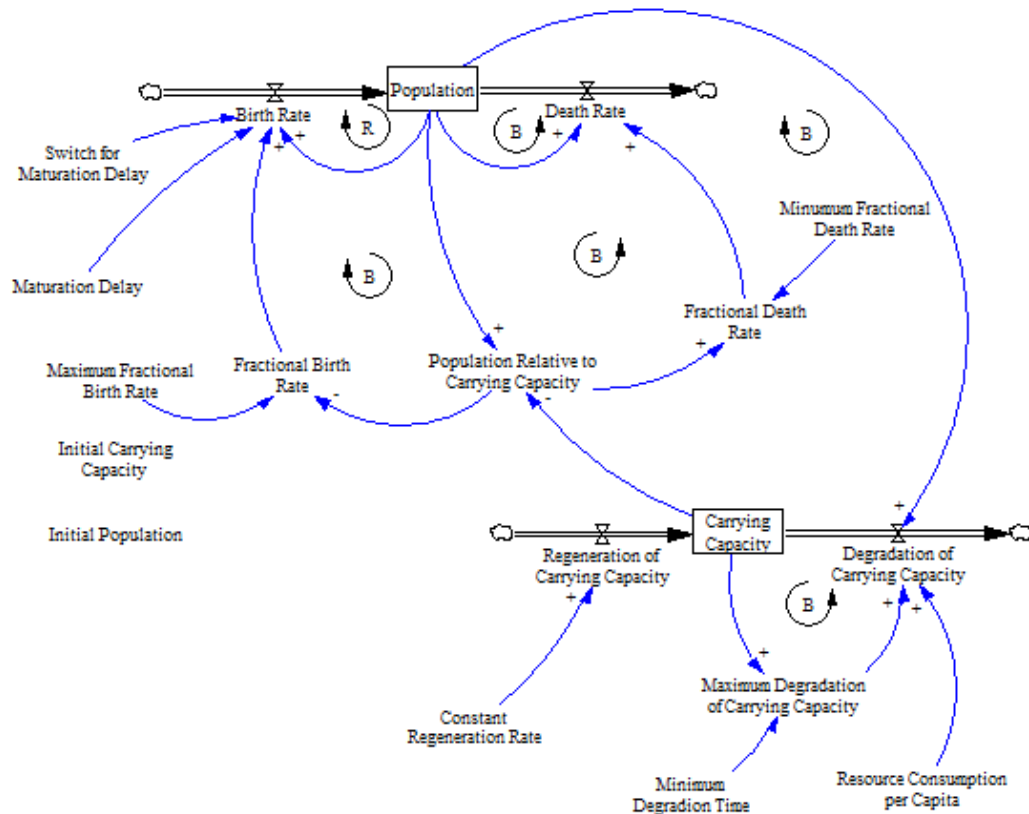
## Lyhenteet

SD systeemidynamiikka

# 1 Johdanto

Ihmiselle on luontaista ajatella, että asioille on selkeät ja suoraviivaiset syy-seuraussuhteet: yksi asia vaikuttaa toiseen. Maailma ei kuitenkaan ole 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. Systeemidynaamiset mallit kuvataan yleensä kausaalidiagrammeilla. Kuva 1 on esimerkki populaation ja luonnon kantokyvyn kausaalidiagrammista.



Kuva 1: Esimerkki systeemidynaamisesta kausaalidiagrammista.

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 ra-

kentamaan tunnettujen ja tutkittujen kausaliitteiden varaan. Systeemidynaamiset mallit ovat myös laskennallisesti kevyitä, joten mallin parametrien muuttamisen vaikutusten demonstroiminen käy hetkessä.

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

Ilmaston muutosta 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 fysikaalisilla malleilla. Fysikaaliset mallit ovat tarkkoja, mutta laskennallisesti raskaita, eivätkä ne ole maallikon tai poliittisen päättäjän ymmärrettävissä. Systeemidynamiikalla voidaan ilmastomalli esittää ymmärrettävässä muodossa siten, että maallikko poliittinen päättäjä kykenee suurpiirteisesti hahmottamaan, mistä mallissa on kyse. Lisäksi systeemidynaaminen simulaatio on ajettavissa hetkessä, joten parametrien muutosten seuraukset esim. ympäristöpoliittisiin päätöksiin liittyen on nopeasti havainnollistettavissa.

Tässä kandidaatintyössä käydään läpi, mitä on systeemidynamiikka ja mitä uutta se on tuonut ilmaston ja sen muutoksen mallintamiseen sekä käydään läpi erilaisia systeemidynaamisia ilmastomalleja sekä niiden etuja.



## 2 Systeemidynamiikka

Systeemi eli järjestelmä tarkoittaa toistensa kanssa vuorovaikutuksessa olevien osien muodostamaa kokonaisuutta [4]. Systeemidynamiikka on tietokoneavusteinen lähestymistapa päätöksentekoon ja mutkikkaiden systeemien mallintamiseen [1]. Mutkikkaalle systeemille ei ole yksikäsitteistä määritelmää [9], mutta systeemidynamiikalla kyetään mallintamaan erityisesti systeemien takaisinkytkentöjä ja epälineaarisuuksia [1], jotka ovat systeemin mutkikkautta lisääviä ominaisuuksia [9].

Tämän luvun tavoite on tutustuttaa lukija systeemidynamiikan peruseräiaatteisiin, 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]. [7]

Forresterin [6, 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. Oletusta kutsutaan avoimen silmukan oletukseksi. Tällaisella tarkastelulla pystyttiin yksinkertaistamaan 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 ymmärtää.

Samat takaisinkytkettyjen systeemien periaatteet olivat yleistettävissä eri tie-

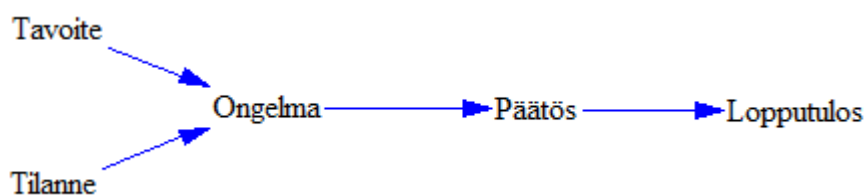
teenaloille, minkä johdosta monilla aloilla otettiin systeemidynaamisia menetelmiä käyttöön. Systeemidynamiikasta kehittyikin nopeasti hyvin poikkitieteellinen ala. [1, 6, 8]

## 2.2 Systeemiajattelu ja päätöksenteko

Systeemiajattelu on tapa jäsentää maailma mielessään mutkikkaana systeeminä, ja sen työkaluna voi käyttää systeemidynamiikkaa [8, s. 4–5]. Sterman [8, s. 4–5] vertaa systeemidynamista mallintamista lentosimulaattoriin: lentosimulaattori opettaa turvallisesti lentäjän lentämään ja systeemidynamiikka johtajan systeemiajattelemaan eli hahmottamaan johtamansa organisaation systeeminä.

Systeemidynamiikan asiantuntijat käyttävät usein sanontaa: "Tie helvettiin on kivetty hyvillä aikomuksilla." Stermanin [8, s. 5–6] mukaan hyvää tarkoittavilla päätöksillä saatetaan tehdä ongelmia pahemmiksi, sillä monilla päätöksillä on seurauksia, joita on vaikea ennalta arvioida.

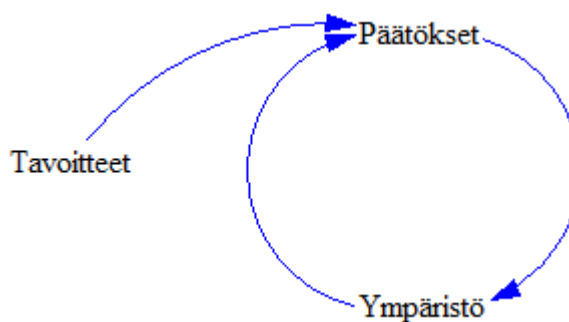
Päätöksenteon maailmankuvan voi jakaa tapahtumasuuntautuneeseen ja takaisinkytkentäsuuntautuneeseen. Seuraava kuva 2 esittää tapahtumasuuntautunutta maailmankuvaa. Tapahtumasuuntautuneisuus on ihmiselle luontevaa, sillä se on lineaarista ja suoraviivaista: jokaisella teolla on seurauksensa. Kun on tilanne 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. [8, s. 10]



Kuva 2: Tapahtumasuuntautunut maailmankuva. [8, s. 10]

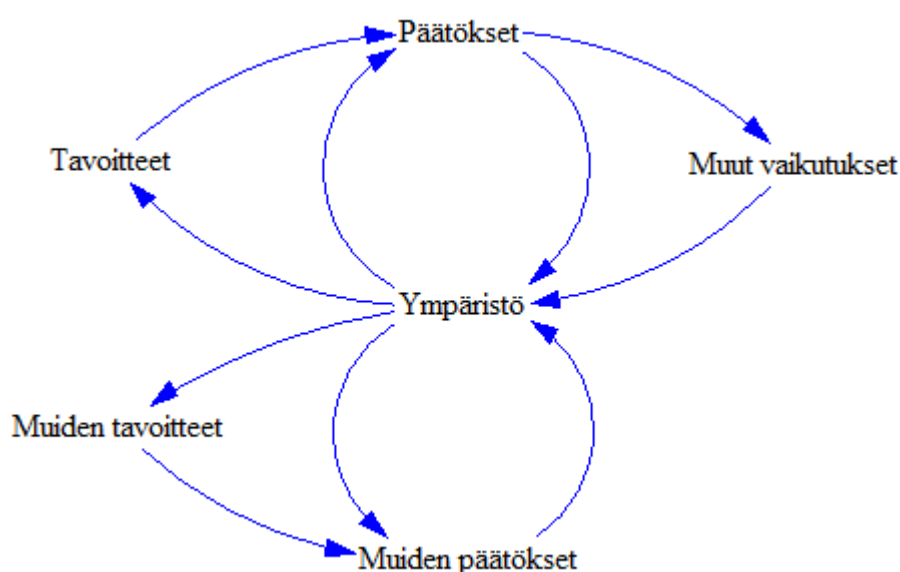
Stermanin [8, s. 11] mukaan sivuvaikutuksia ei ole todellisuudessa kuitenkaan olemassa. On vain olemassa vuorovaikutussuhteita, joita ei ole otettu huomioon. Seuraava kuva 3 esittää takaisinkytkentäsuuntautunutta maailmankuvaa. Systeemiajattelijan maailmankuva on takaisinkytkentäsuuntautunut, ja hän ymmärtää päätösten

vaikuttavan ympäristön tekijöihin, jotka puolestaan vaikuttavat päätöksiin.



Kuva 3: Takaisinkytkentäsuuntautunut maailmankuva. [8, s. 11]

Maailmankuvaa voi edelleen laajentaa. Seuraava kuva 4 on laajennettu edellisestä kuvasta 3 ottamaan huomioon useampia systeemin tekijöitä. Systeemiajattelijahahmottaa, 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. [8, s. 11–12]



Kuva 4: Laajennettu takaisinkytkentäsuuntautunut maailmankuva. [8, s. 11]

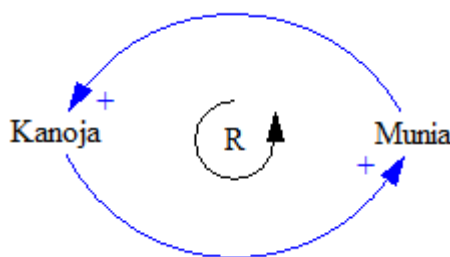
## 2.3 Takaisinkytketyt systeemit

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 tarkoittaa systeemin lähdön käyttämistä systeemin tulona. Tällöin systeemi kytkeytyy takaisin itseensä, muodostaa kytkennöistä silmukan ja vaikuttaa itse itseensä. Takaisinkytkennästä käytetään erityisesti ihmistieteiden puolella myös termiä "palaute". [8, 1]

Stermanin [8, 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. Nuoliin merkitään plus- tai miinus merkki sen mukaan, kasvattaako vaiko vähentääkö lähtömuuttujan arvon kasvu tulomuuttujan arvoa. Nuolet piirretään kaareviksi, jotta systeemin dynamiikkaa, etenkin silmukat, olisi helpompi hahmottaa. [8]

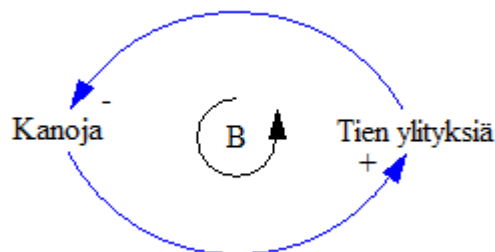
Takaisinkytkettyjä silmukoita on kahdenlaisia: negatiivisia ja positiivisia. Positiiviset silmukat ovat itseään vahvistavia. Seuraavassa kuvassa 5 on positiivinen takaisinkytketty silmukka, jossa kanojen määrä lisää munien määrää, mikä puolestaan lisää kanojen määrää. Positiiviset silmukat merkitään kausaalidiagrammiin kuvan 5 mukaisesti R-kirjaimella, mikä tulee englannin kielen sanasta "reinforcing" eli suomeksi "vahvistava". [8, s. 12–13][1]



Kuva 5: Positiivinen takaisinkytketty silmukka. [8, s. 13]

Negatiiviset silmukat ovat itseään tasapainottavia. Seuraavassa kuvassa 6 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 6 mukaisesti B-kirjaimella, mikä tulee englannin kielen sanasta "balancing" eli suomeksi "tasapainottava". [8, s. 12–14]



Kuva 6: Negatiivinen takaisinkytketty silmukka. [8, s. 13]

Silmukka on positiivinen, kun siinä on parillinen määrä negatiivisia kytkentöjä. Kuvan 5 positiivisessa silmukassa on nolla negatiivista kytkentää. Silmukka on negatiivinen, kun siinä on pariton määrä negatiivisia kytkentöjä. Kuvan 6 negatiivisessa silmukassa on yksi negatiivinen kytkentä. [8, s. 12–14]

## 2.4 Viiveet, varastot ja virtaukset

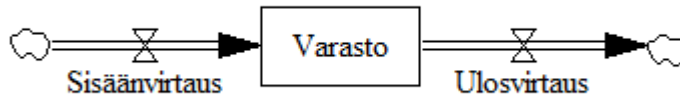
Viiveet aiheuttavat systeemiin hitautta, aiheuttavat värähtelyitä sekä johtavat siihen, että päätösten seuraukset johtavat pitkällä aikajänteellä erilaisiin tilanteisiin kuin lyhyellä aikajänteellä. Seuraavassa kuvassa 7 on esitetty systeemi, jossa hinnan nousu lisää viiveellä tuotantoa. Kausaalidiagrammeihin viiveet merkitään nuolen päälle joko kahdella poikkiviivalla tai laatikolla, jossa lukee "viive". [8, s. 150–152]



Kuva 7: Viiveellinen systeemi [8, s. 150]

Varastot 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 tulla sisäänvirtauksia ja sieltä voi lähteä ulosvirtauksia. Sisäänvirtaukset kerryttävät ja ulosvirtaukset kuluttavat varaston arvoa. Seuraava kuva 8 on yksinkertainen kausaalidiagrammiesitys varastosta ja virtauksista.

Varastot merkitään kausaalidiagrammiin suorakulmioilla, virtauskytkennät virtausnuolilla, virtausmuuttujat venttiilisymboleilla sekä systeemin ulkopuoliset lähteet ja nielut pilvillä. [8, s. 191–197]



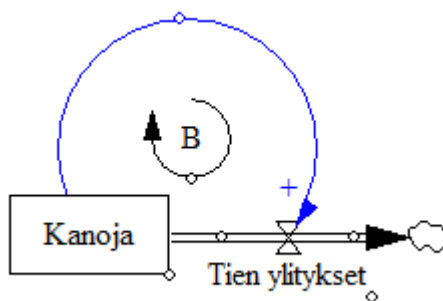
Kuva 8: Yksinkertainen kausaalidiagrammi varastoista ja virtauksista. [8, s. 150]

Varaston matemaattinen esitys vastaa integraattoria, joka integroi sisäänvirtauksen ja ulosvirtauksen erotusta:

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

[8, s. 194–195]

Varastot ja virtaukset ovat intuitiivinen esitystapa, mutta saman dynamiikan voi esittää ilmankin niitä [8, s. 191–230]. Seuraavassa kuvassa 9 on esitetty kuvan 6 negatiivisesti takaisinkytketty silmukka varastojen ja virtausten avulla.



Kuva 9: Kuvan 6 negatiivisesti takaisinkytketyn silmukan esitys varastojen ja virtausten avulla.

### 3 Ilmastomuutoksen mallintaminen

Tämän luvun tavoitteena on tutustuttaa lukija ilmastomuutoksen mallintamiseen ensin yleisesti ja systeemidynaamisiin malleihin pureutuen. Aluksi alaluvussa 3.1 tutustutaan ilmastomuutoksen ja ilmastomallien historiaan sekä hahmotellaan, miksi myös mallintamiseen on alettu käyttää myös systeemidynaamisia menetelmiä. Seuraavat alaluvut 3.2 ja 3.3 esittelevät systeemidynaamiset Climate Interactiven C-Roads- ja En-Roads-ilmastomallit. Lopuksi alaluvussa 3.4 otetaan lyhyt katsaus muutamaan muuhun tunnettuun ilmastomalliin.

#### 3.1 Ilmastomallien historia

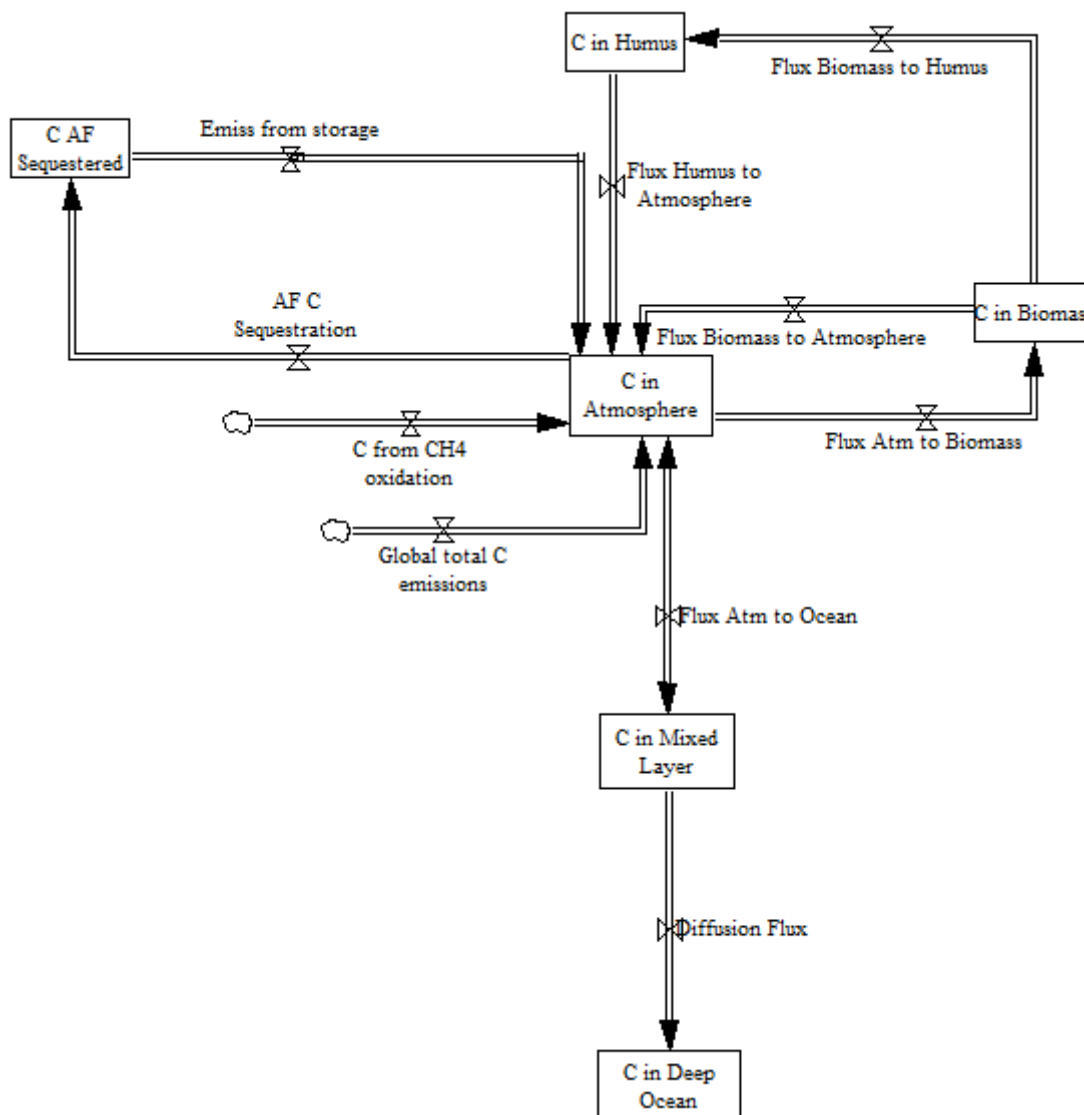
#### 3.2 C-roads-ilmastomalli

C-Roads-ilmastomalli perustuu Fiddamanin [3] kehittämään systeemidynaamiseen ilmastomalliin. C-Roads-ilmastomalli koostuu useasta alimallista. Kullekin kasvihuonekaasulle on oma alimallinsa, samoin metsien kasvattamiselle ja tuhoamiselle, meren pinnan korkeudelle sekä maapallolle kertyneelle lämpöenergialle. [2]

Kasvihuonekaasuista malliin on otettu hiilidioksidi ( $CO_2$ ), metaani ( $CH_4$ ), typpi-dioksidi ( $N_2O$ ), perfluorohiiliyhdisteet ( $PFC$ ), rikkiheksafluoridi ( $SF_6$ ) sekä hydrofluorihydridiyhdisteet ( $HFC$ ). Tarkimmin mallissa on esitetty hiilidioksidin kiertokulku, joten kasvihuonekaasuista tässä työssä esitetään vain sen alimalli.

Seuraava kuva 10 on yksinkertaistettu hiilidioksidin alimalli, jossa on kuusi varastomuuttujaa, joista kukin kuvaa hiilidioksidivarastoa. Näitä varastoja ovat: ilmakehä (C in Atmosphere), biomassa (C in Biomass), maaperä (C in Humus), metsät (C AF Sequestered) sekä merten pinta- (C in Mixed Layer) ja syvät (C in Deep Ocean) kerrokset. Näistä ainoastaan ilmakehässä oleva hiilidioksidi vaikuttaa ilmaston lämpötilaan. Hiilidioksidia ei poistu systeemistä, mutta sitä tulee systeemiin kahdesta lähteestä, joista tärkeimpänä ihmisen aiheuttamat päästöt (Global total C emissions). Myös hiilidioksidiksi hapettuva metaani lisää hiilidioksidin määrää. Ilmakehän hiilidioksidia liukenee merten pintakerrokseen (Flux Atm to Ocean), josta se voi joko vapautua takaisin ilmakehään tai vajota meren pohjaan (Diffusion Flux). Ilmakehän hiilidioksidia sitoutuu myös metsiin ja biomassaan. Biomassasta hiilidioksidi voi vapautua takaisin ilmakehään tai vajota maaperään, josta se voi edelleen vapautua takaisin ilmakehään. Myös metsistä hiilidioksidi voi vapautua takaisin ilmakehään. Hiilidioksidin kohdalla ilmastonlämpenemistä ehkäistään siis vähentämällä hiilidioksidi- ja metaanipäästöjä sekä lisäämällä metsien ja biomas-

san määrää. Varastomuuttujilla on ylärajansa: metsiä ei voi kaataa loputtomasti ja meriin ei voi liueta loputtomasti hiilidioksidia.



Kuva 10: C-Roads-ilmastomallin yksinkertaistettu alimalli hiilidioksidille.

Tom Fiddaman mallintaa ilmaston lämpenemistä systeemidynaamisesti jakaen mallin kahteen osaan: hiilidioksidi- ja lämpövarastoihin.

### 3.3 En-Roads-ilmastomalli

### 3.4 Muita ilmastomalleja



## 4 Yhteenveto

## Viitteet

- [1] What is system dynamics?
- [2] Climate Interactive. C-ROADS Web Page.
- [3] Thomas S Fiddaman. *Feedback Complexity in Integrated Climate-Economy Models by*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1997.
- [4] Robert L. Flood and Ewart R. Carson. *Dealing with Complexity: An Introduction to the Theory and Application of Systems Science*. Plenum Publishing Corporation, New York, 2nd edition, 1988.
- [5] Jay W Forrester. *Industrial Dynamics*. 1961.
- [6] Jay W. Forrester. Industial Dynamics — After the First Decade. *Management Science*, 14(7):398–415, 1968.
- [7] Jay W Forrester. The Beginning of System Dynamics, 1989.
- [8] John D. Sterman. *Business Dynamics*. Jeffrey J. Shelstad, 2000.
- [9] 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):28–44, 1973.