

Juho Salmi

## **Ilmastonmuutoksen systeemidynaaminen mallinnus ja simulointi**

**Sähkötekniikan korkeakoulu**

Kandidaatintyö  
Espoo 5.10.2013

**Vastuupettaja:**

TkT Pekka Forsman

**Työn ohjaaja:**

DI Tomi Sorasalmi

Tekijä: Juho Salmi

Työn nimi: Ilmastonmuutoksen systeemidynaaminen mallinnus ja simulointi

Päivämäärä: 5.10.2013

Kieli: Suomi

Sivumäärä:6+6

Koulutusohjelma: Automaatio- ja systeemitekniikka

Vastuuopettaja: TkT Pekka Forsman

Ohjaaja: DI Tomi Sorasalmi

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+6

Degree programme: Automation and Systems Technology

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

Advisor: M.Sc. (Tech.) Tomi Sorasalmi

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 Systeemiajattelu . . . . .	3
2.2 Kausaalidiagrammi . . . . .	3
2.3 Takaisinkytkentä . . . . .	3
2.4 Varastot ja virtaukset . . . . .	3
<b>3 Ilmastonmuutos</b>	<b>3</b>
3.1 Fysikaaliset ilmastomallit . . . . .	4
3.2 Fiddamanin malli . . . . .	4
3.3 Systeemidynaamiset mallit 2 . . . . .	4
<b>4 Yhteenveto</b>	<b>5</b>
<b>Viitteet</b>	<b>6</b>

# Symbolit ja lyhenteet

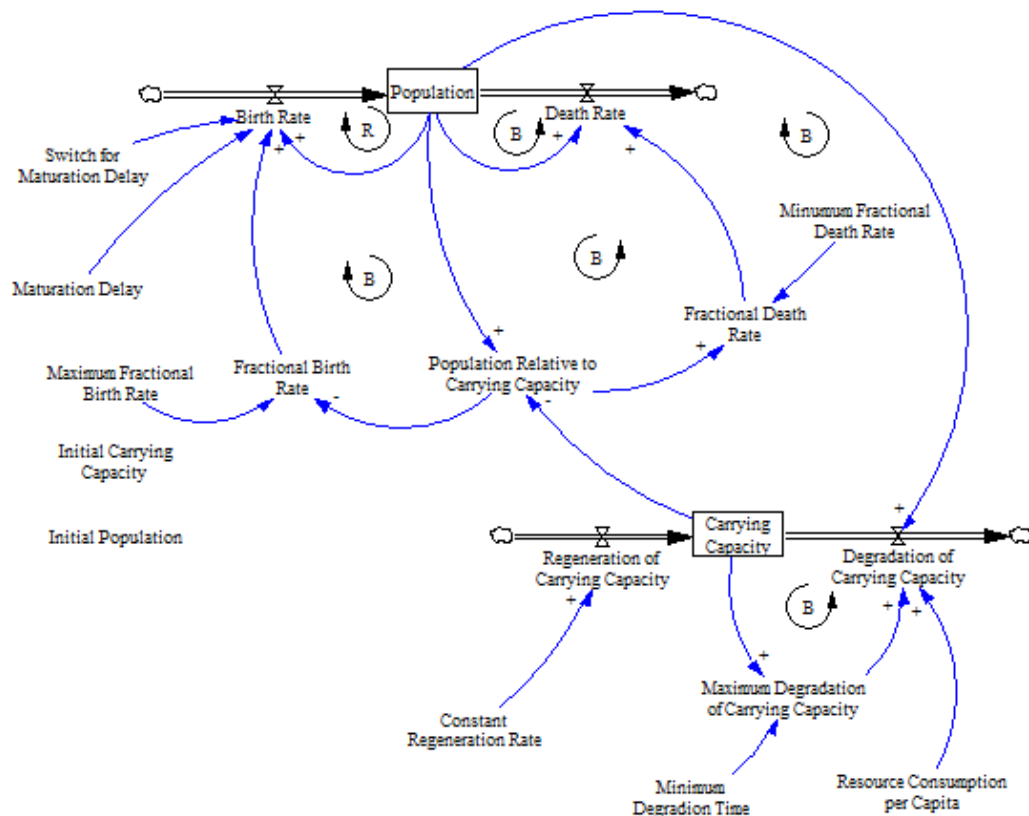
## Lyhenteet

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 kausaalidiagrammilla. 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 rakentamaan tunnettujen ja tutkittujen kausaaliteettien 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 päätösin voisimme saada ilmaston kehittymään haluttuun suuntaan. Ilmasto 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

Systeemidynamiikka on tietokoneavusteinen lähestymistapa päätöksentekoon ja monimutkaisten järjestelmien mallintamiseen. [6]

Systeemidynamiikan on aluperin perustanut sähkötekniikan alalta operaatiotutkimuksen puolelle päätynyt Jay W. Forrester.

### 2.1 Systeemiajattelu

### 2.2 Kausaalidiagrammi

### 2.3 Takaisinkytkentä

### 2.4 Varastot ja virtaukset

## 3 Ilmastonmuutos

Ilmastomalleista yleisesti.

### 3.1 Fysikaaliset ilmastomallit

Fysikaalisista ilmastomalleista.

### 3.2 Fiddamanin malli

Systeemidynaamisia ilmastomalleja on todennäköisesti useampia, joten nämä voi ehkä ryhmitellä tai ottaa esille case-tyyppisesti. [1, 7, 3, 2, 4, 5]

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

### 3.3 Systeemidynaamiset mallit 2

## 4 Yhteenveto

## Viitteet

- [1] *Muutamme ilmastoa Ilmatieteen laitoksen tutkijoiden katsaus ilmastonmuutokseen*. Karttakeskus, Helsinki], 2008. ID: L\_OPAC\_TEEMU; M1: 237 s.; päätoimittaja: Heikki Nevanlinna.; ID: ALLI - Aalto-yliopiston kokoelmatietokanta.
- [2] T. S. Fiddaman. Exploring policy options with a behavioral climate-economy model. *System Dynamics Review*, 2002, Vol.18(2), pp.243-267, 18(2):243-267, 2002. ID: NEWPC; ID: Primo Central Index (Ex Libris).
- [3] Thomas Fiddaman. Dynamics of climate policy. *System Dynamics Review*, 23(1), 2007. ID: PQ\_MS; ID: Advanced Technologies Database with Aerospace (Proquest).
- [4] Charles A. Jones. The renewable energy industry in massachusetts as a complex system: Developing a shared understanding for policy making. *ProQuest Dissertations and Theses*, 2008. ID: PQ\_MS; ID: Digital Dissertations (ProQuest ).
- [5] P. L. Kunsch. The zero-emission certificates: A novel co 2-pollution reduction instrument applied to the electricity market. *European Journal of Operational Research*, 2004, Vol.153(2), pp.386-399, 153(2):386-399, 2004. ID: NEWPC; ID: Primo Central Index (Ex Libris).
- [6] System Dynamics Society. The field of system dynamics. <http://www.systemdynamics.org/what-is-s/>. Viitattu: 2013-10-27.
- [7] John D. Sterman. *Business dynamics systems thinking and modeling for a complex world*. McGraw-Hill, Boston (Mass.), 2000. ID: L\_OPAC\_TEEMU; M1: xxvi, 982 s.; John D. Sterman.; ID: ALLI - Aalto-yliopiston kokoelmatietokanta.