

Juho Salmi

## **Ilmastomuutoksen 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

Ihmislle 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.

The diagram illustrates a population model with two main stocks: **Population** and **Carrying Capacity**.

**Population Stock:**

- Inflow:** Birth Rate (regulated by a valve).
- Outflow:** Death Rate (regulated by a valve).
- Feedback Loops:**
  - Reinforcing Loop (R):** Population increases Birth Rate, which increases Population.
  - Balancing Loop (B):** Population increases Death Rate, which decreases Population.
  - Balancing Loop (B):** Population increases Fractional Birth Rate, which decreases Population Relative to Carrying Capacity, which decreases Fractional Death Rate, which increases Population.
  - Balancing Loop (B):** Population increases Fractional Death Rate, which decreases Population.

**Carrying Capacity Stock:**

- Inflow:** Regeneration of Carrying Capacity (regulated by a valve).
- Outflow:** Degradation of Carrying Capacity (regulated by a valve).
- Feedback Loops:**
  - Balancing Loop (B):** Carrying Capacity increases Regeneration of Carrying Capacity, which increases Carrying Capacity.
  - Balancing Loop (B):** Carrying Capacity increases Degradation of Carrying Capacity, which decreases Carrying Capacity.

**Parameters and Initial Values:**

- Switch for Maturation Delay
- Maturation Delay
- Maximum Fractional Birth Rate
- Initial Carrying Capacity
- Initial Population
- Population Relative to Carrying Capacity
- Fractional Birth Rate
- Fractional Death Rate
- Minimum Fractional Death Rate
- Constant Regeneration Rate
- Maximum Degradation of Carrying Capacity
- Minimum Degradation Time
- Resource Consumption per Capita

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 lähtöä rakentamaan tunnettujen ja tutkittujen kausaliteettien 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. Ilmastoja 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. [1]

Systeemidynamiikan on aluperin 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 irtisanomaan. Forrester ryhtyi simuloimaan teollisuustuotantoa sekä luomaan sille säätöjärjestelmiä tietokoneavusteisesti. Tämän tutkimuksen pohjalta syntyi systeemidynamiikka. [2]

### 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.

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

### **3.3 Systeemidynaamiset mallit 2**

## 4 Yhteenveto

## Viitteet

- [1] What is system dynamics?
- [2] Jay W Forrester. The Beginning of System Dynamics, 1989.