

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+8

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+8

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 Systeemidynamiikan historia . . . . .	3
2.2 Systeemiajattelu ja päätöksenteko . . . . .	4
2.3 Kausaalidiagrammi . . . . .	5
2.4 Takaisinkytkentä . . . . .	5
2.5 Varastot ja virtaukset . . . . .	5
<b>3 Ilmastonmuutos</b>	<b>6</b>
3.1 Fysikaaliset ilmastomallit . . . . .	6
3.2 Fiddamanin malli . . . . .	6
3.3 Systeemidynaamiset mallit 2 . . . . .	6
<b>4 Yhteenveto</b>	<b>7</b>
<b>Viitteet</b>	<b>8</b>

# Symbolit ja lyhenteet

## Lyhenteet

SD systeemidynamiikka

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.

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

**Population Stock:**

- Inflow:** Birth Rate (influenced by **Switch for Maturation Delay**, **Maturation Delay**, **Maximum Fractional Birth Rate**, and **Fractional Birth Rate**).
- Outflow:** Death Rate (influenced by **Minimum Fractional Death Rate**, **Fractional Death Rate**, and **Population Relative to Carrying Capacity**).
- Feedback Loops:**
  - Reinforcing Loop (R):** Population → Birth Rate → Population.
  - Reinforcing Loop (R):** Population → Death Rate → Population.
  - Reinforcing Loop (R):** Population → Population Relative to Carrying Capacity → Fractional Birth Rate → Birth Rate → Population.
  - Reinforcing Loop (R):** Population → Population Relative to Carrying Capacity → Fractional Death Rate → Death Rate → Population.
  - Reinforcing Loop (R):** Population → Population Relative to Carrying Capacity → Regeneration of Carrying Capacity → Carrying Capacity → Population Relative to Carrying Capacity.

**Carrying Capacity Stock:**

- Inflow:** Regeneration of Carrying Capacity (influenced by **Constant Regeneration Rate** and **Population Relative to Carrying Capacity**).
- Outflow:** Degradation of Carrying Capacity (influenced by **Maximum Degradation of Carrying Capacity** and **Resource Consumption per Capita**).
- Feedback Loops:**
  - Reinforcing Loop (R):** Carrying Capacity → Regeneration of Carrying Capacity → Carrying Capacity.
  - Reinforcing Loop (R):** Carrying Capacity → Degradation of Carrying Capacity → Carrying Capacity.
  - Reinforcing Loop (R):** Carrying Capacity → Population Relative to Carrying Capacity → Fractional Birth Rate → Birth Rate → Population → Population Relative to Carrying Capacity.
  - Reinforcing Loop (R):** Carrying Capacity → Population Relative to Carrying Capacity → Fractional Death Rate → Death Rate → Population → Population Relative to Carrying Capacity.

**Other Parameters and Links:**

- Initial Population:** Sets the initial value of the Population stock.
- Initial Carrying Capacity:** Sets the initial value of the Carrying Capacity stock.
- Resource Consumption per Capita:** Influences the Degradation of Carrying Capacity.
- Minimum Degradation Time:** Influences the Regeneration of Carrying Capacity.

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

Systeemidynamiikka on tietokoneavusteinen lähestymistapa päätöksentekoon ja monimutkaisten järjestelmien mallintamiseen. Keskeistä systeemidynamiikassa on järjestelmän osien keskinäinen vuorovaikutus. [1]

Tämän luvun tavoite on tutustuttaa lukija systeemidynamiikkaan.

### 2.1 Systeemidynamiikan historia

Systeemidynamiikan ymmärtämiseen auttaa sen historian tunteminen. Tämä alaluku käsittelee systeemidynamiikan historiaa, etenkin sen syntyyn ja kehitykseen vaikuttaneita tekijöitä.

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 irtisanomaan. 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* [2]. [4]

Forresterin [3, s. 398-399] mukaan sen aikainen operaatiotutkimus ei tarjonnut hyviä työkaluja laajoihin, ylimmän tason johtamisen haasteisiin. Operaatiotutkimuksessa keskityttiin pääsääntöisesti yksittäisten, irrallisten päätösten seurausten hahmottelemiseen avoimen silmukan järjestelminä oletuksella, että itse päätös ei vaikuta päätöksentekoon vaikuttaviin tekijöihin. Tällaisella tarkastelulla pystyttiin yksinkeraistamaan analyysiä, mutta näin kyettiin tarkastelemaan riittävällä tarkkuudella vain yksinkertaisia, lineaarisia tilanteita. Systeemidynamiikalla pystytään ottamaan huomioon monimutkaisetkin järjestelmän osien vuorovaikutukset ja mallintamaan monimutkaisia, epälineaarisia järjestelmiä. [3, s. 398-399]

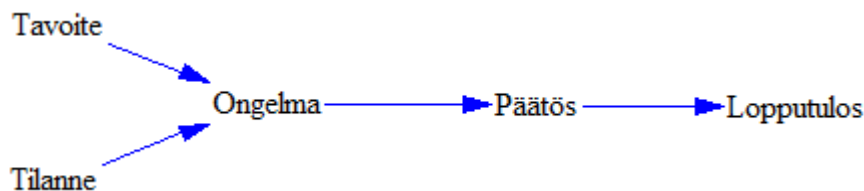
Forresterin [3, s. 398-399] mukaan takaisinkytkettyjä järjestelmiä oli jo pitkään tutkittu ja hyödynnetty insinööritieteissä, biologiassa ja taloustieteessä, mutta niitä oli vasta hiljattain alettu ymmärtää. Samat takaisinkytkettyjen järjestelmien periaatteet keskenään vuorovaikutuksessa olevista järjestelmän osista on yleistettävissä eri tieteenaloille. Systeemidynamiikka onkin poikkitieteellistä ja sitä hyödynnetään nykyisin lukuisilla eri tieteenaloilla. [3, 5, 1]

## 2.2 Systeemiajattelu ja päätöksenteko

Systeemiajattelu on tapa jäsentää maailma monimutkaisena järjestelmänä, jonka osat ovat vuorovaikutuksessa keskenään. Systeemidynamiikka on puolestaan systeemiajattelun työkalu. Sterman [5, s. 4-5] vertaa systeemidynamiista mallintamista lentosimulaattoriin: lentosimulaattori opettaa turvallisesti lentäjän lentämään ja systeemidynamiikka johtajan ymmärtämään järjestelmää, johon tämän päätökset kohdistuvat. [5]

Tie helvettiin on kivetty hyvillä aikomuksilla. Stermanin [5, s. 5-6] mukaan hyvää tarkoittavilla päätöksillä saatetaan tehdä ongelmia pahemmiksi, sillä monilla päätöksillä on seurauksia, joita on vaikea ennalta arvioida.

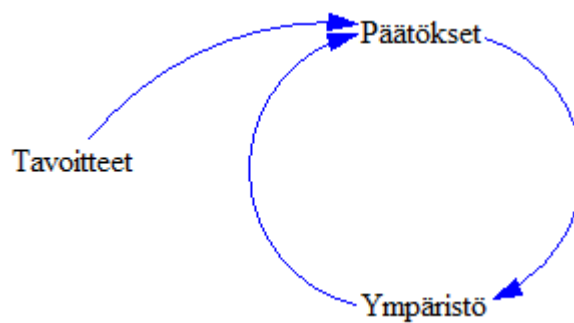
Päätöksenteon maailmankuvan voi jakaa tapahtumasuuntautuneeseen ja takaisinkytkentäsuuntautuneeseen. Tapahtumasuuntautunut maailmankuva on ihmiselle luonteva, sillä se on lineaarinen ja suoraviivainen: jokaisella teolla on seurauksensa. Kuva 2 kuvaa tapahtumasuuntautunutta ajattelutapaa. Olkoon tilanne ja asetetut tavoitteet. Mitä enemmän tilanne poikkeaa tavoitteista, sitä suurempi on ongelma. Ongelman pohjalta tehdään päätös ja saadaan haluttu lopputulos. Päätös voi kuitenkin vaikuttaa ympäröivään tilanteeseen mitä moninaisimmin tavoin. Tapahtumasuuntautuneessa maailmankuvassa tätä ei välttämättä huomioida, ja päätöksistä saattaa seurata odottamattomia sivuvaikutuksia. [5, s. 10]



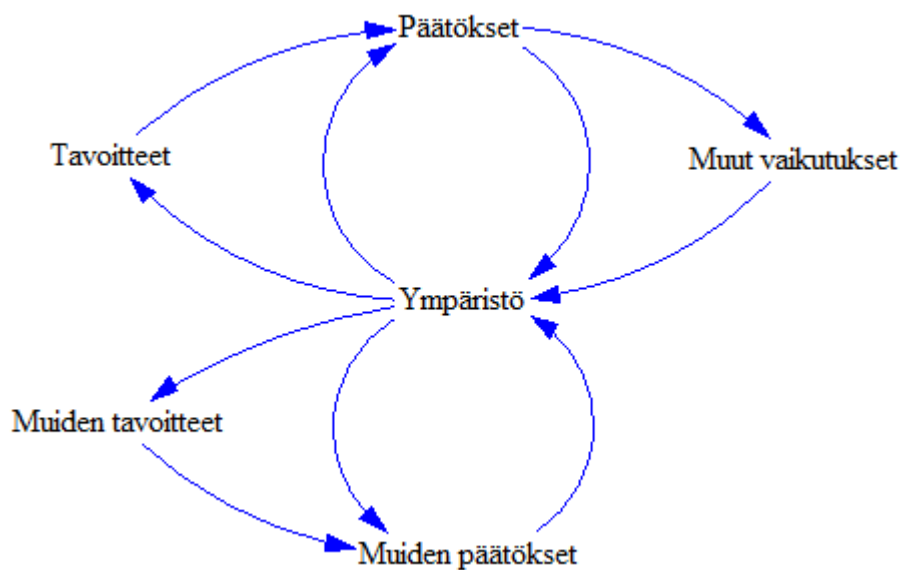
Kuva 2: Tapahtumasuuntautunut maailmankuva.

Takaisinkytkentäsuuntautuneessa maailmankuvassa ymmärretään, että päätöksenteko vaikuttaa ympäröivään tilanteeseen, jonka pohjalta tehdään päätöksiä (Kuva 3).

Tämäkään ei ole vielä kokototuus, vaan päätösten seurauksena muuttuva ympäristö vaikuttaa omiin tavoitteisiin ja esim. kilpailijoiden tavoitteisiin ja toimintaan sekä aiheuttaa muita sivuvaikutuksia (Kuva 4).



Kuva 3: Takaisinkytkentäsuuntautunut maailmankuva.



Kuva 4: Laajennettu takaisinkytkentäsuuntautunut maailmankuva.

## 2.3 Kausaalidiagrammi

## 2.4 Takaisinkytkentä

## 2.5 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. *Industrial Dynamics*. 1961.
- [3] Jay W Forrester. Industrial Dynamics — After the First Decade. *Management Science*, 14(7):398–415, 1968.
- [4] Jay W Forrester. The Beginning of System Dynamics, 1989.
- [5] John D. Sterman. *Business Dynamics*. Jeffrey J. Shelstad, 2000.