

TILASTOKESKUS

**TUTKIMUKSIA**

No 28

STATISTIKCENTRALEN

**UNDERSÖKNINGAR**

**Hannu Laine**

**SYSTEEMITEORIAN JA SYSTEEMIDYNA-  
MIIKAN PERUSKÄSITTEITÄ**

TOUKOKUU 1974

115.1

*Titelarbeiten*

SYSTEEMITEORIAN JA SYSTEEMIDYNAMIIKAN  
PERUSKÄSITTEITÄ

Hannu Laine

23421

ISBN 951-46-1336-8

## ESIPUHE

Tämän tutkimuksen tekemiseen on ollut lähinnä kaksi motiivia; ensinnäkin suomenkielellä ei ole toistaiseksi tehty helppoa ja yleistajuista esitystä systeemiajattelun peruskäsitteistä ja ideoista; toiseksi Suomessa ei ole toistaiseksi käsitelty ollenkaan systeemidynamiikaksi kutsumaani systeemiteorian osa-aluetta, ja siten ei ole myöskään käsitelty suurta kansainvälistä huomiota herättäneen maailman mallin ("The limits to Growth") lähtökohtia.

Edellä esitettyjen tavoitteiden mukaisesti on tämä tutkimuskin jakaantunut kolmeen osaan. Sellaiselle lukijalle, joka haluaa saada vain ylimalkaisen kuvan systeemiajattelusta yleensä, riittää ensimmäisen osan (eräitä systeemiteorian peruskäsitteitä) lukeminen. Toinen osa ei ole mitenkään riippuvainen ensimmäisestä, ja se voidaan lukea tarvitsematta ensin tutustua ensimmäiseen osaan.

Tämän tutkimuksen rahoituksesta kiitän valtion yhteiskuntatieteellistä toimikuntaa. Arvokkaasta avusta kiitän erityisesti tri Olavi Niitamoja, tri Kyösti Pulliaista, tri Pentti Malaskaa ja maisteri Tapio Kannista.

Helsingissä 1973-08-04

Hannu Laine

HANNU LAINE:  
SYSTEEMITEORIAN JA SYSTEEMIDYNAMIIKAN PERUSKÄSITTEITÄ

SISÄLLYS:

1. ERÄITÄ SYSTEEMITEORIAN PERUSKÄSITTEITÄ .....	3
1.1. Systeemiajattelusta yleensä .....	3
1.2. Systeemin määrittely .....	3
1.3. Erilaiset lähestymistavat .....	4
1.4. Abstraktit ja reaaliset systeemit .....	4
1.5. Systeemiympäristö .....	5
1.6. Staattiset ja dynaamiset systeemit .....	6
1.7. Systeemin käyttäytyminen .....	7
1.8. Palaute (feedback) .....	9
1.9. Graafisen esitystavan käyttö systeemimallien havainnollistamiseksi .....	10
2. SYSTEEMIDYNAMIIKASTA .....	13
2.1. Systeemidynamiikan yleispiirteitä .....	13
2.2. Simuloinnista .....	13
2.3. Palaute-systeemien yleinen rakenne .....	14
2.3.1. Systeemin rajat .....	14
2.3.2. Palaute-silmukka .....	15
2.3.3. Tasomuuttujat ja virtamuuttujat .....	15
2.3.4. Virtamuuttujien alarakenne .....	16
2.4. Yhtälöt ja mallin laskeminen .....	17
2.4.1. Laskentajärjestys .....	17
2.4.2. Symbolit .....	17
2.4.3. Tasoyhtälöt ja virtayhtälöt .....	18
2.4.4. Apuyhtälöt, taulukoidut muuttujat ja systeemin graafinen esitys .....	19
2.4.5. Esimerkki systeemin esittämisestä yhtälöiden avulla .....	22
2.5. Informaatiolinkit .....	23
2.6. Viiveet .....	25
2.7. Satunnaistekijät ja eräitä funktioita .....	28
2.8. Systeemidynamiikka ja muu systeemiteoria .....	30
3. MAAILMAN MALLI .....	34
3.1. Yleistä systeemidynamiikan sovellutusalueista .....	34
3.2. Maailman dynamiikasta yleensä .....	34
3.3. Maailman mallin yleisrakenne .....	35
3.4. Mallin perusteella tehtävissä olevista johtopäätöksistä .....	37
3.5. Suoritettujen tietokoneajojen tulokset .....	39
3.6. Maailman mallin kritiikkiä .....	43

## 1. ERÄITÄ SYSTEEMITEORIAN PERUSKÄSITTEITÄ

### 1.1. Systeemiajattelusta yleensä

Systeemiajattelun lähtökohtana on jonkin ilmiön tai ilmiöryhmän tarkastelu kokonaisuutena.<sup>1)</sup> Tällainen ajattelutapa on noussut vastapainoksi eri tieteenalojen yhä voimakkaammalle spesialisoitumiselle, jolloin yhteydet muihin - läheisiinkin - tieteenaloihin vähentyvät tai voivat jopa katketakin. Tällaisen spesialisoitumisen haitoista huomautti jo "kybernetikan isä" Norbert Wiener klassisen teoksensa "Cybernetics" johdannossa.<sup>2)</sup> Wienerin aikojen jälkeen on pyrkimys kohti yhteisiä metodeja, esitystapoja ja mallijärjestelmiä valtavasti lisääntynyt - jopa niin pitkälle, että nyt alkaa jolla melkoista hajanaisuutta itse systeemikäsitteidenkin piirissä.

Systeemiteorian metodologinen perusta on kybernetikassa. Kybernetikka taas voidaan käsittää osaksi systeemiteorian yleiskehikkoa. Tällöin on kybernetikka kuitenkin tulkittu melko ahtaasti itseohjautuvien systeemien teoriaksi.<sup>3)</sup>

Systeemiajattelu on kuitenkin jo paljon vanhempaa. Mm. liberaalisen talousteorian käsitys kansantaloudesta itsesääntöisenä mekanismina juontaa juurensa jo Adam Smithistä, ja Walras'n ja Marshallin kysyntä- ja tarjontamallien varsin kyberneettinen rakenne - ainakin verrattaessa sitä Oscar Langen kybernetikkaan - olivat varsin tuttuja jo ennen varsinaisen kybernetikan ja systeemiteorian syntyäkin.

### 1.2. Systeemin määrittely

Systeeminmäärittely on ehkä systeemiteoriaa käsittelevän kirjallisuuden yhtenäisin alue. Systeemi voidaan määrittellä alkioiden ja niiden välisten relaatioiden joukoksi.<sup>4)</sup>

- 1) Ackoff R. L. : "Towards a System of System Concepts", Management Science Vol. 17, No. 11, July, 1971, s. 1 (Sivunumerot viittaavat Ackoffin artikkelin käännökseen, jota ei ole julkaistu, mutta joka on saatavissa tilastokeskuksesta).
- 2) Wiener N. : "Cybernetics", The M.I. T. Press, Cambridge, Massachusetts, 1948, s. 2.
- 3) Vrt. Niitamo O. E. : "Systeemiajattelun eräitä pääpiirteitä", Tilastollinen Päätoimisto, Monistettuja tutkimuksia N:o 6, huhtikuu 1968, s. 2, tai Ahmavaara Y. : "Yhteiskuntatieteen kyberneettinen metodologia", 2. lisätty painos, Tammi, Helsinki, 1970, s. 40, tai yleisemmin s. 43.
- 4) Niitamo O. E. : mt. s. 4. Hieman toisin on systeemi määritelty Hallin ja Fagenin kirjoituksessa "Definition of System". Siinä esitetty määritelmä on seuraava: "Systeemi on alkioiden joukko, sekä näiden alkioiden välisten relaatioiden sekä niiden ominaisuuksien välisten relaatioiden joukko". Hall A. D. ja Fagen R. E. : "Definition of System" teoksessa Buckley W. (ed) : "Modern Systems Research for the Behavioral Scientist", Aldine Publishing Company, Chicago, 1968, s. 81. Ashbyn mukaan systeemiä ei niinkään ole pidettävä asiana tai esineenä, vaan muuttujien luettelona. Ashby W. R. : "An Introduction to Cybernetics", Chapman & Hall Ltd, London, s. 40. Liikkeenjohtoa palvelevan systeemiteorian mukaan voidaan systeemi määrittellä esimerkiksi seuraavasti: "Systeemi on jokin käynnissä oleva elementtijoukossa tapahtuva prosessi, jossa elementit on yhdistetty toisiinsa funktionaalisesti ja operationaalisesti määrätyn tavoitteen saavuttamiseksi". Optner S. L. : "Systems Analysis", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1968, s. 3. Vrt. myös Andersin, Hans E. : "Johdatus numeerisen simuloinnin käyttöön yrityssysteemin suunnittelussa", Valtion tietokonekeskuksen moniste, ss. 3-4. Vrt. myös Forrester : "Systeemi tarkoittaa osien ryhmittelyä yhteisen päämäärän saavuttamiseksi". Forrester J. W. : "Principles of Systems", 2. Preliminary Edition, Wright-Allen Press, Cambridge, Massachusetts, 1968, s. 1-1.

Tässä esitetty määritelmä on tietenkin hyvin yleisluontoinen, eikä sitä ole tarkoitettu määritelmäksi missään matemaattisessa mielessä. Näin määriteltynä systeemi kuitenkin sopii useimpien systeemiteoreetikkojen määritelmiin, tai paremminkin sisältää nämä suppeammat määritelmät. Oscar Langen systeemin määritelmä on varsin lähellä tätä määritelmää, mutta se sisältää kuitenkin rajoituksia, joita ei ole tarpeen ottaa mukaan näin yleisellä tasolla liikuttaessa.<sup>1)</sup>

Ainoa alkioita rajoittava tekijä on se, että alkion ei katsota kuuluvan kyseiseen systeemiin, ellei sillä ole mitään relaatioita systeemin muihin alkioihin.

### 1.3. Erilaiset lähestymistavat

Systeemiajattelussa voidaan erottaa kaksi erilaista ongelman lähestymistapaa: synteettinen ja analyttinen.<sup>2)</sup>

Synteettisessä lähestymistavassa lähdetään systeemin alkioista ja relaatioista, joiden perusteella pyritään määrittelemään systeemin rakenne ja itse systeemi. Tätä lähestymistapaa on käyttänyt esimerkiksi Oscar Lange.<sup>3)</sup>

Analyttinen lähestymistapa lähtee systeemistä kokonaisuudessaan ja etenee systeemin sisäisen rakenteen tarkastelussa kulloinkin parhaaksi katsotulle yksityiskohtaisuuden tasolle.

Analyttinerkin lähestymistapa voi kuitenkin vaihtua synteettiseksi lähdetessä tarkastelemaan useampia eri systeemejä ja niiden vuorovaikutussuhteita.

Analyttisen lähestymistavan on puhtaimmillaan omaksunut juuri Jay W. Forrester systeemidynamiikassa.<sup>4)</sup>

### 1.4. Abstraktit ja reaaliset systeemit

Abstrakti systeemi on sellainen, jonka kaikki alkioit ovat käsitteitä. Abstraktin systeemin alkioit luodaan määrittelemällä, ja alkioiden väliset relaatiot saadaan oletuksista - esimerkiksi aksiomista ja seurauslauseista.<sup>5)</sup>

1) "Keskenään kytkettyjen toiminta-alkioiden (active elements) joukkoa kutsutaan toiminta-alkioiden systeemiksi tai lyhyesti systeemiksi". Näihin toiminta-alkioihin juuri liittyy joitakin tärkeitä rajoituksia. Lange O.: "Wholes and Parts; a General Theory of System Behaviour", PWN-Polish Scientific Publishers, Warszawa, s. 17 (systeemin määritelmä) ja s. 4 (toiminta-alkio).

2) Niitamo: mt. s. 4.

3) Lange: mt. kappaleet II - V erityisesti.

4) Forrester: mt. erityisesti kappale 4, jossa vasta tarkastellaan systeemien yleistä rakennetta, vaikka edellisissä kappaleissa on jo rakennettu melko mutkikkaitakin malleja.

5) Ackoff: mt. s. 4.

Yleisesti abstrakteina systeemeinä voidaan pitää kaikkia ihmisen reaalista systeemeistä luomia malleja, niin matemaattisia kuin verbaalisiakin, sekä myös malleja, joilla ei ole tarkoitustakaan kuvata reaalisia systeemeitä. <sup>1)</sup>

Tällaisiksi "absoluuttisiksi" abstrakteiksi systeemeiksi voidaan luokitella suurin osa aksiomaattista kautta rakennetuista systeemeistä, esimerkiksi differentiaaliyhtälöryhmät matematiikan teoriassa. <sup>2)</sup> Huomattakoon, että differentiaaliyhtälöryhmät ovat eriten käytettyjä matemaattisia apuneuvoja reaalisten systeemien kuvauksissa. <sup>3)</sup>

Reaalinen systeemi sisältää konkreettisia alkioita. Reaalinen systeemi on esimerkiksi ihmisten muodostama organisaatio, jossa relaatioina on mm. informaatiovirtoja. <sup>4)</sup>

Eräässä mielessä kaikki inhimillinen ajattelu tapahtuu todellisuudesta luotujen mallien avulla. <sup>5)</sup> Tämän vuoksi ovat abstraktit systeemit erittäin tärkeässä asemassa pyrittäessä ymmärtämään todellisten systeemien toimintaa.

On olemassa paljon tilastollisia ja matemaattisia menetelmiä, joilla pyritään mittaamaan abstraktin systeemin hyvyttä, ts. sen kykyä selittää reaalisten systeemien toimintaa. Näihin menetelmiin ei tässä kuitenkaan puututa.

## 1.5. Systeemiympäristö

Systeemiympäristö voidaan määritellä kaikkien niiden systeemin ulkopuolella olevien alkioiden joukoksi, jotka voivat vaikuttaa systeemin toimintaan tai joihin systeemin toiminta voi vaikuttaa. Toisin sanoen, jos systeemin tila määritellään sen relevanttien ominaisuuksien joukoksi, jokainen systeemin ulkopuolella oleva alkiio, joka voi muuttaa systeemin tilaa, tai jonka tilaa systeemi voi muuttaa, kuuluu systeemiympäristöön. <sup>6)</sup>

Usein on varsin vaikeaa määritellä, mitkä alkiot kuuluvat systeemiin ja mitkä ympäristöön. Useinmiten käyttötarkoitus määrää sen, mitä alkioita on pidettävä systeemiin kuuluvina. <sup>7)</sup>

1) Vrt. Forrester: mt. kappale 3, erityisesti ss. 3-2 ja 3-3, joilla vertaillaan mentaalisia malleja matemaattisiin malleihin. Kts. myös Niitamo: mt. s. 7.

2) Vrt. Hall & Fagen: mt. s. 82.

3) Esimerkiksi Langen systeemiteoriassa on differentiaaliyhtälöryhmillä keskeinen sija, samoin kuin Ashbyn kybernetiikassakin. Lange: mt. ss. 34 ja 35 sekä Ashby mt. kappaleet 2 ja 3 ja erityisesti ss. 35 ja 36.

4) Vrt. Ackoff: mt. s. 4.

5) Forrester: mt. s. 3-1.

6) Vrt. Ackoff: mt. s. 5, ja Hall & Fagen: mt. s. 83.

7) Esimerkkejä systeemin ja ympäristön rajojen mielivaltaisuudesta voi löytää esimerkiksi Ackoffin artikkelista.



Systeemiä, jolla ei ole ympäristöä, kutsutaan yleensä suljetuksi, ja systeemiä, jolla on ympäristö, tämän vastapainoksi avoimeksi. <sup>1)</sup>

Aivan toisin tulkitsevat mm. Lange ja Forrester käsitteet avoin ja suljettu systeemi. Heidän terminologiassaan suljetussa systeemissä on ainakin yksi palaute (määritellään kappaleessa 2.8.), ja avoimessa systeemissä ei siis ole yhtään palautetta. <sup>2)</sup>

Koska mm. talousteoriassa sanat "avoin" ja "suljettu" viittaavat vuorovaikutukseen ympäristön kanssa, lienee parempi käyttää näitä käsitteitä juuri Ackoffin ja Hallin tarkoittamassa merkityksessä. Tämän vuoksi käytän termejä "palaute-systeemi" ja "suora systeemi" erottamaan systeemin, jossa on ainakin yksi palaute, sellaisesta, jossa sitä ei ole.

### 1.6. Staattiset ja dynaamiset systeemit

Systeemin tilan muuttuminen ajan kuluessa on epäilemättä systeemiteoreettisen tutkimuksen pääkohde.

Systeemiä, jonka tila muuttuu määrätyn ajanjakson aikana, kutsutaan dynaamiseksi systeemiksi. <sup>3)</sup> Staattinen taas on systeemi, jonka tila ei muutu tämän ajanjakson aikana. Tässä määritelmässä on systeemin tilalla varsin keskeinen merkitys. Systeemin tilahan määriteltiin sen relevanttien ominaisuuksien joukoksi. Tästä johtuu, että samaa fyysistä systeemiä voidaan pitää usein joko dynaamisena tai staattisena riippuen siitä, miten tämä relevanttien ominaisuuksien joukko määritellään. Tämä johtaa siihen, että jos samalle fyysiselle systeemille on tila määritelty useammalla tavalla, on kutakin tilamääritelmää kohden katsottava kysymyksessä olevan eri systeemin.

Esimerkin tästä antaa määrätyn ajanjakson aikana palava sähkölamppu. Jos relevantiksi ominaisuudeksi katsotaan, palaako lamppu vai ei, systeemi on staattinen. Jos taas tarkastellaan elektronien liikettä, systeemi on dynaaminen.

Huomattakoon, että tässä on koko ajan ollut itse asiassa kysymys siitä, onko systeemi tasapainotilassa. Tällainen pohdiskelu on tietenkin paikallaan reaalisten systeemien kohdalta. Koska kuitenkin reaalista systeemiä tarkastellaan aina siitä rakennetun abstraktisen mallin avulla, saamme varsin yksikäsitteisen määritelmän systeemin

1) Vrt. esim. Ackoff: mt. s. 7.

2) Forrester: mt. s. 1-5, ja Lange: mt. ss. 13 ja 14.

3) Kts. esim. Ackoff: mt. s. 8, tai Hall & Fagen: mt. s. 82. Langella on dynaamisten ja staattisten systeemien ero huomattavasti hämäämpi. Yleisesti ottaen hän määrittelee kaikki systeemit dynaamiseksi siinä mielessä, että niiden tila voi muuttua ajassa (tämä "voi muuttua" tekee tietenkin kaikista systeemeistä dynaamisia myös muiden määritelmien mukaan). Huomio kiinnitetään vain siihen, onko systeemi tasapainotilassa vai ei. Lange: mt. kappaleet VII ja VIII.

dynaamisuudesta. Dynaaminen on sellainen abstrakti systeemi, jossa aika on muuttujana, ja staattinen sellainen, jossa aika ei ole muuttujana. Tällöinkin tosin jää rajan veto ns. vertailevien staattisten mallien ja aitojen dynaamisten mallien välillä hieman tulkinnan varaiseksi, koska vertailevia staattisia malleja käytetään ikään kuin ne olisivat todella dynaamisia useimmissa tapauksissa (ts. verrataan systeemin tiloja eri ajankohtina).<sup>1)</sup>

Systeemimuutokset voimme luokitella seuraavasti<sup>2)</sup>:

Systeemin reaktio on systeemitapahtuma, jonka sattumiselle joku toinen systeemille tai sen ympäristölle sattuva tapahtuma on riittävä ehto. Siis jokin muu tapahtuma aiheuttaa deterministisesti tämän tapahtuman.

Systeemin vastaus on tapahtuma, jolle jokin muu systeemille tai sen ympäristölle sattuva tapahtuma on välttämätön, mutta ei riittävä ehto. Systeemi siis voi joko vastata tai olla vastaamatta ärsykkeeseen, mutta ilman ärsykettä se ei voi vastata.

Systeemin akti on tapahtuma, jolle mikään toinen systeemille tai sen ympäristölle sattuva tapahtuma ei ole välttämätön eikä riittävä ehto.

Näin toimivia eri systeemityyppejä voidaan kutsua reaktiivisiksi, responsiivisiksi ja autonomisiksi systeemeiksi. Useimmat reaaliset systeemit sisältävät tietenkin piirteitä kaikista näistä pelkistetyistä systeemeistä.

## 1.7. Systeemin käyttäytyminen

Systeemin käyttäytyminen on systeemitapahtuma (tapahtumien joukko), joka on välttämätön tai riittävä jollekin toiselle tapahtumalle systeemissä tai sen ympäristössä.<sup>3)</sup>

- 1) W. J. Baumol käyttää termiä "dynamic" systeemeistä yleensä ja termiä "dynamical" (tai "stochastic" jos kyseessä on stokastinen malli) systeemeistä, joissa aika on eksplisiittisesti mukana. Baumol W. J.: "Economic Dynamics", 5. Edition, Collier-Macmillan, Toronto, Ontario, 1970, ss. 3-9.
- 2) Tässä käytetään Ackoffin artikkelissa sivuilla 8-10 käytettyä luokittelua. Huomattakoon, että se koskee nimenomaan reaalisia systeemejä.
- 3) Tämä on Ackoffin esittämä määritelmä. Se tuntuu varsin löysältä, mutta koska se sisältää myös suurimman osan kirjallisuudessa esitetystä käyttäytymisen määrittämisestä nimenomaan yleisyytensä vuoksi, sitä on käytetty tässäkin. Vertauksen vuoksi voidaan tarkastella Oscar Langen määritelmää systeemin käyttäytymistavasta. Lange määrittelee ensin jokaiselle toiminta-alkiolle oman käyttäytymistapansa, joka matemaattisesti määritellään transformaatio-operaatioksi. Systeemin kaikkien inputtien ja outputtien väliset transformaatiot yhdessä muodostavat systeemin käyttäytymistavan. Formaalisimmin esitettynä, jos  $X$  ja  $Y$  ilmaisevat inputtien ja outputtien alkuperäiset tilat, ja  $X'$  ja  $Y'$  uudet tilat (jossa  $X$ ,  $Y$ ,  $X'$  ja  $Y'$  ovat yhdistelmävektoreita, jotka sisältävät systeemin kaikkien alkioiden kaikki inputit ja outputit) niin  $X' = TS(X)$  ja  $Y' = ST(Y)$ , jossa  $T$  on alkioiden transformaatiomatriisi (sisältää kaikkien alkioiden transformaatiomatriisit) ja  $S$  on systeemin rakennematriisi, josta ilmenevät systeemin alkioiden väliset kytkennät. Tämän tuloksen merkitys on siinä, että systeemin käyttäytyminen riippuu osittain yksittäisten alkioiden käyttäytymisestä ja osittain systeemin kytkennöistä. Kokonaisuus ei siis ole pelkästään osien summa, eikä systeemin käyttäytymistä voida ennustaa, vaikka tiedettäisiinkin kaikkien alkioiden käyttäytymistavat, ellei tunneta myöskin systeemin kytkentöjä. Nämä tulokset on tarkemmin johdettu Langen "Wholes and Parts":in kappaleessa VI, jossa on myöskin keskusteltu näiden tulosten ensiarvoisesta merkityksestä.

Käyttäytyminen koostuu siis systeemitapahtumista, joiden seuraukset ovat kiinnostuksen kohteena.

Seuraavassa esitetään systeemien luokittelu käyttäytymisen perusteella. Tämäkin luokittelu perustuu Ackoffin artikkeliin ja koskee siis reaalisia systeemejä.<sup>1)</sup>

Tilansa säilyttävä systeemi on sellainen, joka voi reagoida vain yhdellä tavalla kuhunkin ulkoiseen tai sisäiseen tapahtumaan, vaikka reaktio olisi erilainen kaikkiin eri tapahtumiin. Nämä erilaiset reaktiot tuottavat kaikki saman ulkoisen tai sisäisen tilan. Tällainen systeemi siis vain reagoi muutokseen ja sen toiminta määräytyy täysin toiminnan aiheuttaneesta muutoksesta. Erinomainen esimerkki tällaisesta systeemistä on kompassin neula, joka säilyttää suuntansa kohti pohjoista huolimatta lukemattomista ympäristön muutoksista.

Tavoitteeseen hakeutuva systeemi kykenee vastaamaan eri tavoin yhteen tai useampaan erilaiseen ulkoiseen tai sisäiseen tapahtumaan yhdessä tai useammassa erilaisessa ulkoisessa tai sisäisessä tilassa, ja joka voi vastata eri tavoin määrättyyn tapahtumaan muuttumattomassa ympäristössä, kunnes se saavuttaa määrätyn tilan, jonka tuottaminen on sen tavoite. Tällaisen systeemin käyttäytyminen on siis responsiivista. Tavoitteeseen hakeutuvan systeemin perusominaisuus on siis se, että se voi vakio-olosuhteissa suorittaa saman tehtävän useammalla eri tavalla ja myös erilaisissa olosuhteissa.

Tällainen tavoitehakuinen systeemi on esimerkiksi Walter R. Fuchsin kuvaama kone, joka hakeutuu valoa kohti ja voi kiertää tielleen osuvat esteet.<sup>2)</sup> Mainittakoon vielä, että muistilla varustettuna tavoitehakuinen systeemi voi ajan mittaan lisätä tehokkuuttaan.

Monitavoitteinen, tavoitteeseen hakeutuva systeemi hakeutuu tavoitteeseen kahdessa tai useammassa erilaisessa ulkoisessa tai sisäisessä tilassa ja hakeutuu erilaisiin aikutilan määräämiin tavoitteisiin vähintään kahdessa erilaisessa tilassa.

Tarkoitteinen on sellainen monitavoitteinen systeemi, jonka eri tavoitteilla on jokin yhteinen piirre. Tuon yhteisen piirteen tuottaminen on tämän systeemin tarkoitus. Tällainen systeemi voi pyrkiä erilaisiin tavoitteisiin, jotka eivät kuitenkaan ole sen itsensä pääteitävissä. Esimerkkinä tarkoitteisesta systeemistä Ackoff mainitsee tietokoneen, joka on ohjelmoitu pelaamaan kahta erilaista peliä. Yhteinen piirre on tällöin pyrkimys voittaa.

Tahdonvarainen systeemi voi tuottaa saman tuloksen useilla eri tavoilla samassa tilassa ja voi tuottaa erilaisia tuloksia samassa ja erilaisissa tiloissa. Tämä systeemi

---

1) Ackoff: mt. ss. 11-18.

2) Fuchs W.R. : "Informaatioteoria ja kybernetiikka", Kirjayhtymä, Helsinki, 1970 ss. 336-339.

voi siis valita sekä tavoitteet että keinot. Esimerkki tällaisesta systeemistä on ihminen. Tahdonvaraisen systeemin tavoitteet voidaan luokitella niiden saavutettavuuden mukaan.

Välitavoite on määrättyssä tilanteessa toivottava lopputulos, joka voidaan saavuttaa määrätyn periodin aikana. Pitkän tähtäimen tavoite on toivottava lopputulos, jota ei voida saavuttaa määrätyn ajan kuluessa, mutta joka kuitenkin on saavutettavissa. Päämäärä on pitkän tähtäimen tavoite, jota ei voida milloinkaan saavuttaa, mutta jota voidaan lähestyä rajatta.

Näin päästäänkin tahdonvaraisten systeemien "aateliin", päämäärähakuiseen systeemiin. Saavutettuaan minkä tahansa tavoitteen tällainen systeemi alkaa hakeutua kohti uutta tavoitetta, joka on lähempänä päämäärä. Koska tällainen systeemi on tahdonvarainen, voi se muuttaa päämääriään mielivaltaisista syistä.

Vertailtaessa tätä luokitusta Langen esittämään havaitaan, että tässä on menty paljon yksityiskohtaisemmalle tasolle. Tällaista vertailua tehtäessä on koko ajan muistettava, että Ackoff käsittelee reaalisia systeemejä, mutta Lange abstrakteja systeemejä. Toisin sanoen Langen luokittelu perustuu siihen, miten malli käyttäytyy, mutta Ackoffin luokittelu siihen, miten todellinen systeemi käyttäytyy. Lisäksi Lange ei ole teoriaansa "Wholes and Parts" -issa esittäessään rakentanut edes mallia todellisesta systeemistä, vaan puhtaasti abstraktin mallin, jolla selitetään systeemien käyttäytymistä yleensä.

Kaikkia tässä esiteltyjä systeemejä voidaan kuvata Langen matemaattisella systeemillä, joka on stabiili ja lisäksi tavoitehakuisten ja sitä "korkeampien" systeemien kohdalla ergodinen. <sup>1)</sup> Langella stabiilin systeemin pyrkimystä kohti tasapainotilaa kutsutaan itsesäätelyksi, ja tällaiset itsesäätöiset systeemit voidaan rinnastaa Ackoffin tilansa säilyttäviin systeemeihin. <sup>2)</sup>

### 1.3. Palaute (feedback)

Viimeisenä yleisen systeemiteorian peruskäsitteenä otan esiin palautteen.

Palaute tarkoittaa yleisesti ottaen sitä, että systeemin jonkin tai joidenkin alkioiden aikaisemmat tilat vaikuttavat tämän saman tai näiden samojen alkioiden nykyiseen tilaan <sup>3)</sup>, ts. Forresteria lainaten "palaute-systeemiin vaikuttaa sen oma aikaisempi

1) Lange: mt. kol. IX.

2) Tällaisia tilansa säilyttäviä systeemejä voidaan kutsua myöskin homeostaateiksi. Tämä termi on peräisin Ashbyltä, joka kuvaa homeostaatin toimintaa "Introduction to Cybernetics":in sivuilla 233 ja 234.

3) "Suljetussa silmukassa jokin toiminta-alkio on kytketty johonkin sitä itseään silmukassa edeltävään alkioon. Tällaisia kytkentää kutsutaan palautteeksi". Lange: mt. s. 13.

käyttäytyminen". 1)

Palautteen keskeisen merkityksen mutkikkaiden systeemien käyttäytymisessä havaitsi jo Wiener. 2) Mitä korkeammalle mennään systeemien hierarkiassa sitä tärkeämmäksi tekijäksi nousee palaute. Systeemidynamiikassa, jonka avulla tutkitaan nimenomaan mutkikkaita sosiaalisia systeemejä, on palaute-silmukka jopa otettu systeemin peruselementiksi. 3) Myös Langella on palautteen olemassaolo perusedellytys korkeampien systeemien - stabiilien ja ergodisten systeemien - olemassaololle. 4)

Palaute-silmukkaan kuuluvat kaikki ne alkiot, jotka ovat kytkentäketjussa palautteen saavan ja palautteen antavan alkion välissä.

Palaute-silmukka voidaan määritellä positiiviseksi, mikäli vaikutuksen ja vastavaikutuksen suunta on sama, ja negatiiviseksi, mikäli vaikutus ja vastavaikutus ovat erisuuntaisia. Esimerkki positiivisesta feedback-silmukasta on korkoa korolle kasvava pankkitili (mitä enemmän siellä on sitä enemmän sinne tulee lisää). Negatiivisesta feedbackistä kelpaa esimerkiksi tavallinen termostaatti, joka pyrkii palauttamaan lämpötilan entiselle tasolle sen noustua tai laskettua tämän yli. Lange on tosin määritellyt palaute-silmukan positiivisuuden ja negatiivisuuden tässä esitetyistä poikkeavalla tavalla. 5)

### 1.9. Graafisen esitystavan käyttö systeemimallien havainnollistamiseksi

Jotta systeemiteoreettisia malleja voitaisiin käyttää poliittisessa ja liikkeenjohdon päätöksenteossa, on päätöksentekijöiden pystyttävä tajuamaan mallin sisältö. Mutkikkaan matemaattisen mallin ymmärtäminen vaatii monien vuosien peruskoulutusta, jota ei voida vaatia ainakaan poliitikoilta. Verbaalinen mallien esittely on kuitenkin erittäin hankalaa ja epähavainnollista. Kun verbaalisesta esityksestä tulee lisäksi väkisinkin usein pitkä, kiinnittää kuulija todennäköisesti huomionsa vain joihinkin yksityiskohdiihin, ja mallin todellinen sisältö - alkiot ja kytkentöjen verkosto - jäävät helposti ymmärtämättä. Näistä seikoista johtuen on tullut tavaksi esittää systeemimallit erilaisilla havainnollistamiskuvioiden avulla. 6)

Kaikissa niissäkin tutkimuksissa, joihin on tähän mennessä viitattu, on käytetty jonkinlaista visualisointia. Monesti on systeemiteoreettinen tutkimus jopa suoritettu

1) Porrester: mt. s. 1-5.

2) Wiener: mt. ss. 95-116.

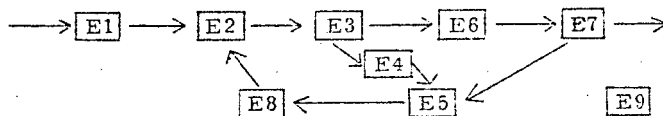
3) Porrester: mt. s. 4-1.

4) Lange: mt. kappale VIII, erityisesti s. 50.

5) Lange: mt. s. 50, ja koko kappale VIII.

6) Vrt. Niitamo: mt. s. 14.

pelkästään kuvioiden ja selittävän tekstin avulla.<sup>1)</sup> Edellä määritelty systeemi voidaan esittää esimerkiksi kuvion 1. tavalla. Siinä suorakaiteet merkitsevät alkioita ja nuolet kytkentöjä.<sup>2)</sup> Itse systeemiin voidaan tässä katsoa kuuluvan vain alkio E1-E8, sillä alkio



Kuvio 1. Systeemin kytkentäkaavio.

E9 ei ole kytkettynä mihinkään muuhun alkioon, eikä sitä siis voida pitää systeemiin kuuluvana.

Tällaista kytkentäjoukkoa kutsutaan yleensä kytkentäverkoksi. Kytkentäverkkoa voidaan pitää erikoistapauksena yleisistä verkoista, jotka koostuvat jonkin joukon elementtien välisistä relaatioista.<sup>3)</sup> Mm. professori Seppo Mustonen on väitöskirjassaan kehittänyt tätä yleistä verkkoteoriaa.<sup>4)</sup>

Esitetty kuvio osoittaa siis alkioiden välisten välittömien kytkentöjen olemassaolon (riippumatta kytkennän laadusta). Tällainen välittömien kytkentöjen verkko on erotettava lopullisten vaikutusten verkosta, jossa on yhdistetty kaikki alkio, jotka ylipäänsä voivat vaikuttaa toisiinsa joko suoraan tai välissä olevien alkioiden välityksellä.<sup>5)</sup>

Kuviossa 1. ovat kaikki alkio E2 - E8 välillisesti vaikutuksessa toisiinsa.

Kuvion 1. systeemi on avoin, koska alkio E1 ottaa inputteja ympäristöstä, ja alkio E7 lähettää outputteja ympäristöön. Lisäksi alkio E1 lähettää vain outputteja saamatta itse inputteja systeemistä. Alkioita, jotka joko vain antavat systeemiin outputteja, tai saavat siitä inputteja, kutsutaan raja-alkioiksi.<sup>6)</sup>

Kuvion 1. systeemi on myös palaute-systeemi. Kuten huomataan, siinä on kaksi palaute-silmukkaa. Toinen kulkee reittiä E2-E3-E4-E5-E8-E2 ja toinen E2-E3-E6-E7-E5-E8-E2.

- 1) Esimerkkinä tällaisesta tutkimuksesta voidaan mainita Pulliainen K.: "Ekonometrisen tutkimus systeemiteoreettisesti tarkasteltuna", Kansantaloudellisia tutkimuksia XXVIII, Helsinki, 1967, erityisesti sivulla 38: "Systeemimallin kuvausvälineeksi olen tässä valinnut verbaalisen selostuksen ja tätä havainnollistamaan verkko-kuvioita".
- 2) Huomattakoon, että kytkentänuoli voi merkitä useampaa kuin yhtä inputtia tai outputtia, ja se on siis luonteeltaan vektori. Lange: mt. kpl. III, erityisesti s. 13.
- 3) Lange: mt. ss. 15-16.
- 4) Mustonen S.: "On Distance Distribution in Networks", Helsinki, 1964.
- 5) Erityisesti Ashby tekee tämän selvän erottelun välittömien ja välillisten vaikutusten välillä. Ashby: mt. ss. 57-58.
- 6) Lange: mt. s. 19.

Kuvion 1. nuolia voidaan pitää myös "kommunikaatiokanavina".<sup>1)</sup> Tämän mukaisesti sanotaan, että alkiot E1 ja E7 kommunikoivat systeemiympäristön kanssa. Vielä tarkemmin voidaan sanoa, että alkiot E1 ja E7 on viestintuoja ympäristöstä, ja alkiot E1 ja E7 viestinviejä ympäristöön.

Kuvio 1. antoi jo esimerkin siitä, miten varsin mutkikas systeemi on kätevästi kuvattavissa piirroksen avulla. Tällaisen kuvion avulla voidaan kokonaisuus pitää mielessä kuvailtaessa systeemin tarkempia yksityiskohtia.

Mainittakoon tässä vielä verkkoteorian ehkä tunnetuin käytännön sovellutus, PERT-menetelmä (Program Evaluation and Review Technique).<sup>2)</sup> Tässä menetelmässä on kokonaisprosessi hajoitettu yksittäisten tehtävien ja tapahtumien joukoksi, joka on järjestetty vaiheittaiseksi toimintaverkoksi. Tämän jälkeen arvioidaan eri tehtävien kesto-aika ja merkitys koko prosessin kannalta. Tällöin saadaan selville, minkä tehtävien viivästyminen voi eniten viivyttää koko prosessia. Näistä "kriittisistä tehtävistä" muodostetaan sitten vaiheittain etenevä "kriittinen polku", joka siis osoittaa ne työt, joiden myöhästyminen merkitsee suurinta myöhästymistä koko projektin valmistumisessa. Tällainen polku tietenkin helpottaa resurssien allokoinnista työn eri vaiheissa, ja on erityisen tärkeä, jos huomataan, että työn eri vaiheissa joudutaan jättämään osittain tinkiä suunnitellusta aikataulusta. Tällainen kaavio on tietenkin myös erittäin tärkeä projektin aikataulua määrättäessä ja resurssitarvetta arvioitaessa.<sup>3)</sup>

1) Ashby: mt. s. 57

2) Kts. esim. Varho O.: "PERT-menetelmä", IBM:n systeemin suunnittelukurssin luentomoniste, tai Battersby A.: "Network Analysis for Planning and Scheduling", Macmillan & Co Ltd., London, 1965.

3) Tarkemmin tätä menetelmää on selvitetty edellä mainitussa IBM:n kurssimonistuksessa.

## 2. SYSTEEMIDYNAMIIKASTA

### 2.1. Systeemidynamiikan yleispiirteitä<sup>1)</sup>

Systeemidynamiikassa on omaksuttu tyypillisesti analyyttinen lähestymistapa. Tämän mukaisesti lähtökohtana on itse systeemi.

Systeemidynamiikassa keskitytään pelkästään palaute-systeemeihin. Palaute-silmukat on jaettu positiivisiin ja negatiivisiin. Negatiivinen silmukka pyrkii saavuttamaan tietyn tilan (joka tosin voi vaihdella ajan kuluessa), ja siis palauttaa todellisen tilan kohti tätä tavoitetilaa, mikäli nämä tilat eroavat. Positiivinen silmukka saa sen sijaan systeemin tilan etääntymään yhä pitemmälle alkuperäisestä tilasta, jota voidaan pitää eräänlaisena tavoitteena. Systeemin tarkempaan rakenteeseen palaamme seuraavissa kappaleissa.

Systeemidynamiikka on kehitetty nimenomaan dynaamisten systeemien simulointiin tietokoneella. Tästä johtuu, että teoria on muotoiltu siten, että vaiheittainen simulointi on mahdollista, ja että simulointimenettelystä olisi tulosten kannalta mahdollisimman paljon hyötyä.

Lisäksi tietokoneen käyttö sinänsä on aiheuttanut omia vaatimuksiaan teorialle. Systeemidynamiikan mallien simulointia varten on laadittu oma tietokonekielensä, mikä on myös vaikuttanut systeemidynamiikan teorian esitystapaan. Tämä erityinen esitystapa on johtanut siihen, että systeemidynamiikka näyttää poikkeavan huomattavastikin muusta systeemiteoriasta. Näihin näennäisiin eroihin tullaan kiinnittämään tarkemmin huomiota vertailtaessa systeemidynamiikkaa muuhun systeemiteoriaan.

### 2.2. Simuloinnista

Kuten on jo todettu, systeemidynamiikassa lähdetään siitä, että systeemimalli simuloidaan tietokoneella. Miksi sitten ei etsitä suoraan analyyttistä ratkaisua, joka antaisi systeemin tilan minä ajankohtana hyvänsä, ja josta voitaisiin tehdä johtopäätöksiä systeemin stabiilisuudesta?

Tärkein syy simulointimenettelyyn on se, että epälineaaraisia mutkikkaita systeemi-malleja ei useinkaan pystytä ratkaisemaan nykyisin matemaattisin keinoin. Jos käytävissä oleva metodologia ei salli mutkikkaampien systeemien tarkastelua, johtaa se tietenkin vain yksinkertaisten mallien tutkimiseen. Näiden yksinkertaisten mallien perusteella tehtävät johtopäätökset eivät kuitenkaan aina kuvaa todellisuutta edes tyydyttävästi. Näiden mallien perusteella annettavat suositukset saattavat siten johtaa entistä suurempiin hankaluuksiin todellisen systeemin jossain muussa osassa, jota ei

1) Koska tässä "tutkimuksessa" kuvataan systeemidynamiikkaa sellaisena kuin se on esitetty Forresterin kirjassa "Principles of Systems", ei lähde ole mainittu muulloin kuin silloin, kun se on jokin muu kirja.



yksinkertaiseen malliin, ole pystytty sisällyttämään. Systeemidynamiikan tutkimuskohteena ovat nimenomaan mutkikkaat, useimmiten epälineaariset (sosiaaliset) systeemit<sup>1)</sup>, joiden tutkimisessa simulointi on ainoa menetelmä, joka ei aseta liikoja rajoituksia mallien muodolle. Tästä on Forrester todennut: "Mikä tahansa käsite tai oletamus, joka voidaan selvästi määritellä sanallisesti, voidaan sisällyttää tietokonemalliin".<sup>2)</sup> Koska siis simulointimalli on ainoa vaihtoehto mutkikkaiden systeemien tutkimiseksi, käytetään sitä metodologian yhtenäisyyden vuoksi silloinkin, kun analyyttinen ratkaisu ehkä olisi olemassa.

Toinen tärkeä syy simulointimallien käyttöön on se, että niiden rakentaminen ja käsittely on huomattavasti yksinkertaisempaa kuin analyyttisten mallien. Jo pientenkin differentiaali- tai differenssiyhtälöryhmien käsittely vaatii perinpohjaista matematiikan tuntemusta, joka useinkin puuttuu juuri sosiaalitieteilijöiltä. Kuitenkin juuri sosiaalitieteilijät luovat sosiaalitieteiden teoriaa, joten heidän mukanaolonsa mallien rakentamisessa on välttämätöntä. Onhan muistettava, että mikään malli ei ole parempi kuin sen pohjana oleva teoria, ja on kai selvää, että juuri sosiaalitieteisiin erikoistuneet tutkijat pystyvät antamaan sosiaalisia systeemejä kuvaaville malleille parhain teoreettisen pohjan. Tällöin on sosiaalitieteilijöiden myöskin hallittava mallin rakentamisessa tarvittava tekniikka.

Systeemidynamiikan mukaisten mallien rakentamisessa tarvittavan metodologian pystyy kuka tahansa matematiikkaa tuntematonkin sosiaalitieteilijä oppimaan varmastikin parissa kuukaudessa. Tämä tietenkin mahdollistaa laajojen poikkitieteellisten mallien rakentamisen ja tutkimisen, mikä laajentaa oleellisesti systeemidynamiikan sovelutusmahdollisuuksia. Tällaisilla laajoilla malleilla voidaan välttää osien tutkiminen erillisinä ilman mitään keskinäisiä vuorovaikutussuhteita.

Yllä esitetty systeemidynamiikan "puolustus" ei tietenkään merkitse sitä, että simulointi olisi sinänsä parempi ratkaisu kuin analyyttinen ratkaisu. Jos malli on analyyttisesti ratkaistavissa, antaa tämä ratkaisu huomattavasti enemmän informaatiota mallin tulevasta kehityksestä ja stabiilisuusehdoista. Jos siis mallilla näyttää olevan analyyttinen ratkaisu, on sen etsiminen tietenkin parempaa kuin simulointiin turvautuminen.

## 2.3. Palaute-systeemien yleinen rakenne

### 2.3.1. Systeemin rajat

Systeemidynamiikka lähtee suljetusta systeemistä. Mielenkiinto kohdistuu dynaamisen käyttäytymisen syihin itse systeemin sisällä. Toisin sanoen systeemin eri kom-

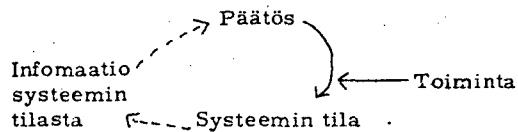
1) Kts. esim. Forrester J. W.: "Sosiaalisten järjestelmien intuitionvastainen käyttäytyminen", Tekniikka No. 9, 1971, s. 21.

2) Mt. s. 23.

ponenttien on itse luotava ne kasvu-, heilahtelu- ja muutosprosessit, joita systeemis-  
sä havaitaan.<sup>1)</sup>

### 2.3.2. Palaute-silmukka

Systeemin<sup>2)</sup> tärkein rakenneosa on palaute-silmukka. Palaute luo systeemin dynami-  
sen käyttäytymisen. Mutkikkaammat systeemit muodostuvat keskenään vuorovaikutus-  
suhteissa olevista palaute-silmukoista. Palaute-silmukka on suljettu piiri, joka yh-  
distää toisiinsa päätöksenteon, toiminnan, systeemin tilan ja informaation systeemin  
tilasta, mikä jälleen vaikuttaa päätöksentekoon. Tämä voidaan esittää kuvion 2. avul-  
la.



Kuvio 2. Palaute-silmukan yleinen rakenne.


Kuviossa yhtenäinen viiva merkitsee sitä, että toiminta muuttaa systeemin fyysistä  
tilaa. Katkoviivat taas tarkoittavat vain informaatiovirtoja, jotka eivät sinänsä  
voi vaikuttaa systeemin tilaan, vaan vain päätöksiin toimintaan ryhtymisestä<sup>3)</sup>.

### 2.3.3. Tasomuuttujat ja virtamuuttujat

Jokaiseen palaute-silmukkaan kuuluu kahden tyyppisiä muuttujia, tasoja ja virtoja.

Tasomuuttujat kuvaavat systeemin tilan minä tahansa ajankohtana. Tasomuuttujiin  
kasautuu systeemin koko aikaisemman historian tulos. Tasomuuttujan arvon laskemi-  
seksi tarvitaan tasomuuttujan itsensä aikaisempi arvo, virtojen arvot, jotka saavat  
tason muuttumaan, sekä laskentavälin pituus tason arvon edellisestä laskennasta.  
Tasomuuttujat suorittavat siis integrointiprosessia. Tasomuuttujaa kuvataan piirroks-  
sissa symbolilla .

- 1) Ulkomaailma voidaan tietenkin ottaa yhtenä komponenttina mukaan systeemiin, jolloin tähän komponenttiin keskittyy kaikki ulkomaailmaa kiinnostava tieto, ja ulkomaailma vastaa tähän tietoon omien sääntöjensä mukaan. Tämä komponentti voi olla suurikin osa koko systeemistä. Ulkomaailmasta tulevia satunnaissysäyksiä voidaan tietenkin ottaa mukaan myös satunnaistekijöiden välityksellä. Yleisenä sääntönä voidaan sanoa, että jos systeemillä on palaute-silmukka ulkomaailman kanssa, so. jos ulkoa tuleva vastavaikutus on riippuvainen systeemin sisältä ensin tulevasta vaikutuksesta, niin silloin ainakin osa ympäristöstä on otettava systeemiin mukaan.
- 2) Koko tässä tutkimuksessa tarkoitetaan systeemillä nimenomaan palaute-systeemiä, ellei toisin mainita.
- 3) Päätöksenteko ei välttämättä tarkoita inhimillistä päätöksentekoa. Esimerkiksi termostaatti voi tehdä päätöksen määrättyyn toimintaan ryhtymisestä huomattuaan esimerkiksi lämpötilan poikkeavan liian paljon toivotusta.

Virtamuuttujat taas kertovat, kuinka nopeasti tasot muuttuvat. Ne eivät muuta tason arvoa määrättyä ajankohtana vaan määrättyllä aikavälillä. Virtamuuttujien yhtälöt ovat "politiikkoja", jotka osoittavat päätöksentekopisteeseen tulleen informaation ja sen aiheuttaman toiminnan. Virtamuuttujien arvojen laskemiseksi ei tarvita muuta, kuin tasojen ja vakioiden arvot. Virrat eivät siis riipu omista aikaisemmista arvoistaan, laskentavälin pituudesta tai muista virtamuuttujista. Virtamuuttujaa kuvataan symbolilla .

Eräs systeemidynamiikan peruslauseista on, että tasomuuttujan arvoa voi muuttaa ainoastaan virtamuuttuja. Mikään tasomuuttuja ei siis voi muuttaa toista tasoa ilman välissä olevaa virtamuuttujaa, eikä mikään virtamuuttuja voi vaikuttaa toiseen virtamuuttujaan muuten kuin tason välityksellä. Määrättyllä aikavälillä voidaan virtamuuttujasta ottaa keskiarvo, ja koska keskiarvon määrääminen sisältää integrointia, se sisältää myös tasomuuttujan. Näin voi siis kaksi virtamuuttujaa vaikuttaa toisiinsa keskiarvojensa tasojen välityksellä. Käytännössä mitään virtaa ei voida laskea muuten kuin keskiarvona määrättyltä aikaväliltä, mutta tämä ei merkitse sitä, että virtoja voisi vapaasti yhdistää toisiin virtoihin, vaan pelkästään virtamuuttujan arvon laskenta on kiikaa.

Systeemidynamiikan mallin rakentamisessa on siis pidettävä huoli siitä, että tasomuuttujat ja virtamuuttujat vuorottelevat. Todellisen systeemin kuvauksessa tarvitaan siis yksi tasomuuttuja kutakin todellisen mallin tasoa eli määrää (varantoa) varten. Lisäksi kaikkia näitä tasoja varten tarvitaan simuloinnissa lähtöarvot. Kun tasoille on annettu lähtöarvot, ja systeemin politiikkayhtälöt (virtayhtälöt) on määritelty, niin systeemiä voidaan simuloida niin pitkälle tulevaisuuteen kuin on tarpeellista.

#### 2.3.4. Virtamuuttujien alarakenne

Tasomuuttujia ei kannata enää jakaa alarakenteisiin. Nehän muodostuvat virtamuuttujien integroinnista, ja ainoa ongelma mallia rakennettaessa onkin sopivien tasomuuttujien identifiointi. Sen sijaan virtamuuttujien määräämiseksi on hyödyllistä erottaa myös alarakenteita. Päätösvirta ja toimintavirta merkitsevät tässä samaa, koska viive päätöksen ja toiminnan välillä merkitsisi tasomuuttujan mukaan ottamista päätöksen ja toiminnan väliin, ja tämä taas merkitsisi käyttämässämme terminologiassa kahta päätöstä ja toimintaa. Mainittakoon jo tässä yhteydessä, että viiveet luodaan juuri uusien keinoitekoisten tasomuuttujien avulla. Täten siis politiikka tässä käytetyssä merkityksessä tarkoittaa vain sitä, kuinka virtamuuttuja lasketaan systeemin tasoista ja vakioista.

Virtamuuttujan alarakenteessa on havaittavissa neljä eri komponenttia: tavoite, systeemin havaittu tila, tavoitteen ja havaitun tilan eron identifiointi ja päätös siitä, mitä tehdään tämän eron perusteella. Systeemin havaitun tilan ei suinkaan tarvitse olla sama, kuin sen todellinen tila. Eihän näin ole käytännössäkään.

Virtamuuttujan eri osien graafiseen esitykseen palaamme seuraavassa kappaleessa.

## 2.4. Yhtälöt ja mallin laskeminen

### 2.4.1. Laskentajärjestys

Tietokonelaskentaa ajatellen on systeemidynamiikassa määrättävä tarkemmin laskentajärjestys ja yhtälöt, joiden perusteella laskenta suoritetaan.

Systeemin simuloinnissa tarvitaan tietenkin määrätty laskentaväli vaiheittaista ratkaisua varten. Tämän laskentavälin ei suinkaan tarvitse olla sama kuin mallissa käytetty aikayksikkö, eikä se aina edes saa olla sitä mallin tuloksia ajatellen. Karkeana sääntönä voidaan pitää sitä, että laskentavälin tulisi olla korkeintaan puolet mallissa käytetystä lyhimmästä viiveestä (viiveisiin palaamme tarkemmin myöhemmin).

Laskentavälistä käytetään symbolia "DT" (difference in time). Siten, jos mallin ulostuksessa käytetty aikayksikkö on kuukausi, ja laskentaväli on päivä, niin  $DT = 1/30$ , tai jos laskentaväli on viikko, niin  $DT = 1/4$ . Jos taas laskentaväliksi valittaisiin vuosi, niin  $DT = 12$ .

Systeemidynamiikassa on valittu symboli "K" merkitsemään parhaillaan laskettavana olevaa ajankohtaa. Lähinnä edellistä ajankohtaa merkitään "J":llä ja lähinnä seuraavaa "L":llä. Siis  $J = K - DT$  ja  $L = K + DT$ . Ajankohtien J ja K välisestä ajanjaksosta käytetään merkintää "JK" ja ajankohtien K ja J välisestä merkintää "KL".

Tasomuuttujien L1 ja L2 arvoja ajankohtana K merkitään "L1.K" ja "L2.K". Vastavasti virtamuuttujien R1 ja R2 arvoja aikavälillä JK merkitään "R1.JK" ja "R2.JK".

Mallin laskenta ajankohdalla K tapahtuu siten, että kun kaikki tasot on laskettu ajankohdalle J, niin sitten lasketaan virrat aikaväliltä JK ja sen jälkeen tasot ajankohdalla K.

Huomattakoon, että systeemidynamiikassa on yhtälöt muotoiltu siten, että muita ajankohtia kuin edellä esitetyt kolme ei systeemin laskemisessa tarvita.

### 2.4.2. Symbolit

Tietokone asettaa rajoituksia myös yhtälöissä käytettäville symboleille. Sääntönä tässä on se, että muuttujan symboli, nimi, ei saa olla kuutta merkkiä pitempi, ja että ensimmäisen merkin on oltava kirjain.

2.4.3. Tasoyhtälöt ja virtayhtälöt

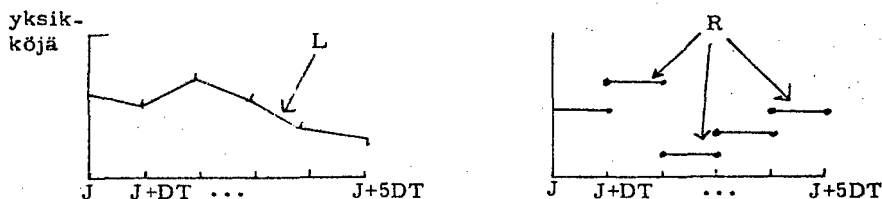
Systeemidynamiikassa on tasoyhtälön muoto täysin määrätty. Se on

$$L.K = L.J + (DT) (RA.JK - RS.JK) \quad (1.)$$

jossa

- L.K = Taso ajankohtana K (yksiköitä)
- L.J = Taso ajankohtana J (yksiköitä)
- DT = Laskentaväli
- RA.JK = Aikavälillä JK tasoon lisätty virta (yksikköjä/aikayksikkö)
- RS.JK = Aikavälillä JK tasosta vähennetty virta (yksikköjä/aikayksikkö)

Tasot siis mitataan yksiköissä, esimerkiksi ihmisissä, rahassa tai metreissä, kun taas virrat mitataan yksiköissä aikayksikköä kohden (tästä huomataan, että virtamuuttuja itse asiassa lasketaan keskiarvona kyseiseltä aikaväliltä). Laskentaväli DT huolehtii siitä, että tulos on tason lisäys juuri laskentavälin aikana, eikä mallissa käytetyn aikayksikön aikana. Tason oletetaan muuttuvan lineaarisesti arvosta L.J arvoon L.K ratkaisuvälin aikana, kun taas virta on vakio ratkaisuvälin aikana ja voi muuttua vain hyppäyksittäin aina laskenta-ajankohtana. Tätä havainnollistaa kuvio 3.



Kuvio 3. Tasomuuttujan L ja virtamuuttujan R kehitys ajassa.

Ratkaisuvälin DT on esiinnyttävä jokaisessa tasoyhtälössä, mutta se ei saa esiintyä missään muussa yhtälössä. Juuri laskentaväli helpottaa tasomuuttujan ja virtamuuttujan erottamista yhtälömuotoon kirjoitetussa mallissa.

Koska tasoyhtälö suorittaa integrointiprosessia (summausta), voitaisiin se esittää tavanomaisemmassa muodossa (olettaen, että liikuttaisiin differentiaalisilla aikaväleillä):

$$L.K = L.J + \int_J^K (RA - RS) dt \quad (2.)$$

tai vaihtoehtoisesti:

$$L.K = L.O + \int_0^K (RA - RS) dt \quad (3.)$$

Yhtälössä (2.) on muuttuja L jo laskettu ajankohtaan J asti, ja oikean puoleisessa termissä on integrointi suoritettu vain aikaväliltä JK. Yhtälössä (3.) on sen sijaan lähdetty tason L alkuarvosta L.O, ja integrointi on suoritettu suoraan ajankohtaan K asti.

Tässä muodossa on virtojen erotusta integroitu jatkuvana muuttujana, mikä itse asiassa olisikin oikea tapa tason laskemiseksi. Jos tasoa kuitenkin tarkastellaan vain määrättyjen aikavälien kuluttua, niin diskreetti keskiarvojen laskenta antaa saman tuloksen. Onhan muistettava, että integraali ei läheskään aina ole analyttisesti laskettavissa, ja siten diskreetti muoto on numeerisia laskuja varten selvästi käyttökelpoisempi.

Virtayhtälölle ei ole asetettu sellaisia rajoituksia kuin tasoyhtälöille. Yleisessä muodossa virtayhtälö voitaisiin esittää seuraavasti:

$$R.KL = f(\text{tasot ja vakiot}) \quad (4.)$$

Tästä yhtälöstä nähdään, että virtamuuttuja ei ole riippuvainen toisista virtamuuttujista.

Huomattakoon, että sen lisäksi, että virtayhtälö poikkeaa rakenteeltaan tasoyhtälöstä, ilmenee virtojen ja tasojen ero jo muuttujien merkinnöistä. Virtamuuttujat viittaavat aina johonkin aikaväliin, kun taas tasomuuttujat johonkin ajankohtaan.

#### 2.4.4. Apuyhtälöt, taulukoidut muuttujat ja systeemin graafinen esitys

Virtayhtälöt on usein syytä jakaa useammiksi erillisiksi yhtälöiksi, joiden yhdistelmä sitten on varsinainen virtayhtälö. Tämä ei mitenkään muuta mallin perusrakennetta, eli sitä, että tasot ja virrat vuorottelevat systeemissä. Koska apuyhtälöt on tarkoitettu helpottamaan ja selventämään virtayhtälöiden laskemista, on niiden arvot aina laskettava edellisen ajankohdan tasoyhtälöiden jälkeen ennen virtoja, joiden osia ne ovat.

Toisin kuin tasot ja virrat, apuyhtälöt voivat riippua muista apuyhtälöistä, jolloin myös niiden laskemisjärjestys on määrätty. Apuyhtälöissä on samanlainen ajankohtamerkintä kuin tasoissakin, mutta ne eivät voi koskaan olla tasoyhtälön muodossa.

Esimerkkinä on alla esitetty erään virtamuuttujan laskemisessa tarvittavat apuyhtälöt ja vakiot:

$$R1.KL = \frac{1}{VAK1} (APU1.K - L1.K) \quad (5)$$

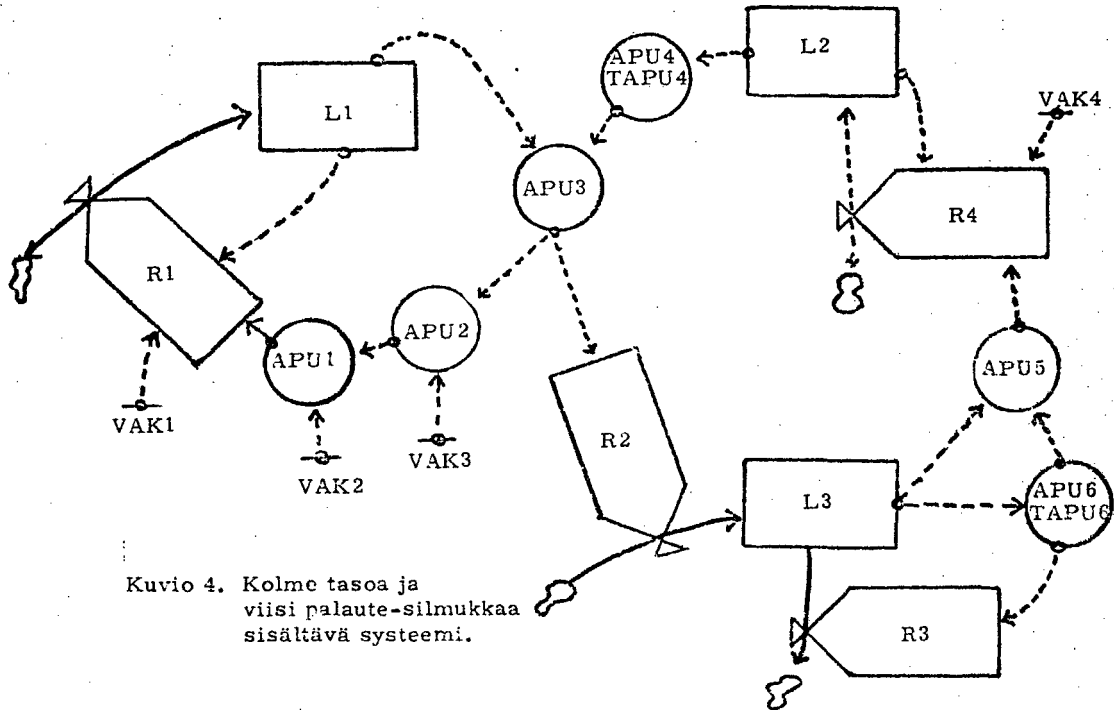
$$APU1.K = APU2.K/VAK2 \quad (6)$$

$$APU2.K = (APU3.K) (VAK3) \quad (7)$$

$$APU3.K = (L1.K) (APU4.K) \quad (8)$$

$$APU4.K = TABLE (TAPU4, L2.K, 0, 6, .5) \quad (9)$$

Kuviossa 4. on esitetty systeemi, josta tämä yhtälöryhmä on osa.



Kuvio 4. Kolme tasoa ja viisi palaute-silmukkaa sisältävä systeemi.

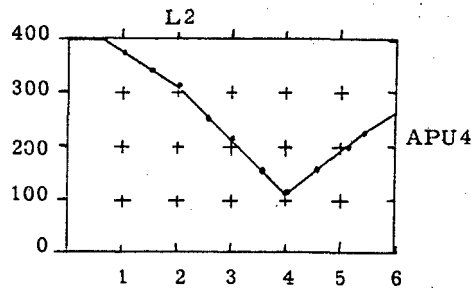
Kuviossa 4. esitetty systeemi on sama, joka on esitetty "Principles of Systems":in sivuilla 2-21 - 2-39. Tässä ei systeemille ole kuitenkaan annettu mitään erityistä sisältöä, ja niinpä tässä esitetyt symbolit poikkeavat Forresterin käyttämistä. Nähdäkseni systeemin esittäminen kuvion 4. tavalla on seivempi, koska siinä voidaan heti erottaa millainen muuttuja on kyseessä, ja lisäksi yhtälöitä muuntelemalla voidaan malli saada kuvaamaan monia eri asioita.

Apumuuttujista käytetään symbolia  $\bigcirc$ , ja vakioista symbolia  $\ominus$ . Yhtälöistä (5.) - (7.) huomataan, että vakioihin ei tule mitään ajan indikaattoria, sillä nehan ovat muuttumattomia koko simuloinnin ajan.

Lähdettäessä laskemaan virtaa R1 aikavälille KL on tasojen L1.K, L2.K ja L3.K, sekä vakioiden VAK1, VAK2, VAK3 ja VAK4 arvot jo oltava laskettuna. Tämän jälkeen aloitetaan virran R1.K1 laskeminen yhtälöstä (9.), josta saadaan apumuuttujan APU4 arvo ajankohdalle K.

Yhtälöstä (9.) tapaamme erään systeemidynamiikassa paljon käytetyn muuttujan arvon määrittelykeinoon, nimittäin taulukosta määrättävän muuttujan. Kuviossa 5. on esitetty, millainen tämä taulukko voisi esimerkiksi olla.

Taulukoituun muuttujaan saadaan tehdä mielivaltaisia muuttujien suhteiden muutoksia, ja siten taulukolla voidaan ottaa huomioon millaiset tahansa epälinearisuudet.



Kuvio 5. APU4:n laskemista varten tarvittava taulukko.

Yhtälön (9.) oikealla puolella on symboli "TABLE", josta tietokone osaa ryhtyä laskemaan muuttujan arvoa taulukosta. Suluissa on ensin esitetty muuttuja, jonka arvoa taulukosta etsitään. Tämän muuttujan identifioimiseksi on sen alkuun lisätty kirjain T. Seuraavana on mainittu muuttuja, josta tämän taulukoidun muuttujan arvo riippuu. Tämän jälkeen on esitetty kolme numeroa, joista ensimmäinen osoittaa muuttujan L2 asteikon alkua, ja toinen numero L2:n asteikon loppua. Kolmas numero osoittaa sitä, kuinka tihein välein muuttujan APU4 arvo on määriteltä taulukossa. .5 tarkoittaa siis sitä, että APU4 on määriteltä L2:n asteikossa 0.5 yksikön välein. Täydellisemmin esitettynä käytetään tietokonetta varten seuraavaa merkintää:

$$\begin{aligned} \text{APU4.K} &= \text{TABLE}(\text{TAPU4}, \text{L2.K}, 0, 6, .5) & (9.) \\ \text{TAPU4} &= 400/400/380/350/320/260/200/140/120/140/180/240/250 & (10) \end{aligned}$$

Kun L2:n arvo on taulukossa määriteltujen arvojen välillä, suorittaa tietokone automaattisesti lineaarisen interpoloinnin, jolloin siis riippuvan muuttujan on oletettu kulkevan lineaarisesti määritelmäpisteiden välillä. Tästä lineaarisuusoletuksesta ei ole haittaa, jos riippuva muuttuja on määriteltä kyllin tihein välein.

Taulukointi on siis erittäin sopiva keino ilmaista muuttujien välisiä riippuvuussuhteita. Taulukointia varten voidaan systeemidynamiikan simulointikielessä, DYNAMO:ssa, käyttää myös funktioita TABLH, joka eroaa TABLE:sta siinä, että se sallii riippumattoman muuttujan liikkua myös määrittelyssä esitetyn asteikon ulkopuolella. Tällöin tietokone valitsee riippuvan muuttujan arvoksi aina saman kuin ensimmäiseksi määritetty arvo, jos riippumattoman muuttujan arvo on pienempi kuin sille määritellyn vaihteluvälin alaraja. Vastaavasti, jos riippumattoman muuttujan arvo on suurempi kuin sen vaihteluvälissä määriteltä suurin arvo, valitsee kone riippuvan muuttujan arvoksi aina riippumattoman muuttujan vaihteluvälin ylärajalla voimassa olevan arvon.

Palatkaamme nyt virran R1 laskemiseen. Kun yhtälö (9.) on laskettu, voidaan laskea (8), (7), (6) ja (5) nimenomaan tässä esitetyssä järjestyksessä.

Yhtälössä (11.) on esitetty, miten R1 voitaisiin laskea vain yhden yhtälön avulla.



$$R1.KL = \frac{1}{VAK1} \left( \left( \left( \left( L1.K \right) \text{TABLE} \left( \text{TAPU4}, L2.K, 0, 6, .5 \right) \right) \right) \right) \\ \left( VAK3 \right) / VAK2 - L1.K \quad (11.)$$

Itse asiassa kone laskee R1.KL:n arvon myös yhtälön (11.) esittämässä muodossa, koska se on tietenkin ekvivalentti yhtälöryhmän (5.)-(9.) kanssa. Yhtälön (11.) havainnollisuuden laita on kuitenkin "vähän niin ja näin". Se kuitenkin osoittaa selvästi, että apumuuttujat ovat vain virtamuuttujien selvennyksiä. Ennen kaikkea siitä huomataan, että virtamuuttujan arvo tosiaankin riippuu vain tasoista ja vakioista.

Simulointia ei voida suorittaa, ennenkuin tasolle on annettu alkuarvot ja vakioiden arvot määrätty. Kuviossa 3. esitetyn systeemin tasolle voidaan määrittellä esimerkiksi seuraavat alkuarvot:

$$\begin{aligned} L1 &= 10.0 & (12.) \\ L2 &= 2.00 & (13.) \\ L3 &= 8000. & (14.) \end{aligned}$$

Tasomuuttujan nimi ilman ajankohdan osoitinta siis merkitsee alkuarvoa. Vakioiden arvot ilmaistaan samassa muodossa. Kuvion 4. vakioille voidaan antaa esimerkiksi seuraavat arvot:

$$\begin{aligned} VAK1 &= 20.00 & (15.) \\ VAK2 &= 2000. & (16.) \\ VAK3 &= 10.00 & (17.) \\ VAK4 &= 6.00 & (18.) \end{aligned}$$

#### 2.4.5. Esimerkki systeemin esittämisestä yhtälöiden avulla

Esitän tässä vielä koko kuvion 4. systeemin yhtälömuotoisen esityksen. Siitä saadaan seuraava yhtälöryhmä.


$$\begin{aligned} L1.K &= L1.J + (DT) (R1.JK) & (19.) \\ L2.K &= L2.J + (DT) (R4.JK) & (20.) \\ L3.K &= L3.J + (DT) (R2.JK - R3.JK) & (21.) \\ R1.KL &= \frac{1}{VAK1} (APU1.K - L1.K) & (5.) \\ R2.KL &= APU3.K & (22.) \\ R3.KL &= APU6.K & (23.) \\ R4.KL &= \frac{1}{VAK4} (APU5.K - L2.K) & (24.) \\ APU1.K &= APU2.K / VAK2 & (6.) \\ APU2.K &= (APU3.K) (VAK3) & (7.) \\ APU3.L &= (L1.K) (APU4.K) & (8.) \\ APU4.K &= \text{TABLE} (\text{TAPU4}, L2.K, 0, 6, .5) & (9.) \\ \text{TAPU4} &= 400/400/380/350/320/260/200/140/ \\ & \quad 120/140/180/240/250 & (10.) \\ APU5.K &= L3.K / APU6.K & (25.) \\ APU6.K &= \text{TABLE} (\text{TAPU6}, L3.K, 0, 100, 10) & (26.) \\ \text{TAPU6} &= 0/5000/10000/13500/16050/17500/ \\ & \quad 185000/19000/19500/19900/20000 & (27.) \end{aligned}$$

L1 = 10.0	(12.)
L2 = 2.00	(13.)
L3 = 8000	(14.)
VAK1 = 20.00	(15.)
VAK2 = 2000	(16.)
VAK3 = 10.00	(17.)
VAK4 = 6.00	(18.)

Tässä on esitetty kaikki tiedot, mitä tietokone tarvitsee kuvion 4. mallin simuloimiseksi, lukuunottamatta käytettyjä yksiköitä. Ajankohdan K arvojen laskemiseksi meillä on siis käytettävissämme tasojen arvot ajankohtana J, virtojen arvot aikavälillä JK, sekä alkuehdot tasolle ja vakioiden arvot. Huomattakoon, että tässä esitetty malli poikkeaa "Principles of Systems":in sivuilla 2-21-2-39 esitetystä mallista taulukoiden osalta. Tämä merkitsee sitä, että simuloitaessa tämä malli tuottaisi luultavasti hieman erilaisen tuloksen kuin Forresterin esittämä.

## 2.5. Informaatiolinkit

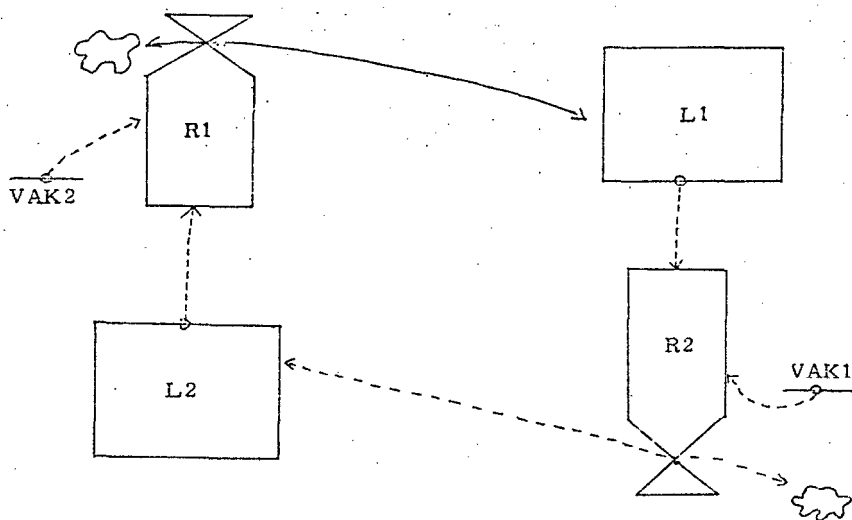
Tähän mennessä esitetyissä systeemikaavioissa on katkoviivojen sanottu merkitsevän informaatiolinkkejä. Nämä informaatiolinkit poikkeavat luonteeltaan täysin tasoista ja niiden välisistä fyysisistä virroista.

Tasomuuttujien sisältöä voivat muuttaa vain virrat, jotka joko kuljettavat tasojen sisältöä tasolta toiselle tai sitten kuljettavat tätä sisältöä mallissa ehtymättömiksi oletetuista lähteistä tasoihin tai tasoista lähteisiin. Näitä lähteitä merkitään kuviossa symbolilla . Tason ja lähteen välisen nuolen suunnasta selviää, kuljettaako virta "ainetta" lähteestä tasoon vai tasosta lähteeseen vai molemminpuolin.

Virtamuuttujien arvot taas määräytyvät tasoista tulevien informaatiolinkkien avulla. Tasosta lähtevä informaatiolinkki ei siis muuta itse tason arvoa, vaan sen tekee konkreettinen (tai jos itse tasokin on informaatiota, abstraktinen) virta. Tasosta saatava informaatio siis määrää sen, millaisiksi tulevat muodostumaan tason arvoon tämän jälkeen vaikuttavat virrat.

Koska systeemin apuyhtälöt ovat vain virtayhtälöiden osia, on niiden aina sijaittava informaatiolinkkien välissä.

Tasomuuttuja voi olla muodostunut myös puhtaasti informaatiosta. Tällainen taso voidaan muodostaa esimerkiksi silloin, kun halutaan havaitun tason poikkeavan todellisesta tasosta havaintoviiveen vuoksi. Tällainen systeemi on esitetty kuviossa 6.



Kuvio 6. Yhden konkreettisen tason ja yhden informaatiotason sisältävä systeemi.

Tässä systeemissä on VAK1 merkitsemässä havaintoviivettä. Virran R1 arvo ei muutu siis suoraan tiedolla arvosta L1, vaan se riippuu havaitusta tason arvosta L2 sekä tavoitteesta VAK2.

Informaatiotasoihin nähden pitävät paikkansa samat säännöt kuin konkreettisiinkin tasoihin nähden. Toisin sanoen vain virtamuuttuja voi muuttaa tason arvoa, ja toisaalta virtamuuttujan arvoon vaikuttaa vain informaatio tasojen arvosta sekä mahdolliset vakiot.

Kuvio 6. on oikeastaan vain tarkennettu esitys kuvioista 2., jossa esitettiin palautesilmukan perusrakenne. Jos nimittäin oletetaan, että havaintoviivettä ei ole ja että havaittu systeemin tila on muutenkin sama kuin todellinen systeemin tila, päädytään kuvioon, jossa on vain taso, sitä muuttuva virta, virtaan tasosta vaikuttava informaatiolinkki ja mahdolliset vakiot.

Kuviossa 4. on taso L2 myöskin informaatiotaso. Forresterin alkuperäisessä mallissa se merkitsee havaittua viivettä, joka taas vaikutti sekä virtaan R1 että virtaan R2.

Sen lisäksi, että ainoastaan informaatio pystyy muuttamaan virtoja, on sillä myös toinen erittäin tärkeä tehtävä systeemimalleissa. Ainoastaan informaatio voi nimittäin yhdistää eri yksiköissä mitattavia systeemin eri osia.

Kuvion 4. systeemiä pitää täydentää määrittelemällä siinä käytettävät mittayksiköt. Tasoa L1 voidaan mitata esim. myyntimiehinä kuten Forresterillakin, siis ihmisinä. Tällöin virta R1 mittaa myyntimiesten määrän muutosta aikayksikköä kohden. Taso L3 voidaan määritellä tuotannoksi, eli siinä mitataan hyödykkeitä, ja virroissa R2 ja R3 siis hyödykkeitä aikayksikköä kohden.

Informaatiotasolla L2 voimme, kuten jo todettiin, mitata hyödykkeiden toimituksessa asiakkaiden havaitsemaa viivettä, ja virralla R4 siis tässä viiveessä tietyn ajanjakson aikana tapahtunutta muutosta.

Seuraavassa taulukossa on esitetty kuvion 4. systeemiä kuvattaessa käytettävät yksiköt.

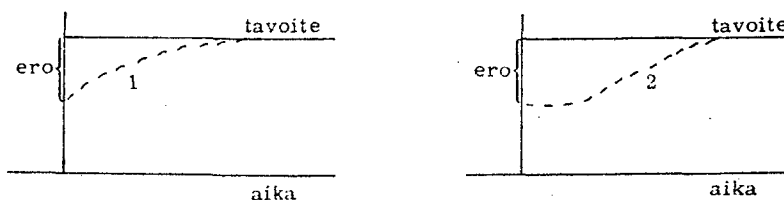
Yhtälö	(19.)	myyntimiehiä
"	(20.)	viikkoja
"	(21.)	hyödykkeitä
"	(5.)	myyntimiehiä/viikko
"	(22.)	hyödykkeitä/viikko
"	(23.)	hyödykkeitä/viikko
"	(24.)	viikkoja/viikko
"	(6.)	myyntimiehiä
"	(7.)	markkoja/viikko
"	(8.)	hyödykkeitä/viikko
"	(9.)	hyödykkeitä/myyntimiesviikko
"	(25.)	viikkoja
"	(26.)	hyödykkeitä/viikko
"	(12.)	myyntimiehiä
"	(13.)	viikkoja
"	(14.)	hyödykkeitä
"	(15.)	viikkoja
"	(16.)	markkoja/myyntimiesviikko
"	(17.)	markkoja/hyödyke
"	(18.)	viikkoja

Informaatiolinkeissä - jos ne on oikein muotoiltu - muuntuvat siis systeemin eri osista tulevat tiedot nimenomaan kyseistä virtaa laskettaessa tarvittaviksi yksiköiksi.

## 2.6. Viiveet

Kuvion 4. systeemissä on myöskin viiveitä. Yhtälöiden (25.) ja (24.) avulla luotiin systeemiin ns. ensimmäisen asteen (eksponentiaalinen) viive, samoin kuin myös yhtäaikaista (6.) ja (7.). Nämä viiveet syntyivät siten, että virtamuuttujalla ei haluttu tai pystytty poistamaan eroa havaitun tilan ja tavoitteen välillä yhdellä kerralla, vaan yhtälössä (5.) poistettiin heti kuudesosa havaitusta erosta, ja yhtälössä (24.) vain kahdeskymmenesosa havaitusta erosta.

Kuviossa 7. on esitetty, miten ensimmäisen ja kolmannen asteen viiveet toimivat.



Kuvio 7. Ensimmäisen asteen (1) ja kolmannen asteen viive(2).

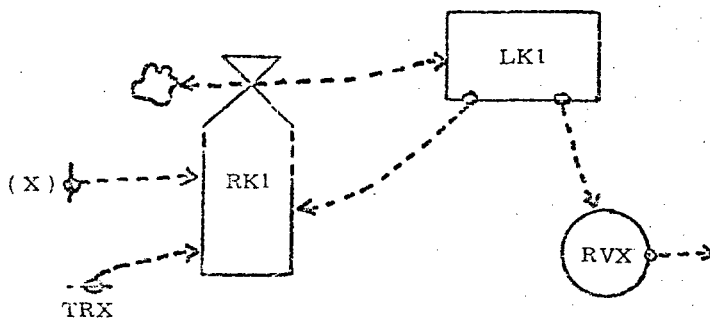
Ensimmäisen asteen viive poistaa siis jokaisella aikavälillä määrätyn osan havaitusta erosta tavoitteen ja todellisen tilan välillä. Mikäli tämän jälkeen ei enää syntyisi

uusia eroja, poistaisi ensimmäisen asteen viive havaitun eron kuviossa esitetyllä tavalla.

Kolmannen asteen viive taas ei heti eron synnyttyä reagoi siihen kovinkaan paljon, vaan varsinainen eron korjaus tapahtuu vasta jonkin aikaa havaitsemisen jälkeen.

Systeemidynamiikassa on tietenkin myös mahdollista käyttää normaaleja diskreettejä viiveitä, jolloin koko ero korjataan kerralla mutta viivästettynä eron syntymisestä. Tällaisten viiveiden käyttökelpoisuus ei kuitenkaan ole kovin hyvä.

DYNAMO-kielessä voidaan ensimmäisen asteen viive muodostaa myös erityisellä funktiolla DLINF1. Kuviossa 8. on esitetty tämän funktion toimintatapa.



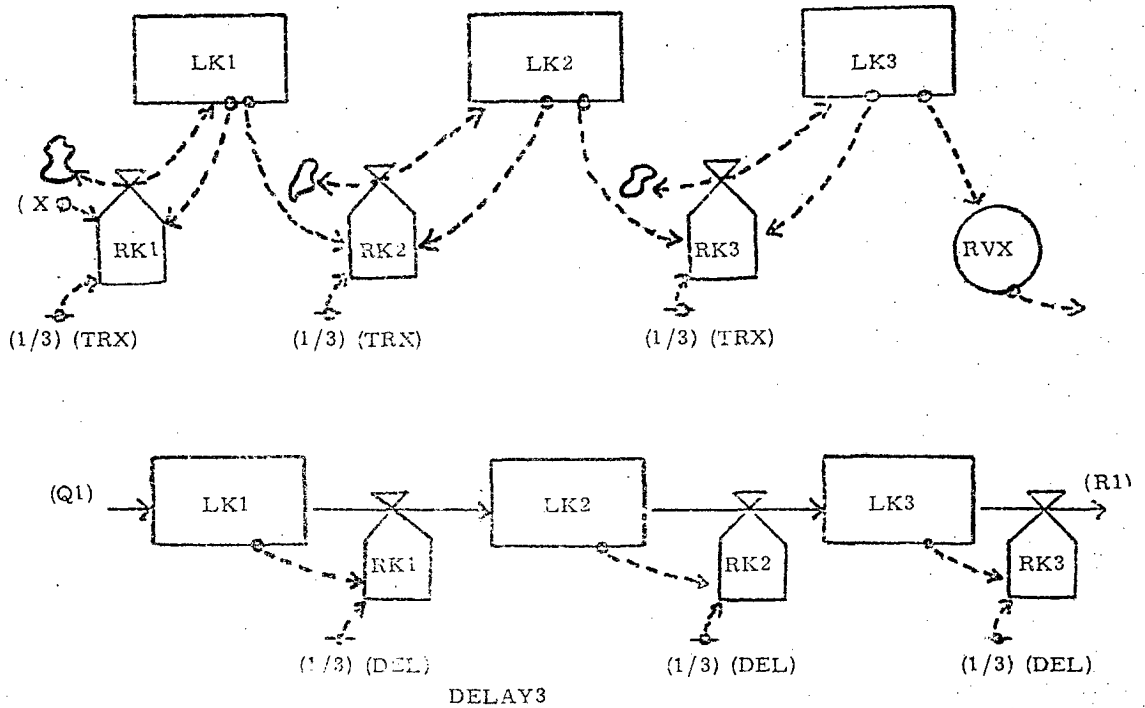
Kuvio 8. DLINF1 funktion toimintatapa.

Tällä funktiolla muodostetaan siis keinotekoinen taso LK1 ja sille keinotekoinen virta RK1. DLINF on aina asetettava informaatiolinkkiin. Muuttuja X (taso tai apumuuttuja) otetaan inputtina virtaan RK1, johon myös vaikuttaa LK1:n arvo edellisellä ajankohtana, sekä muuttujan X havaitsemiseksi tarvittava aika TRX. Yhtälön muodossa DLINF toimii seuraavasti:

$$\begin{aligned} LK1.K &= LK1.J + (DT) (RK1.JK) \\ RK1.KL &= (X.K - LK1.K) / TRX \\ RVX.K &= LK1.K \\ LK1 &= X \end{aligned}$$

DLINF funktio antaa siis tulokseksi muuttujan RVX, jota voidaan pitää esimerkiksi muuttujan X havaittuna arvona.

Kolmannen asteen viive voidaan DYNAMO-kielessä luoda funktioilla DLINF3 tai DELAY3. Nämä funktiot eroavat toisistaan siinä, että DLINF3 asetetaan informaatiolinkkiin, mutta DELAY3 konkreettiseen virtaan. Näiden funktioiden toimintaa kuvaa kuvio 9.



Kuvio 9. Funktioiden DLINF3 ja DELAY3 toiminta.

Nämä molemmat funktiot ovat siis muodostuneet kolmesta keinotekoisesta tasomuuttujasta ja niiden virtamuuttujista. DLINF3 toimii yhtälömuodossa seuraavasti:

$$\begin{aligned}
 LK1.K &= LK1.J + (DT) (RK1.JK) \\
 LK2.K &= LK2.J + (DT) (RK2.JK) \\
 LK3.K &= LK3.J + (DT) (RK3.JK) \\
 RK1.KL &= (X.K - LK1.K) (TRX/3) \\
 RK2.KL &= (LK1.K - LK2.K) (TRX/3) \\
 RK3.KL &= (LK2.K - LK3.K) (TRX/3) \\
 RVX.K &= LK3.K \\
 LK1 &= LK2 = LK3 = X(TRX/3)
 \end{aligned}$$

DELAY3 toimii yhtälömuodossa seuraavasti:

$$\begin{aligned}
 LK1.K &= LK1.J + (DT) (Q1.JK - RK1.JK) \\
 LK2.K &= LK2.J + (DT) (RK1.JK - RK2.JK) \\
 LK3.K &= LK3.J + (DT) (RK2.JK - RK3.JK) \\
 RK1.KL &= LK1.K / (DEL/3) \\
 RK2.KL &= LK2.K / (DEL/3) \\
 RK3.KL &= LK3.K / (DEL/3) \\
 LK1 &= LK2 = LK3 = (Q1) (DEL/3)
 \end{aligned}$$

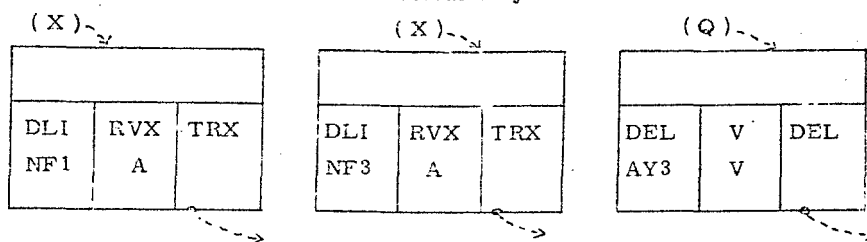
Nämä kaikki tässä esitetyt viiveet voidaan sijoittaa yhtälömuotoon myös yksinkertaisemmin seuraavasti:

$$\begin{aligned}
 DLINF1: \quad RVX.K &= DLINF1 (X.K, TRX) \\
 DLINF3: \quad RVX.K &= DLINF3 (X.K, TRX) \\
 DELAY3: \quad V1.KL &= DELAY3 (Q1.JK, DEL)
 \end{aligned}$$

Tästä muodosta tietokone luo itse nämä tarkemmat yhtälöryhmät. Jos esitetyjä funktioita ei haluta käyttää, voidaan malliin sijoittaa juuri edellä pitemmässä esitysmuodossa nähtyjä muuttujia, jotka tekevät systeemiin viiveitä.

Mainittakoon vielä, että diskreetti viive saadaan malliin sijoittamalla siihen tarpeellinen määrä tyhjiä tasoja virtoineen, ja liikuttamalla tähän viiveeseen tullutta muuttujaa aina kokonaisuudessaan tasosta toiseen määrättyllä aikavälillä.

Systeemikaavioon nämä viivefunktiot voidaan sijoittaa kuvion 10. esittämässä muodossa.



Kuvio 10. Funktioiden DLINF1, DLINF3 ja DELAY3 lohkokaaavioesitykset.

## 2.7. Satunnaistekijät ja eräitä funktioita

Satunnaistekijöitä voidaan DYNAMO-kielessä luoda funktiolla NOISE ja NORMRN.

NOISE generoi satunnaislukuja, jotka ovat tasaisesti jakautuneet välille (-0.5, 0.5). Sopivilla kertoimilla tätä väliä voidaan lisätä.

NORMRN generoi satunnaislukuja, jotka ovat normaalisti jakautuneita määrättyllä keskiarvolla ja hajonnalla. Keskiarvo ja hajonta päätetään mallia rakennettaessa.

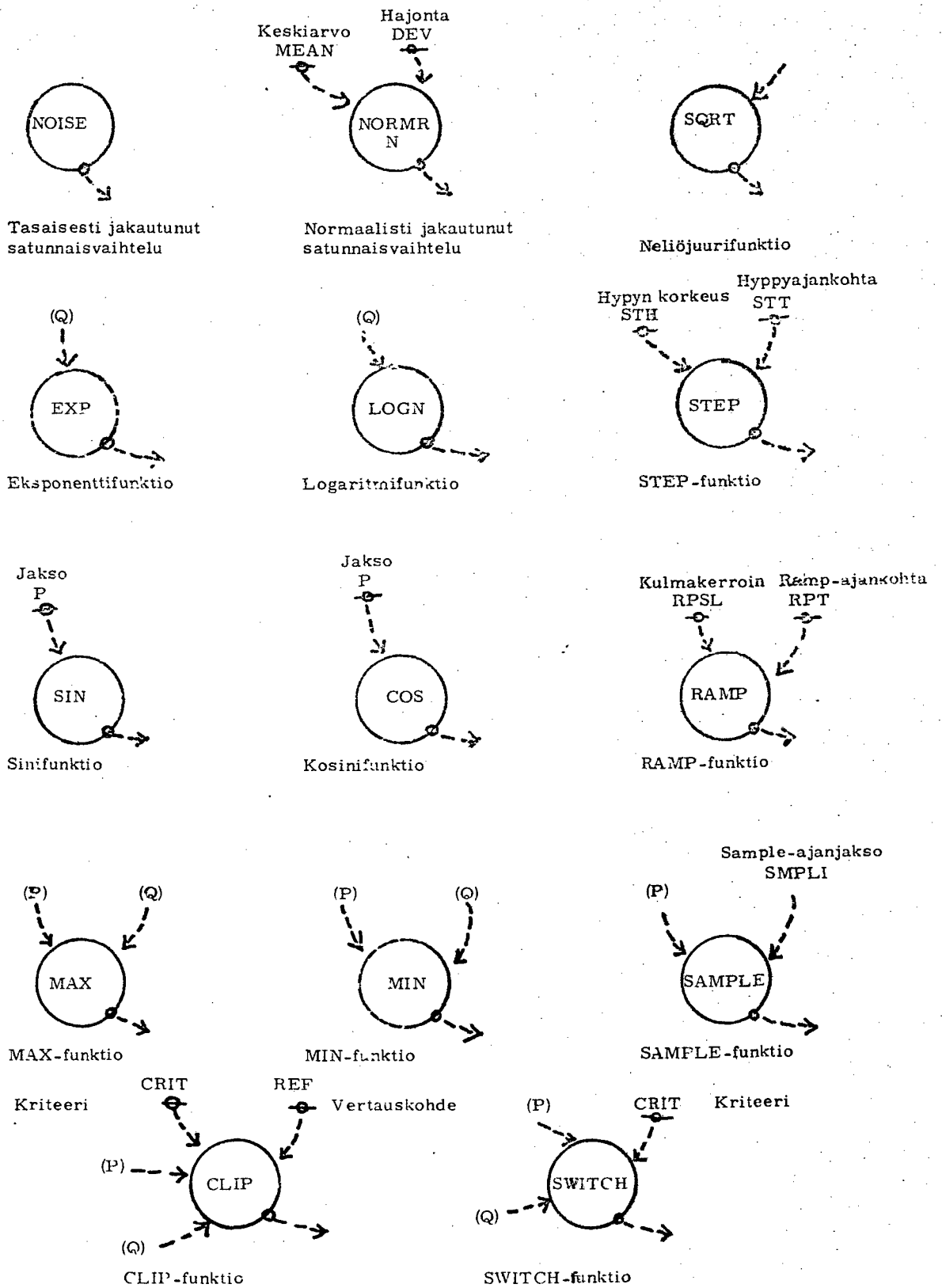
Yhtälömuotoon nämä funktiot sijoitetaan muodossa

```
NOISE ()  
NORMRN (MEAN,DEV),
```

jossa tyhjä sulut NOISE;n jälkeen merkitsevät sitä, että kyseessä on funktio eikä muuttujan nimi. MEAN ja DEV NORMRN:in määrittäjinä tarkoittavat tietenkin keskiarvoa ja hajontaa. Systeemikaavioissa käytettävät merkinnät on esitetty kuviossa 11.

Systeemiin voidaan sijoittaa myös neliöjuurifunktioita, eksponenttifunktioita, logaritmifunktioita ja trigonometrisiä funktioita. STEP-funktiolla suoritetaan määrättyinä ajankohtana määrätyn korkuinen hyppäys. RAMP-funktio tuottaa määrätystä ajankohdasta alkaen muuttujan, jonka kulmakerroin on vakio. Nämä määreet sijoitetaan funktioon parametreiksi.

Loogisina funktioina voidaan käyttää funktioita MAX, MIN, SAMPLE, CLIP ja SWITCH. MAX valitsee kahdesta inputista suuremman ja MIN pienemmän. SAMPLE ottaa inputin P aina määrätyn aikavälin kuluttua ja pitää sen vakiona aikavälin aikana. CLIP



Kuvio 11. Eräiden funktioiden lohkokaaevioesitykset.



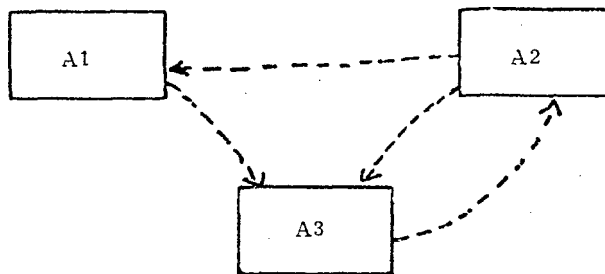
valitsee kahden inputin välillä sen perusteella, onko jokin muualta annettu kriteeri suurempi kuin sen vertailukohde. SWITCH taas tekee valinnan sen perusteella, onko jokin kriteeri nolasta poikkeava.

Näitä funktioita ei tässä selosteta lähemmin, koska ne kuuluvat paremmin itse ohjelmointikieleen kuin systeemimalliin. Kuviossa 11. on kuitenkin esitetty, missä muodossa nämä funktiot voidaan ottaa systeemikaavioon.

## 2.8. Systeemidynamiikka ja muu systeemiteoria

Tähän mennessä ei systeemidynamiikan osalta ole puhuttu mitään alkioista ja niiden välisistä relaatioista, jotka muodostivat edellisessä tutkimuksessa esitellyn systeemiteorian rungon. Systeemidynamiikka näyttää siis olevan aivan erillään yleisestä systeemiteoriasta. Tämä ei kuitenkaan pidä paikkaansa. Tässä kappaleessa tarkastellaan juuri systeemidynamiikkaa eräänä erityisenä systeemiteorian haarana.

Systeemidynamiikka on kehittynyt käytännön tarpeesta mutkikkaiden systeemien empiiriksi tutkimiseksi. Tämän vuoksi siinä ei ole lähdetty sellaisista teoreettisista käsitteistä kuten alkio ja relaatio. Systeemidynamiikassa on alkio tulkittava tasomuuttujaksi sekä siihen vaikuttaviksi virtamuuttujiksi. Näin siis systeemidynamiikassa liikutaan tavallaan vielä alkiotakin pienemmällä tasolla. Jos esimerkiksi kuvio 4. haluttaisiin esittää yleisen systeemiteorian muodossa, näyttäisi se seuraavalta:



Kuvio 12. Muunnos kuvioista 4.

Huomattakoon, että kun virtamuuttujat yhdistetään niitä vastaaviin tasomuuttujiin, eliminoiduvat myös apuyhtälöt ja -muuttujat. Relaatioksi jää näin vain tasosta jonkin muun tason virtaan kulkeva informaatiolinkki. Kukin taso lähettää siis vain yhden outputin, mutta voi lähettää sen useammalle muulle tasolle (tai tarkemmin niiden virroille). Tämä on tietenkin aivan luonnollista, koska systeemidynamiikassa kukin taso mittaa vain yhtä ominaisuutta ja voi siten lähettää tiedon vain siitä ominaisuudesta muihin tasoihin. Jos vielä yhdistämme useampia tasoja siten, että niiden katsotaan kuuluvan samaan alkioon, voimme tietenkin saada yhdestä alkioista lähtemään myös useampia outputteja.

Eriyisen mielenkiintoista on verrata systeemidynamiikkaa Langen systeemiteoriaan, koska nämä kaksi systeemiteorian haaraa ovat mahdollisimman kaukana toisistaan kahdessakin suhteessa. Ensinnäkin Langen lähestymistapa on synteettinen ja systeem-

midynamiikan analyttinen. Toiseksi Langen teoria on syntynyt puhtaasti teoreettisella tasolla, mutta systeemidynamiikka on kehitetty nimenomaan käytännön sovelluksia varten.

Langen toiminta-alkiolle on asetettu määrättyjä ehtoja<sup>1)</sup>. Ensinnäkin jokaiseen alkioon tulee ainakin yksi input ja siitä lähtee ainakin yksi output. Toiseksi inputtien tilat määräävät yksikäsitteisesti outputtien tilat.

Systeemidynamiikassa - jos alkio tulkitaan edellä esitetyllä tavalla - on ensimmäinen ehto tietenkin täytetty. Sen sijaan toinen ehto ei pidä paikkaansa, jos pitäydymme vain edellä esitetystä tulkinnasta. Tämä johtuu siitä, että systeemin alkiolla on myös sisäisiä kytkentöjä, ts. tasomuuttujan ja virtamuuttujan välisiä kytkentöjä, jotka eivät tietenkään tule näkyviin edellä esitetystä tulkinnasta.

Tämäkin ongelma on kuitenkin vain näennäinen. Alkion kytkentä itsensä kanssa voidaan nimittäin kiertää määrittelemällä tasosta omaan virtaansa lähtevään informaatiolinkkiin uusi informaatiotaso. Tämä on tietenkin aina mahdollista, koska taso ei voi vaikuttaa virtaan muuten kuin informaation välityksellä. Tämä uuden informaatiotason määrittely kuvastaa luontevasti sitä, että taso itse ei voi vaikuttaa virtaan vaan ainoastaan tieto tästä tasosta. Siten systeemidynamiikassa on eräässä mielessä myöskin kielletty alkion kytkentä itsensä kanssa.

Systeemiympäristöstä olemme jo puhuneet systeemidynamiikan yhteydessä. Se siis voidaan ottaa mukaan erillisenä systeemin osana, mutta spesifioimattomana puhtaan ympäristönä sitä ei voida ottaa mukaan, eikä alkio siis saa olla kytkettynä muihin, kuin systeemin omiin alkioihin. Aiemmin on jo todettu, että tämä ei aiheuta mitään vakavia rajoituksia systeemidynamiikalle, koska kaikki selvästi määriteltävissä olevat relaatiot voidaan aina ottaa huomioon.

Näin siis systeemidynamiikka on sopuoinnussa esitettyjen yleisten määritelmien kanssa. Mainittakoon vielä kerran, että systeemidynamiikassa rajoitetaan nimenomaan dynaamisiin palaute-systeemeihin. Edellisessä tutkimuksessa jo todettiin, että myöskin Langella on palautteen olemassaolo välttämätön ehto korkeamman asteisten systeemien olemassaololle, mikä edelleen vahvistaa langelaisen teorian ja systeemidynamiikan sidonnaisuutta.

Systeemidynamiikan systeemit ovat tietenkin abstraktisia. Systeemidynamiikkahan on yksi menetelmä todellisten systeemien kuvaamiseksi. Niinpä onkin mielenkiintoista tarkastella sitä, miten systeemidynamiikassa voidaan kuvata erilaisia Ackoffin luokitusten mukaisia reaalisia systeemeitä.

---

1) Lange: mt. s. 4.

On selvää, että systeemidynaamiset mallit voivat olla tilansa säilyttäviä ja tavoitteen hakeutuvia, sillä nämä ominaisuudethan kuuluvat jo systeemidynamiikan systeemien perusrakenteeseen. Monitavoitteinen voi tietenkin olla systeemidynaaminen systeemi, jossa on vähintään kaksi tasoa, joilla on erilaiset tavoitteet.

Tarkoitteiseksi saadaan systeemi yksinkertaisesti siten, että eri tavoitteille määritellään vaadittava yhteinen piirre. Tämä voi olla esimerkiksi yrityssysteemin tavoite voiton maksimoimiseen, jonka perusteella systeemin kaikkien tasojen tavoitteet määräytyvät.

Tahdonvaraisessa systeemissä voitiin vapaasti valita sekä tavoitteet että keinot. Tavoite voidaan systeemidynamiikassa tietenkin valita joidenkin kriteerien mukaan esimerkiksi loogisilla operaatioilla. Sama koskee tietenkin myös keinoja. Jos vielä halutaan luopua ehdottomasta rationaalises'ta käyttäytymisestä, jossa tavoite ja keino valitaan aina määrättyjen kriteerien mukaan "oikein", voidaan malliin ottaa mukaan satunnaistekijöitä, jotka voivat johtaa "väärään" valintaan.

Päämäärähakuisesti voidaan malli tehdä loogisten operaatioiden avulla, jotka muuttavat tavoitetta aina lähemmäs päämäärää, kun jokin välitavoite on saavutettu.

Näin siis systeemidynamiikassa voidaan kuvata kaikkein korkeimman tasoisten sistemien toimintaa. Reaalisten sistemien kaikkien piirteiden mukaan ottaminen ei tietenkään ole millään mallilla mahdollista, eikä se ole myöskään tarpeellista. Liian monien vähäpätöisten piirteiden mukaan ottaminen vain hämärtäisi systeemin todellista toimintaa ja tekisi mallista liian monimutkaisen. Korostettakoon vielä, että mikään malli ei voi olla parempi kuin se teoria, joka on mallin perustana. Täten teorian vajavaisuudet nimenomaan sosiaalitieteissä rajoittavat myöskin systeemidynamiikan tapaisien menetelmien käyttökelpoisuutta.

Myös systeemidynamiikassa voidaan transformaatio esittää joko differenssimuodossa tai integraalimuodossa. Differenssimuodossa tarkastellaan inputtien ja outputtien muutoksia edelliseen ajankohtaan verrattuna, kun taas integraalimuodossa tarkastellaan alkioiden absoluuttisia tiloja määrättyinä ajankohdina. Differenssitieto on systeemidynamiikassa nimenomaan virtamuuttujien arvo määrättyllä aikavälillä, kun taas tasomuuttujan arvo on integraalimuotoinen tieto. Virtamuuttujien nettovaikutus tasoihin on tietenkin laskettavissa perättäisten tason arvojen erotuksina. Siten esimerkiksi väkiluku on integraalitieto, kun taas väestönmuutos on kaikkien väkilukuun vaikuttavien virtamuuttujien nettovaikutus.

Tässä ei ole tarkoituksenmukaista viedä langelaista tarkastelua teoreettisesti pitemmälle. Jo yllä olevista vertailuista selviää, että systeemin käyttäytyminen määrättyy Langella ja Forresterilla täysin samalla tavalla. Tämä tarkoittaa sitä, että systeemin käyttäytyminen ei riipu pelkästään eri osien käyttäytymisistä, vaan myöskin

näiden osien välisistä relaatioista. Selvemmin tämä voidaan ilmaista sanomalla, että kokonaisuus ei ole pelkästään osiensa summa, eikä sen käyttäytymistä voida johtaa pelkästään yksityisten osien käyttäytymisistä.



### 3. MAAILMAN MALLI

#### 3.1. Yleistä systeemidynamiikan sovellutusalueista

Systeemidynamiikka on alun perin kehitetty liikkeenjohdon suunnitteluvälineeksi, ja siitä käytettiin tällöin nimitystä talousdynamiikka. Talousdynamiikan malleilla havaittiin, että yrityksessä havaitut ongelmat johtuivat usein yrityksen sisäisen toiminnan virheellisyydestä eivätkä niinkään ulkoisista olosuhteista.<sup>1)</sup>

Tässä en lähemmin puutu talousdynamiikkaan ja sen sovellutuksiin. Talousdynamiikasta on Forrester kirjoittanut kirjan "Industrial Dynamics"<sup>2)</sup>. Talousdynamiikasta on valmistunut myös ainakin yksi laudaturtyö,<sup>3)</sup> ja siitä on Kauppakorkeakoululla pidetty erikoiskurssi.<sup>4)</sup>

Talousdynamiikan metodologiaa kehitettäessä havaittiin sen sopivan apuvälineeksi myös muihin kuin liikeyritysten ongelmiin. Ensimmäinen laajamittainen sovellutus yrityssysteemien ulkopuolelle oli systeemidynamiikan käyttö kaupungistumisprosessin kuvaajana. Tällä mallilla vedettiin myös se systeemidynamiikassa yleinen johtopäätös, että pyrittäessä korjaamaan jotakin havaittua epäkohtaa aiheutetaan usein pahempia paineita systeemin jossain toisessa osassa<sup>5)</sup>. Kaupunkidynamiikkaa on Forrester esitellyt kirjassaan "Urban Dynamics".<sup>6)</sup>

#### 3.2. Maailman dynamiikasta yleensä

Systeemidynamiikan tähän mennessä laajakantoisin ja samalla vaikein sovellutus on ollut yhtenäisen, koko maailman tärkeimmät ongelmat huomioonottavan maailmanmallin rakentaminen. Tässä mallissa on yhdistetty väestökehitys, saastuminen, teollistuminen ja maatalous toisiinsa.

Tämän mallin rakentaminen on lähtenyt liikkeelle "Club of Rome":ksi kutsutun työryhmän parista. Tämä ryhmä on epävirallinen, monikansallinen ja epäpoliittinen. Sen jäseninä on ollut luonnontieteilijöitä, humanisteja, kansantaloustieteilijöitä, opettajia ja johtavia liikemiehiä. Systeemidynamiikka oli ainoa metodologia, jonka avulla

1) Kts. esim. Forrester J. W.: "Sosiaalisten järjestelmien intuitionvastainen käyttäytyminen", Tekniikka No. 9, 1971, s. 27.

2) Forrester J. W.: "Industrial Dynamics", The M. I. T. Press, Cambridge, Massachusetts, USA, 1961.

3) Kuisma P.: "Talousdynamiikka yrityssysteemien käyttäytymisrakenteen kuvausvälineenä", Kansantaloustieteen laudaturtutkimus, Helsingin Yliopisto, syyskuu 1967.

4) Keloharju B.: "Talousdynamiikan erikoiskurssi", Kauppakorkeakoulu, kevät 1967.

5) Forrester J. W.: "Sosiaalisten järjestelmien intuitionvastainen käyttäytyminen", s. 28.

6) Forrester J. W.: "Urban Dynamics", The M. I. T. Press, Cambridge, Massachusetts, USA, 1969.

tämä ryhmä pystyi rakentamaan yhtenäisen mallin koko maailmasta ja sen dynaamisesta käyttäytymisestä. Alustavan mallin kehitti prof. Forrester Cambridgessä Massachusettsissa heinäkuussa 1970 pidettyä työryhmän kokousta varten. Tähän malliin on tämän jälkeen tehty korjauksia ja tarkennuksia.

Mallin kuvaukseen ja sen antamien tulosten tarkasteluun on tässä annettu varsin paljon tilaa, koska juuri tämä malli paremmin kuin mikään muu valaisee systeemidynamiikan erinomaisia käyttömahdollisuuksia monimutkaisia sosiaalisia systeemejä kuvattaessa.

### 3.3. Maailman mallin yleisrakenne <sup>1)</sup>

M. I. T:n työryhmä on valinnut mallinsa perustaksi viisi tärkeää tasomuuttujaa:

- väkiluku
- pääoma
- uusiutumattomat luonnonvarat
- maaperä ja
- saastuminen.

Lisäksi nämä tasot on jaettu osiin siten, että väkiluku on jaettu 0-15 vuotiaisiin (alle hedelmällisyyksiän), 15-45 v. (hedelmällisyyksiässä) ja yli 45 v. (yli hedelmällisyyksiän). Tasot alle 15 ja 15-45v. toimivat siis myös diskreetteinä 15 ja 30 vuoden viiveinä. Täten siis määrätynä vuonna syntyneet siirtyvät 15 vuoden kuluttua tasosta alle 15v. tasoon 15-45 - tietenkin vähennettynä kunkin vuoden kuolleisuudella tässä ikälukussa. 45 vuoden kuluttua syntymävuodesta siirtyy tämä väestön osa sitten "vanhusten" luokkaan - jälleen kuolleisuudella vähennettynä. Tästä tasosta he siirtyvät aikanaan poistolähteeseen ja lakkaavat vaikuttamasta mallin tuloksiin.

Pääoma on puolestaan jaettu teollisuuspääomaan, palveluspääomaan ja maatalouspääomaan, joilla kaikilla on omat tulo- ja poistovirtansa. Teollisuuspääoman on katsottu olevan muita tärkeämmän työllisyyttä ja materiaalista eiintasoa ajatellen. Ravintotuotannossa on taas maatalouspääomalla ratkaiseva merkitys, kun taas palveluspääomaan perustuu suurelta osalta "sosiaalinen" hyvinvointi, so. koulutus, vapaa-ajanviettomahdollisuudet, terveydenhuolto- ja palvelukset yms. Huomattakoon, että palveluspääoma vaikuttaa terveydenhuollon kautta varsin voimakkaasti kuolleisuuteen.

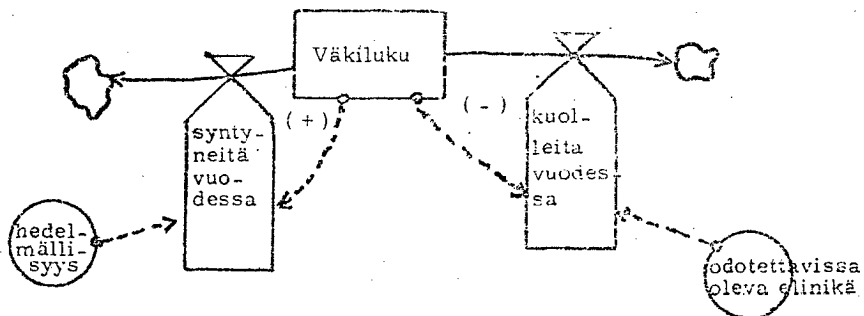
Maaperä on jaettu potentiaalisesti viljeltävissä olevaan, viljeltävissä olevaan ja kaupunki- tai teollisuuskäytössä olevaan maahan. Ravinnontuotannon kannalta on maaperä tärkein tekijä. On arvioitu, että potentiaalisesti viljeltävissä olevasta maasta olisi tällä hetkellä noin puolet viljelyksessä<sup>2)</sup>. Ravinnontuotanto-ongelmaa ei tämä kuitenkaan

1) Mallin olen esittänyt siinä muodossa kuin sitä on esitelty kirjassa Meadows, Meadows, Randers, Behrens III: "The Limits to Growth", Earth Island Ltd., Lontoo 1972.

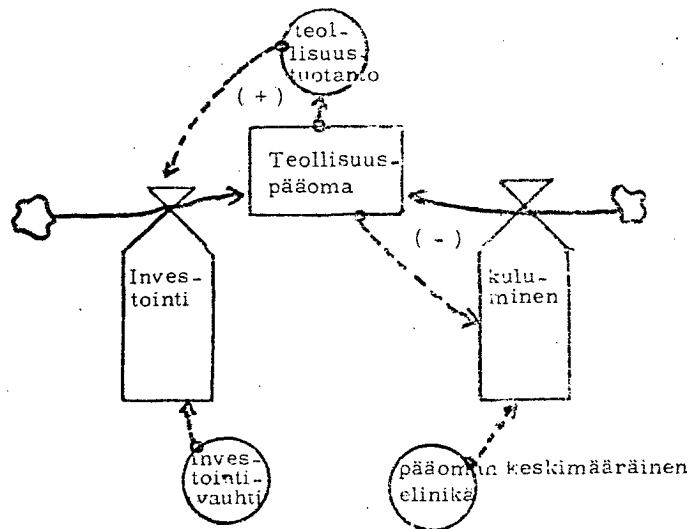
2) Presidents Science Advisory Panel on the World Food Supply, The World Food Problem, Washington D. C., 1967, 2:423.

paljakaan auta, sillä jäljellä oleva viljelykelpoinen maa vaatisi valtavia pääomakustannuksia - kuljetukseen, lannoitukseen, kasteluun yms. - ennenkuin sitä voitaisiin hyödyntää. FAO katsookin, että uusien viljelysmaiden käyttöön otto ei ole taloudellisesti missään suhteessa kannattavaa huolimatta maailman ravintopulasta<sup>1)</sup>. Lisäksi juuri kaikkein hedelmällisintä maata joutuu väestön ja teollisuuden kasvun vuoksi kiihtyvällä vauhdilla asuntojen, teiden, kaatopaikkojen yms. alle poistuen siten maatalouden käytöstä. Mallissa on oletettu jokaisen uuden ihmisen vaativan 0,08 ha asuminen yms.

Kaikkien mallin silmukoiden kuvaaminen olisi tässä sekä mahdotonta että tarpeetonta. Tyydyinkin kuvaamaan vain tärkeimmät kasvua aiheuttavat silmukat - nimittäin väkilukua ja teollistumista kuvaavat - yksinkertaistetussa muodossa, sekä esimerkin jonkin verran mutkikkaammasta palautesilmukkarakenteesta.



Väkilukua säätelevät perussilmukat



Teollistumista säätelevät perussilmukat

Kuvio 13. Väkilukua ja teollistumista kuvaavat silmukat yksinkertaistettuina.

1) mt. 2:460-69:



Kuviosta 13. näkyy pelkistettynä, että aina kun syntyneitä on vuodessa enemmän kuin kuolleita ja hedelmällisyys ja odotettavissa oleva elinikä pysyvät ennallaan, kasvaa väkiluku ja vieläpä eksponentiaalisesti (so. kasvuprosentti pysyy vakiona ja määrällinen kasvu lisääntyy vuosi vuodelta). Samanlaiset eksponentiaalista kasvua aiheuttavat silmukat nähdään teollisuuspääoman kohdalla, so., jos investoinnit ylittävät vuosi vuodelta kulumisen ja muut tekijät pysyvät ennallaan, johtaa se pääomakannan eksponentiaaliseen kasvuun. Näistä yleisperiaatteista ei pitäisi syntyä erimielisyyttä.

Tarkastelen tässä vielä esimerkin vuoksi hieman mutkikkaampaa palautesilmukkarakennetta (kuvio 14.). Maatalouspääoman, viljellyn maan ja saastumisen kohdalla ei näihin tasoihin liittyviä virtamuuttajia ole merkitty näkyviin, koska se voisi häiritä kuvion havainnollisuutta.

Kuviossa 14. on esitetty joitakin niistä kytkennöistä, joilla väkiluku ja teollistuminen on liitetty toisiinsa. Ensinnäkin osa teollisuustuotannosta on maatalouspääomaa (traktoreita, kastelulaitteita, lannoitteita jne.). Maatalouspääoma ja viljelty maa-ala vaikuttavat erittäin voimakkaasti ravinnon määrään. Ravinnon määrä henkeä kohden puolestaan vaikuttaa kuolleisuuteen. Sekä teollisuus että maatalous aiheuttavat saastumista, mikä myöskin voi vaikuttaa kuolleisuuteen joko suoraan tai sitten vähentämällä maataloustuotantoa.

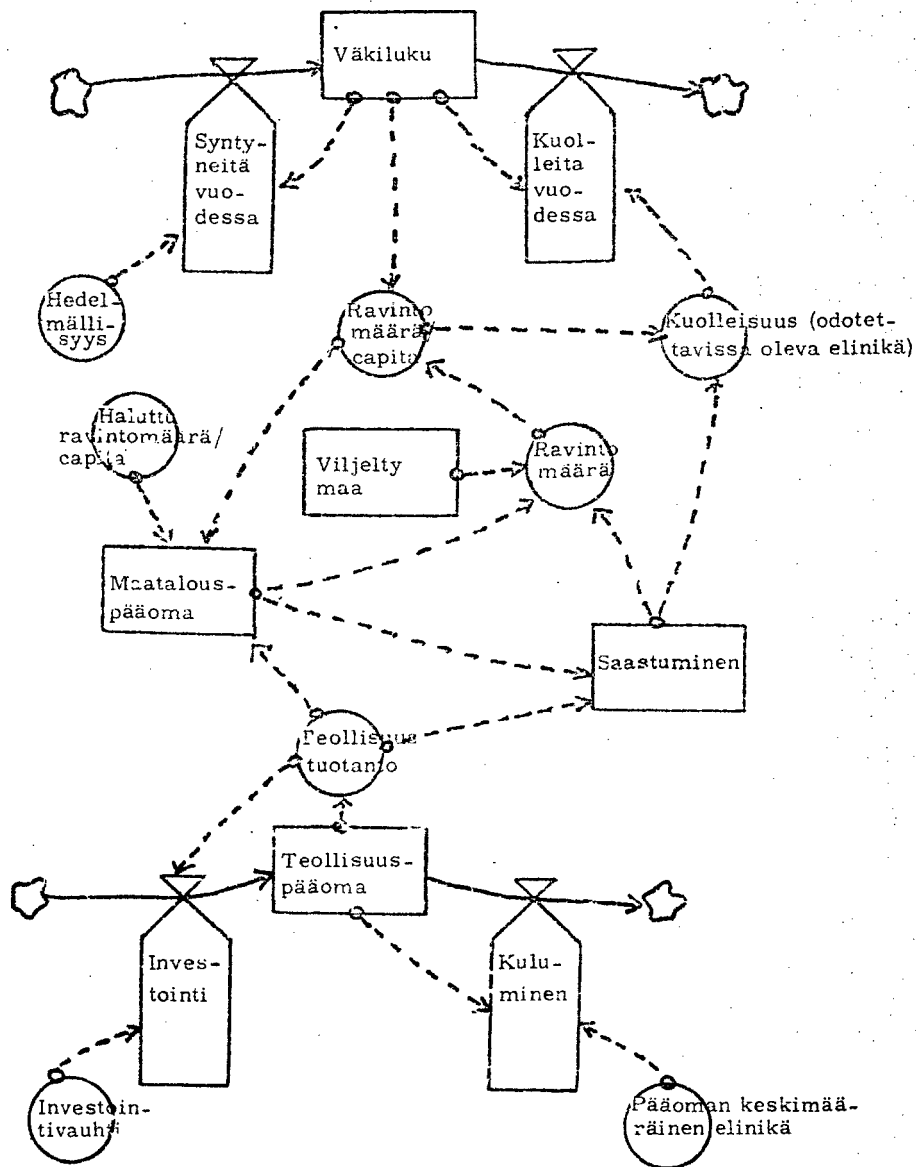
Jos esimerkiksi kaikki muu pysyisi ennallaan ja väkiluku kasvaisi, johtaisi se ravintomäärän vähenemiseen henkeä kohden ja siten kuolleisuuden kasvuun ja lopulta väkiluvun vähenemiseen. Kysymyksessä on siis negatiivinen palautesilmukka. Tätä palautetta pyrkii mallissa estämään se, että jos todellinen ravinnon määrä henkeä kohden on alempi kuin haluttu, pyritään lisäämään maatalouspääomaa ja siten lisäämään ravinnon määrää ja myös ravinnon määrää henkeä kohden.

Liitteessä on esitetty mallin kaikkien kytkentöjen kaavio, joten tässä ei liene tarkoituksenmukaista lähteä erittelemään mallin muita relaatioita.

### 3.4. Mallin perusteella tehtävissä olevista johtopäätöksistä

Kun ryhdytään tarkastelemaan mallilla saatuja tuloksia on aina muistettava, että tarkoituksena ei ole ollut saada aikaan täsmällisiä ennusteita, vaikka malli onkin rakennettu puhtaasti kvantitatiivisten olettamusten varaan. Saadut tulokset osoittavat vain systeemin yleisiä käyttäytymistapoja tehtyjen olettamusten perusteella. Ennusteen ja käyttäytymistavan ero selviää vaikkapa ajatellessamme kiven heittämistä ilmaan. Käyttäytymistapa on suunnilleen seuraava: kivi nousee ensin ylöspäin yhä pienemmällä nopeudella, pysähtyy lopulta ja alkaa pudota kohti maata yhä kasvavalla nopeudella kunnes se saavuttaa maanpinnan. Tätä käyttäytymistapaa voidaan kuvata erittäin yksinkertaisella mallilla. Jos sen sijaan haluamme saada selville kiven täsmällisen aseman tai nopeuden tietyllä hetkellä tarvitsemme runsaasti pohjatietoja, kuten heiton voimakkuuden, heittäjän tarkan sijainnin, kiven painon, painovoiman yms. Vaikka emme tietäkään näitä kaikkia tekijöitä täsmällisesti, voimme kuitenkin esittää edellä mainitun

Kuvio 14. Joitakin väestöstä ja teollistumista yhdistäviä silmukoita.



käyttätymistavan ilman suurtaakaan erehtymisen pelkoa.

Edellä esitetyn esimerkin kanssa analogisesti tarvitsisimme suunnattoman määrän tietoa ennustaaksemme tarkalleen kuinka paljon maapallolla on rautamalmia louhimattomana v. 2000. Sen sijaan voimme joitissellakin varmuudella sanoa, että mikäli rautamalmia jatkuvasti louhitaan, se ennemmin tai myöhemmin loppuu.

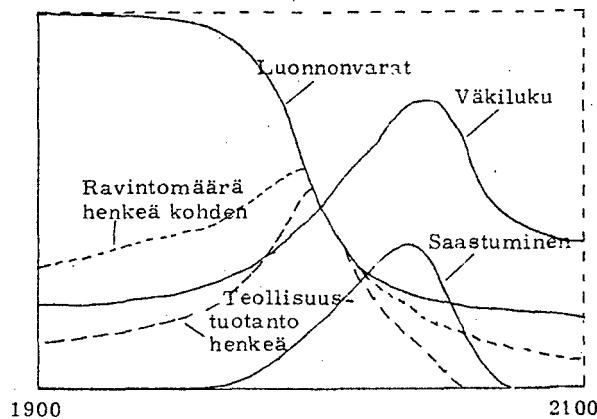
Tässä esiteltävää mallia voidaan pitää yliagregoituna ja yliyksinkertaistettuna, mutta sen avulla voidaan saada selville juuri joitakin yleisiä käyttäytymistapoja (joita tois-  
taiseksi ei ole saatu selville minkään muun mallin avulla).

Huolimatta siitä, että ei ole haluttu täsmällisiä ennusteita, on malli kuitenkin täysin kvantitatiivinen. Jokaista kaavion nuolta vastaa eksakti relaatio. Tietomme näiden relaatioiden todellisista arvoista vaihtelee lähes täydellisen tietämyksen ja lähes täydellisen tietämättömyyden välillä. Esimerkiksi monista taloudellisista relaatioista voimme olla miltei varmoja, psykososiaalisista relaatioista on melko runsaasti suhteellisen hajanaista tietoa ja lopulta monista biologisista relaatioista ei ole käytännöllisesti katsoen lainkaan tietoa. Lisäksi mallista aivan varmasti puuttuu joitakin tärkeitä relaatioita, ja siinä on myös ehkä joitakin merkityksettömiä relaatioita.

Mallin voidaan katsoa lepäävän osittain epävarmalla pohjalla. Systeemidynamiikka tarjoaa kuitenkin erinomaisen keinon tämän epävarmuuden vähentämiseksi. Jos nimittäin relaatiosta ollaan eri mieltä, voidaan jokaisen eri oletuksen mukaista relaatiota kokeilla mallissa. Äärimmäisten vastakkaisten mielipiteiden ajamisella saadaan selville mallin sensitiivisyysrajat kutakin olettamusta kohden. Näin saadaan esiin todella vaikuttavat relaatiot, joiden todellisuuspohjan tutkimukseen on jatkossa syytä keskittyä. Forresterin alustavan mallin perusteella löysi M. I. T:n tutkimusryhmä juuri ne tärkeimmät tekijät, joihin tämän ryhmän työskentely keskittyi. Todettakoon kuitenkin, että Forresterin mallissa oli erittäin vähän ja varsin ylimalkaista tosiasiatietoa relaatioiden pohjalla, ja kuitenkin hänen tuloksensa eivät poikkea Meadowsin tuloksista missään todella tärkeässä kohdassa.

Korostettakoon vielä kerran sitä, että systeemidynamiikassa voidaan ääri vaihtoehtoja kokeilemalla tutkia relaation tärkeyttä ennen kuin sitä aletaan empiirisesti tutkia.

### 3.5. Suoritettujen tietokoneajojen tulokset



Kuvio 15. Maailman mallin perusajo.

Kuviossa 15. on maailman mallin perusajon tuloksia (perusajossa on ajettu malli alkuperäisillä olettamuksilla). Kuviossa ei ole ilmaistu muuttujien mittakaavoja tai yksiköitä, koska sen tarkoituksena on vain esittää eri muuttujien yleiset käyttäytymistavat ajassa. Jokainen muuttuja saa tietenkin täsmällisen arvon jokaiselle vuodelle, mutta näiden arvojen esittäminen veisi keskustelun harhaan (kun kysyttäisiin esimerkiksi miksi väkiluku vuonna 2029 on 6.7 miljardia eikä 6.5 miljardia). Systeemin

yleinen käyttäytymistapa oli tässä ajossa se, että luonnonvarojen ehtyminen pysäyttää ensin teollisuustuotannon ja ravintotuotannon kasvun, mikä johtaa myöhemmin myös väestön kasvun pysähtymiseen. Lopputulos näyttää siis kaikin puolin epätoivottavalta.

Entä sitten jos luonnonvarat eivät ehtyisikään (kuten monet väittävät)? Tämän mahdollisuuden kokeilemiseksi tehtiin malliin olettamukset, että luonnonvarojen määrä onkin kaksinkertainen perusajoon verrattuna, sekä että esimerkiksi halvan fuusioenergian käytöllä päästään resurssien kierrättämiseen ja luonnonvaroja tarvitaankin vain 1/4 nykyisestä saman tuotannon aikaansaamiseksi. Kasvu pysähtyy tällöinkin, mutta pysäyttäjänä toimii saastuminen. Lopputulos on edellistäkin ajoa synkempi, vaikka se alussa kiihdyttää edelleen (sekä väestön että teollisuuden) kasvua.

Tämän ajon kohdalla voidaan täydellä syyllä kysyä, eikö myös saastuminen vähentyisi luonnonvarojen kierrättämisen ja ehtymättömän fuusioenergian avulla? Jos oletetaan, että saastuminen vähenee neljännekseen nykyisestäään, niin myös tämä este kasvun jatkumiselle poistuu. Tämä johtaa siihen, että saavutetaan vähitellen ravinnontuotannon ääriarajat, mikä johtaa teollisuustuotannon ja väestön kasvun pysähtymiseen ja lopulta romahtamiseen.

Perusmalliin oli jo otettu ns. vihreän vallankumouksen vaikutukset mukaan niin hyvinä kuin ne yleensä nykyisin arvioidaan (vihreä vallankumous tarkoittaa entistä satoisampien ja kestävämpien viljalajikkeiden käyttöön ottoa sekä tehostettua lannoitusta ja tuhoisten torjuntaa). Jos kuitenkin oletetaan samojen periaatteiden tuottavan entistä parempia tuloksia, ja esim. fuusioenergian avulla toteutetun synteettisen ravinnontuotannon helpottavan huomattavasti nykyistä ravinnetilannetta, astuu saastuminen jälleen kasvun rajoittajaksi ja entistäkin tuhoisammin seurauksin. Tämä johtuu siitä, että vaikka saasteita syntyykin samaa tuotantoa kohden huomattavasti nykyistä vähemmän, johtaa tuotannon eksponentiaalinen kasvu niin veltavasti nykyistä suurempaan tuotantoon, että saastuminen saavuttaa jälleen kriittisen pisteensä ja johtaa romahtukseen. Vaikka näihin oletuksiin lisätään vielä "täydellinen" syntyvyyden säännöstelykin, johtaa malli romahtukseen ennen vuotta 2100.

Tässä yhteydessä on vielä kerran korostettava, ettei mallin tuloksia ole tarkoitettu täsmällisiksi ennusteiksi. Mallin olettamukset koskevat ainoastaan fyysistä toimintaa, eikä niissä puututa niihin arvoihin, jotka ovat kunkin toiminnan takana. Ennemminkin oletetaan nykyisten arvorakennelmien pysyvän suunnilleen ennallaan lukuun ottamatta niitä muutoksia, jotka tarvitaan mallissa esitettyjen muutosten toteuttamiseen. Esimerkiksi väestön kasvun pysäyttäminen vaatisi täydellistä mullistusta ihmisten eräissä perimmäisissä arvoissa, ja syytä tähän muutokseen on vaikea kuvitella ajateltaessa nykyisten kehitysmaiden massojen asenteita lapsirajoituksiin. On lähes mahdotonta arvioida niitä arvorakenteita ja käyttäytymiskaavoja, jotka pääsisivät vallalle romahtustilanteessa. Meidän arvomaailmamme voidaan katsoa perustuvan uskoon jatkuvasta kehityksestä ja kasvusta, ja sitä voitaisiin ehkä kutsua yhteisnimityksellä "kasvuideologia" - tapahtuipa tämä kasvun ihannoiti sitten porvarillisen tai sosialistisen ideologian

puitteissa. Modernia länsimaista - teollistunutta - yhteiskuntaa voidaan hyvin verrata polkupyörään - niin kauan kuin se on liikkeellä se voi pysyä pystyssä, mutta kun liike lakkaa, niin pyörä kaantuu.

Tässä on jo useaan kertaan todettu, että tarkoituksena ei ole tehdä täsmällisiä ennusteita, vaan löytää systeemin yleisiä käyttäytymistapoja. Maailman mallin avulla on löydetty nykyisen maailmansysteemin peruskäyttäytymistapa - väestön ja teollisuuden eksponentiaalinen kasvu, joka johtaa romahdukseen.

Mallissa oli romahduksen syynä eksponentiaalinen kasvu sekä väkiluvussa että teollistumisessa. Edellä jo todettiin, että ei edes syytyvyyden lähes täydellinen säännötely - vaikka luonnonvaroja voitaisiin käyttää nykyistä huomattavasti tehokkaammin, saastumista olisi vähennetty radikaalisti ja maatalouden tuottavuutta lisätty huomattavasti - riitä estämään elintason romahtamista. Jos sen sijaan edellä esitettyjen parannusten lisäksi vielä lopetetaan teollisuuden kasvu, pysyy systeemi lähes täydellisessä tasapainossa pitkälle tulevaisuuteen - jolloin ehkä on jo pystytty tulemaan toimeen pelkästään uusiutuvien luonnonvarojen "horolla" ja uusiutumattomien luonnonvarojen kierrättäminen on saatu lähes täydelliseksi.

On ehkä vielä syytä tarkastella, miten tämä parempi vaihtoehto olisi saavutettavissa. Tätä on Erich Jantsch tarkastellut melko perusteellisesti Forresterin mallia koskevassa artikkelissaan.<sup>1)</sup>

Ensimmäinen tärkeä havainto on se, että politiikan muutoksen on tapahduttava tämän vuosisadan viimeisillä vuosikymmenillä, sillä eilemme itse opi ymmärtämään ja valitsemaan sosiaalista systeemiämme, sen sisäiset prosessit valitsevat puolestamme. Ellemme ymmärrä alkaa toimintaan nopeasti, meillä on ehkä pian käsissämme luomamme sosiaalinen ja taloudellinen systeemi, jota emme kuitenkaan pysty enää hallitsemaan.

Muutos voi Jantschin mukaan tapahtua lähinnä kolmella tavalla.

- Asenteet muuttuvat joko sosiaalisen "vaiston" tai sosiaalisen tiedostuksen kautta. Molemmat vaativat perusteellista muutosta kulttuurin lähtökohdissa. Sosiaalisen vaiston kautta tapahtuva muutos voisi esimerkiksi käydä niin, että kautta maailman "löydettäisiin" vanhat aasialaiset kulttuurit, jotka ovat paremmin sopusoinnussa dynaamisen maailmamme kanssa. Näiden kulttuurien suija olisivat mm. kehässä tapahtuva kehitys lineaarisen kehityksen sijasta, yhteistyö kilpailun sijasta, oppiminen kasvun sijasta ja vaatimattomuus ahneuden sijasta. Sosiaalisen tiedostuksen kautta tapahtuva muutos perustuisi älylliseen ymmärtämykseen, joka

1) Jantsch E. : "World Dynamics", Futures, kesäkuu 1971 ss. 167-169

- johtaisi rationaalisen maailmanpolitiikan muodostumiseen ja toteutumiseen.
- Muutos voi tapahtua sosiaalisen säätelyn ("social engineering") kautta. Tämä tapahtuisi siten, että vahvistettaisiin tai heikennettäisiin sisäisiä paineita siten, että systeemi toimisi mahdollisimman lähellä valittua "hyvää vaihtoehtoa".
  - Viimeinen keino olisi systeemin kaikkien osien ja vuorovaikutusten suora säätely, mikä merkitsisi maailmanlaajuista diktatuuria.

Tuntuu aivan selvältä, että ensimmäinen vaihtoehto ei voi tulla kysymykseen, sillä tällainen muutos vaatisi luultavasti satoja vuosia, eikä se missään tapauksessa voisi tapahtua parissa vuosikymmenessä.

Yhtä epätodennäköiseltä tuntuu kolmannen vaihtoehdon onnistuminen. Diktatuurin rakentamisessa olisi olennaista juuri vallan keskittäminen erittäin suppeaan piiriin käsiin. Luopuisivatko tähän astiset vallanpitäjät asemistaan käyttämättä viimeisenä keinonaan ydinaseita? Mikä olisi se pakote, jolla tämä diktatuuri pysyisi pystyssä harjoittaessaan nykyisten käsitysten mukaan erittäin epäinhimillistä politiikkaa? Tuntien diktatuurin rappeuttavan vaikutuksen, mistä löytyisi se viisaus, jolla maailmaa ohjattaisiin? Mikä takaisi sen, että valta todella olisi maailman parasta ajattelevien henkilöiden käsissä, eikä oman etunsa tavoittelijoiden käsissä? Totalitaaristen diktatuurien ilmestyminen vakavien kriisien ja pettymysten seurauksena on kyllä hyvinkin mahdollista, mutta niiden positiivisten seurauksien mahdollisuuksiin on suhtauduttava enemmän kuin epäillen.

Ainoaksi vaihtoehdoksi jää siis sosiaalinen säätely, jossa varmaan systeemidynamiikan metodologialla olisi suurta käyttöä. Monet yllä esitettyistä kysymyksistä voitaisiin kuitenkin tehdä myös tällä kohdalla. Forresterin varoitusta lainaten: "Lupaavampien käyttäytymiskaavojen kehittäminen vaatii sellaisia pitkän tähtäimen kieltämyksiä ja uhrauksia, ettei ihminen ehkä ole kykenevä niitä toteuttamaan" <sup>1)</sup>. Voitaisiin myös ajatella kuten pessimistinen Oppenheimer ennen kuolemaansa, että antaa maailman kulkea nykyiseen suuntaansa niin nopeasti ja tehokkaasti kuin mahdollista, jotta luonto saisi uuden mahdollisuuden rakentaa uuden ja paremman ekologisen systeemin. <sup>2)</sup>

Jantschin arvioissa huomio kiinnittyy siihen, että hän ei käsittele ollenkaan erilaisten talousjärjestelmien yhteyksiä ympäristökriisin ratkaisumahdollisuuksiin. Länsimaisista ympäristötutkijoista ainoastaan Barry Commoner on laajemmin käsitellyt talousjärjestelmän vaikutusta ympäristökriisiin. <sup>3)</sup> Commoner esittää, että voittoon perus-

1) Forrester J. W.: "World Dynamics", Wright-Allen Press, Cambridge, Massachusetts, 1971 kpl. 6.

2) Jantsch: mt. s. 169.

3) Commoner B.: "Ympyrä sulkeutuu". Gummerus, Jyväskylä, 1972, ss. 169-197.

tuva talousjärjestelmä ei voi toimia ilman kasvua. Ympäristöhaittojen todellinen huomioon otto sekä verotusten että tukipalkkioiden avulla ei tuo ongelmaan todellista ratkaisua niin kauan, kuin taloudellisen toiminnan motiivina on mahdollisimman suuri voitto. Kriisin ratkaisun täytyy perustua kokonaisvaltaiseen suunnitteluun ja ihmisten todellisten etujen huomioon ottamiseen. On kuitenkin muistettava, että sosialistinen talousjärjestelmä sinänsä ei ratkaise ongelmia; se ainoastaan antaa mahdollisuuden niiden ratkaisulle. Kysymys on loppujen lopuksi ihmisten päätöksistä, joita ohjaavat heidän omaksumansa arvot. Saatavissa olevien tietojen mukaan ei Neuvostoliitossa ole ympäristöongelmia otettu juuri sen paremmin huomioon kuin länsimaissaakaan. Sen sijaan Kiinasta on kantautunut joitakin lupaavia tietoja. Kiinan väkiluku pakottaa sen käyttämään kaiken raaka-aineen mahdollisimman tehokkaasti, mikä on myöskin ympäristöystävällistä. Tässä suhteessa Kiina luonnollisista syistä voinee toimia tien näyttäjänä muille maille. Neuvostoliiton ei tähän mennessä ole tarvinnut kiinnittää huomiota ympäristöön, koska sitä suhteessa tuotantoon on ollut riittämiin tarjolla. Viime vuosina on sielläkin vasta otettu ongelma todella huomioon, ja tuloksia voitaneen siten odottaa vasta muutaman vuoden kuluttua.

Varsin laajasti on muutosta kohti tasapainoa tuokittu "The Ecologist" lehdessä julkaisussa artikkelissa "A Blueprint for Survival"<sup>1)</sup>. Ym. artikkelissa on myös tarkasteltu niitä arvoja, joiden varassa uusi tasapainoinen yhteiskunta voisi toimia, mutta kysymys on liian laaja tässä käsiteltäväksi.

### 3.6. Maailman mallin kritiikkiä

Jo Forresterin "World Dynamics":sta ja vielä enemmän "Limits to Growth":sta on herännyt vilkasta ja välistä erittäin kiihkeää keskustelua. Käytännöllisesti katsoen jokaisessa amerikkalaisessa ja englantilaisessa tieteellisessä julkaisussa on esitetty jonkinlainen arvio M. I. T. :n työryhmän tuloksista. Tähän ryhmä on ilmeisesti pyrkinytkin julkaisemalla "Limits":n halpana populaariteoksena ja pitämällä laajoja esitely- ja keskustelutilaisuuksia. Suurin osa reaktioista on ollut kielteisiä.

Osa kriitikoista on suhtautunut malliin kielteisesti ilmeisesti pelkästään siinä saatujen johtopäätösten vuoksi. Heidän mielestään maailma tulee käyttäytymään toisin syystä tai toisesta. Tällainen kritiikki ei tietenkään tuo hedelmällistä keskustelua.

Asiallinen kritiikki on kohdistunut joko mallin olettamuksiin (ja siten myös johtopäätöksiin) tai sitten pelkästään mallin metodologiaan. Jotkut ovat keskittyneet pääasiassa siihen, että tulokset esitettiin suurelle yleisölle ennen "tieteellistä keskustelua"<sup>2)</sup>.

1) "The Blueprint for Survival", The Ecologist Vol. 2. No. 1 January 1972. Julkaistu myös suomenkielellä nimellä "Vielä voimme pelastua", Tammi 1973. Artikkelin ovat Ecologistiin toimittaneet Edward Goldsmith, Robert Allen, Michael Allaby, John Davoll ja Sam Lawrence.

2) Ks. esim. Wallich H. C.: "More on Growth", Newsweek, March 13, 1972 s. 47 tai Gillette: "The Limits to Growth", Science Vol. 175, March 10, 1972, 1088-1092.

Metodologisessa kritiikissä on lähinnä epäilty tietokoneen mahdollisuuksia tällaisten mallien rakentamisessa. Itse asiassa tämä kritiikki on ainoastaan sen tosiasian toistamista, että oletukset ovat ihmisten tekemiä, ja kone ainoastaan laskee mitä näistä oletuksista seuraa <sup>1)</sup>. Meadows ja kumppanit ovat usein korostaneet juuri tätä, mutta nähneet sen eräänä metodologian suurimmista eduista. Intuitiivisella päättelyllä on nimittäin miltei mahdotonta seurata mutkikkaan systeemin loogista dynaamista käyttäytymistä. Tietokone vapauttaa ihmisen tästä ylivoimaisesta loogisten johtopäätösten teosta mallin perusolettamusten arviointiin. Tietokoneeseen on nimittäin ohjelmoitu juuri se sama logiikka, jolla mekin teemme päättelyämme, ja lisäksi se pystyy käyttämään tätä logiikkaa huomattavasti ihmisaivoja tehokkaammin. Kone siis tosiaankin vain laskee, mitä tehdyistä johtopäätöksistä seuraa, mutta verrattomasti ihmistä nopeammin ja oikeammin.

Tässä käsitellyn mallin pahin puute on sen yliagregatiivisuus <sup>2)</sup>. Maailmaa ei ole jaettu edes alikehittyneisiin ja kehittyneisiin maihin. Erilaiset paineethan vaikuttavat varsin erilaisella tavalla maailman eri osissa. Observerin palstoilla käydyssä keskustelussa on kiinnitetty erityistä huomiota tähän yliagregointiin <sup>3)</sup>.

Mallin oletukset ovat myöskin varsin jäykät, mikä johtaa mm. mielettömiin tuloksiin kriisien jälkeen. Oletusten empiirinen testattavuus on myöskin varsin heikko <sup>4)</sup>, joskin suurin osa oletuksista näyttää olevan varsin yleisesti hyväksytyjä <sup>5)</sup>.

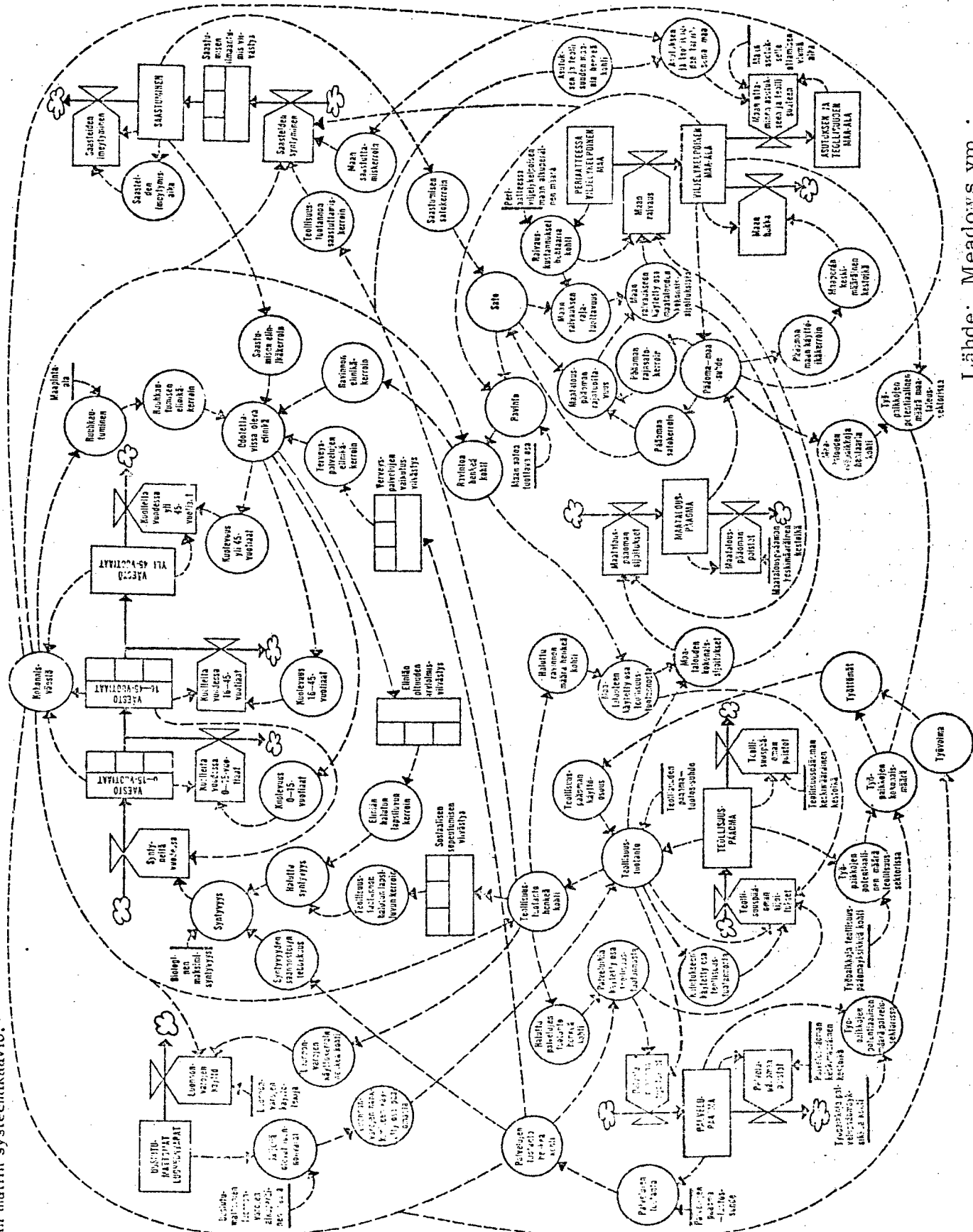
Monet mallin eksplisiittisistä relaatioista ovat ehkä hataralla pohjalla.

Kuten edellä kuitenkin on todettu, pystytään jokaiselle arveluttavalle relaatiolle saamaan jonkinlainen varmuusväli ääri vaihtoehtojen kokeilulla. Meadowsin ryhmä on keskittynytkin juuri oletustensa empiiriseen testaukseen.

- 1) Shubick: "Modelling on a Grand Scale", Science Vol. 174, December 3, 1971, 1014-1015 ja Naughton: "New Model Army", New Statesmen, 31 March 1972, 427-428.
- 2) Erich Jantsch: "World Dynamics", Futures, kesäkuu 1971, s. 165.
- 3) Eräs systeemianalyttikko huomautti sattuvasti: "Melko karkea malli. Tässä on käytetty koko maailmaa kuvaamaan 45 yhtälöä, kun meidän mielestämme 300 yhtälöä on vähin mahdollinen jo öljy-yhtiön toiminnan kuvaamiseen". The Observerin numerossa 4. heinäkuu, 1971 artikkelissa Gerald Leach: "Row over crisis report".
- 4) "Hän ei yritäkään määrätä muuttujien nykyisiä tai entisiä arvoja ja johtaa niiden välisiä relaatioita. Sen sijaan hän kirjoittaa relaatiot omasta päästään keskusteltuaan enemmän tai vähemmän asiantuntijoiden kanssa. Sitten hän simuloi näin saadun mallin erilaisilla oletuksilla ja kutsuu asiantuntijat katsomaan oliko saatu käytäytyminen järkevää". Jeremy Brayn kirjeessä artikkeli Observerissa 4. heinäkuuta 1971 Forresterin mallista.
- 5) Erich Jantsch tarkastelee artikkelissaan varsin kriittisesti Forresterin elämän laadusta ja saastumisesta tekemiä oletuksia. Jantsch: ss. 165-166.



Liite 1  
Maailman mallin systeemikaavio.



Lähde: Meadows ym.:  
Kasvun rajat, Tammi 1973.

Lähdeviitteet

- Ackoff R. L. : "Towards a System of System Concepts", Management Science Vol. 17, No. 11, July, 1971.
- Ahmavaara Y. : "Yhteiskuntatieteen kyberneettinen metodologia", 2. lisätty painos, Tammi, Helsinki, 1970.
- Andersin H. E. : "Johdatus numeerisen analyysin käyttöön yrityssystemin suunnittelussa", Valtion tietokonekeskuksen moniste.
- Ashby W. R. : "An Introduction to Cybernetics", Chapman & Hall Ltd., London, 1963.
- Battersby A. : "Network Analysis for Planning and Scheduling", MacMillan & co. Ltd., London, 1965.
- Brava J. : The Observer, 4. 7. 1971
- Buckley W. (ed) : "Modern Systems Research for the Behavioral Scientist", Aldine Publishing Company, Chicago, 1968.
- Commoner B. : "Ympyrä sulkeutuu", Gummerus, Jyväskylä.
- Forrester J. W. : "Principles of Systems", Wright-Allen Press, Cambridge, Massachusetts, 1969 (Second Preliminary Edition).
- Forrester J. W. : "Industrial Dynamics", The M. I. T. Press, Cambridge, Massachusetts, 1961.
- Forrester J. W. : "Urban Dynamics", The M. I. T. Press, Cambridge, Massachusetts, 1969.
- Forrester J. W. : "World Dynamics", Wright-Allen Press, Cambridge, Massachusetts, 1971.
- Forrester J. W. : "Sosiaalisten järjestelmien intuitionvastainen käyttäytyminen", Tekniikka No. 9 ja 10, 1971.
- Fuchs W. R. : "Informaatioteoria ja kybernetiikka", Kirjayhtymä, Helsinki, 1970.
- Gillette : "The Limits to Growth", Science Vol. 175, March 10, 1972.
- Goldsmith ym. : "The Blueprint for Survival", The Ecologist Vol 2. No 1, January 1972; suom. "Vielä voimme pelastua", Tammi 1973.
- Jantsch E. : "World Dynamics", Futures, kesäkuu 1971.
- Keloharju R. : "Talousdynamiikan erikoiskurssi", Kauppakorkeakoulu, kevät 1967.
- Kuisma : "Talousdynamiikka yrityssystemin käyttäytymisrakenteen kuvausvälineenä", Kansantaloustieteen laudatur-tutkimus, Helsingin Yliopisto, syyskuu 1967.
- Lange O. : "Wholes and Parts; a General Theory of System Behaviour", PWN-Polish Scientific Publishers, Warszawa, 1965.
- Leach G. : "Row over crisis report" The Observer no 4, heinäkuu 1971.
- Meadows, Meadows, Randers, Behrens : "The Limits to Growth", Earth Island, London, 1972. suom. "Kasvun rajat", Tammi 1973.
- Mesarovic M., Mucko D., Takahara Y. : "Theory of Hierarchical, Multilevel Systems", Academic Press, New York, 1970.

- Naughton: "New Model Army", New Statesmen, 31 March 1972.
- Niitamo O. E.: "Systeemiajattelun eräitä pääpiirteitä", Tilastollinen Päätoimisto, Monistettuja tutkimuksia, n:o 6, Huhtikuu, 1968.
- Mustonen S.: "On Distance Distribution in Networks", Helsinki, 1964.
- Optner S. L.: "Systems Analysis", Prentice-Hall Inc., New York, 1968.
- Peccei A.: "Predicament of Mankind", Succession, Vol. XII No. 6, New Series, kesäkuu 1971.
- Pulliainen K.: "Ekonometrinen tutkimus systeemiteoreettisesti tarkasteltuna". Kansantaloudellisia tutkimuksia XXVIII, Helsinki, 1967.
- Shubick: "Modelling on a Grand Scale", Science Vol. 174, December 3, 1971.
- Wallich, H. C.: "More on Growth", Newsweek, March 13, 1972.
- Varhø O.: "PERT-menetelmä", IBM:n systeemin suunnittelukurssin luentomoniste.
- Wiener N.: "Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine", The M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts, 1948.

Presidents Science Advisory Panel on the World Food Supply, The World Food Problem, Washington D. C. 1967.

T I L A S T O K E S K U S

TUTKIMUKSIA

1. Paavo Grönlund - Olavi Niitamo, Kansantalouden tilinpidon rakenne. Kesäkuu 1966. 38 s.
2. Olavi Niitamo, Taloudellinen malli. Toinen tarkistettu painos. Elokuu 1969. 67 s.
3. Reino Hjerppe, Aksiomaattisen menetelmän periaatteista ja soveltamisesta kokonaistaloudellisen kuvausjärjestelmän laatimisessa. Huhtikuu 1967. 45 s.
4. Aarno Soivio, Koe akateemisen koulutuksen saaneen työvoiman kysynnän ennustamiseksi. Syyskuu 1967. 12 s.
5. Paavo Grönlund - Olavi Niitamo, Suomen kansantalouden tilinpito vuosina 1948- 1964, käsitteet ja menetelmät. Maaliskuu 1968. 190 s.
6. Olavi Niitamo, Systemeijattelun eräitä pääpiirteitä. Huhtikuu 1968. 31 s.
7. Raoul Brummert, Yritteliäisyys ja taloudellinen kasvu. Mikrotaloudellinen tutkimus. Kesäkuu 1968. 169 s. (Ruotsinkielinen)
8. Kalevi Koljonen, Pääomakannan käsite ja mittaaminen sekä sovellutus Suomen rakennuskantaan vuosina 1950 - 1960. Syyskuu 1968. 92 s.
9. Olavi Niitamo, Tuotantofunktio, sen jäännöstermi ja teknillinen kehitys. Tammi-kuu 1969. 49 s.
10. Eeva-Liisa Kaski, Näkökohtia aluetilastojen kehittämistä. 28 s.  
Pertti Marjomaa, Aluesuunnittelun tilastojen tarpeesta. 18 s.  
Reino Hjerppe, Pääomakannan alueittaisesta jakautumisesta aluesuunnittelun näkökulmasta 17 s.  
Antti Somervuori, Tulojen ja elinkustannusten alueellisten erojen mittaaminen. Kesäkuu 1969. 54 s.
11. Heikki Oksanen, Monitasosuunnittelun käsite ja perusongelmat. 12 s.  
Eila Oikkonen, Suunnittelusta ja päätöksenteosta monitasoprosesseina keskitetysti johdetuissa talouksissa. Syyskuu 1969. 18 s.
12. Tulonjaon kehityspiirteitä vuosina 1955 - 1968. Maaliskuu 1970. 43 s.
13. Tarmo Korpela, Talonrakennustoiminnan lyhyen tähtäyksen ennustemalleja koskeva tutkimus. Kesäkuu 1970. 92 s.
14. Tor Hartman, Ylioppilastutkinnosta ja ylioppilaiden lukumääristä tulevaisuudessa. Heinäkuu 1971. (Vain ruotsinkielinen). 32 s.
15. Reino Hjerppe - Olavi E. Niitamo, Uuden SNA:n mukaisen kansantalouden tilinpidon perusrakenne. Elokuu 1971. 124 + 74 s.
16. Antti Somervuori, Elinkustannusten ja reaalityulojen alueelliset erot Suomessa. Maaliskuu 1972. 99 s.
17. Pasi Markelin, Itsemurhat Suomessa vuosina 1936 - 1965. Elokuu 1972. 151 s.
18. Mauri Nieminen, Syntyvyysfunktion matemaattisesta teoriasta. Sovellutus Suomen väestöön vuosina 1963 - 1967. Elokuu 1972. 82 s.
19. Vuoden 1971 kuntien kalleustutkimus. Marraskuu 1972. 76 s.
20. Aarno Laihonon, Ympäristötilastollisen tietojärjestelmän kehikko. Joulukuu 1972. 130 s.
21. Reino Hjerppe, Kokonaistaloudelliseen ohjelmointimalliin perustuva tutkimus tuotannon tekijöiden allokaatiosta Suomessa. Joulukuu 1972. 133 s.
22. Kimmo Mikkola, Maassamuutto ja pohjoismainen muuttoliike vuonna 1970. Tammi-kuu 1973. 85 s.
23. Aarno Laihonon, The Framework of an Information System of Environmental Statistics. Mars 1973. 39 s.
24. Seppo Leppänen - Tuulikki Lund - Arto Ojala - Reijo Pöytäkiivi, Osamaksukauppa ja sen säätely Suomessa vuosina 1969 - 1972. Huhtikuu 1973. 118 s.
25. Kimmo Mikkola, Ruotsissa vuosina 1946 - 1970 ansiotyössä ollut suomalaisväestö. Heinäkuu 1973. 40 s.

26. Neuvostoliiton suunnittelujärjestelmästä. Marraskuu 1973.  
Olavi E. Niitamo, Suunnittelusta Neuvostoliitossa. 62 s.  
Reino Hjerppe, Neuvostoliiton suunnittelumalleista. 12 s.  
Osmo Kuusi, Suunnittelun menetelmistä ja ongelmista Neuvostoliitossa. 27 s.
27. Tulonjaon kehityspiirteitä II vuodet 1960 - 1972. Joulukuu 1973. 21 s.
28. Hannu Laine, Systeemiteorian ja systeemidynamiikan peruskäsitteitä. Toukokuu 1974. 65 s.
29. Niitamo, Sosialistimaissa sovellettava kansantalouden tilinpitojärjestelmä. Toukokuu 1974. 95 s.
30. Leskelä - Salomäki - Virtanen, Teollisuustuotannon kuukausivolyymi-indeksin virheet ja niiden korjaaminen lineaarisella regressiomallilla. Syyskuu 1974. 60 s.

