

# Verkostojen ihmeellinen maailma

Risto Nieminen

Albert-László Barabási: *Linkit: verkostojen uusi teoria*. Suomentanut Kimmo Pietiläinen. Terra Cognita 2002.

Mark Buchanan: *Nexus: Small Worlds and the Groundbreaking Science of Networks*. W. W. Norton & Co. 2002.

Duncan J. Watts: *Six Degrees: The Science of a Connected Age*. W. W. Norton & Co. 2003.

Steven Strogatz: *SYNC: The Emerging Science of Spontaneous Order*. Hyperion 2003.

Tietokoneiden suorituskyvyn nopea kehitys on tehnyt mahdolliseksi ja suosituksi niiden soveltamisen mitä erilaisempien kompleksisten ilmiöiden mallintamiseen ja simulointiin numeerisia menetelmiä käyttäen.

Kompleksisten ilmiöiden matemaattinen kuvaus voidaan tyypillisesti redusoida suureksi joukoksi keskenään vuorovaikuttavia muuttujia. Vuorovaikutuksia voidaan ajatella muuttujien välisinä kytkentöinä, joiden voimakkuus ja topologia (kytkentöjen geometria) voivat vaihdella suuresti. Jos muuttuja on vaikkapa sosiaalinen toimija, biologinen solu tai kiinteän aineen atomi, se voi esimerkiksi vuorovaikuttaa vain lähinaapuriensa kanssa tai sillä voi olla myös kauaksi ulottuvia kytkentöjä. Muuttujat muodostavat monimutkaisen, kytketyn verkoston.

Verkostojen teoreettinen ja laskennallinen tutkimus elää vahvaa kukoistuskautta, jonka yhtenä osoituksena on myös tätä tutkimusta popularisoivien kirjojen tiuha ilmestyminen. Popularisoinnin suosiota selittää myös osittain verkostojen tutkimuksen monet sovellukset, ei ainoastaan luonnontieteiden ja tekniikan vaan enenevässä määrin myös talous- ja yhteiskuntatieteiden alueella.

## Soluautomaatit

Kytkeydyillä järjestelmillä voi olla hyvin yllättäviä esiin piirtyviä ominaisuuksia, vaikka niitä kuvaavat mallit ovat usein hyvin yksinkertaisia. Hyvä esimerkki ovat nk. soluautomaatit, jotka muodostuvat säännöllisessä hilassa asuvista muuttujista ("soluista"). Yksittäisen solun tilan aikakehi-

tyksen määräävät säännöt, jotka riippuvat ainoastaan solun ja sen lähinaapuriensa tiloista. Soluautomaatin aikakehitystä voidaan siten tutkia varsin yksinkertaisen tietokoneohjelman avulla.

Soluautomaattien alkuperäisen idean esittivät Stanislaw Ulam ja John von Neumann jo viisikymmentä vuotta sitten, ja niitä on laajasti sovellettu malleina mm. turbulenteille virtauksille, maanjäristyksille, biologisen kudoksen kasvulle, metsäpaloille ja ties mille. Soluautomaatin ideaa on sovellettu myös rinnakkaistietokoneiden arkkitehtuurissa, mm. nyt jo edesmenneessä Connection Machine-tietokoneessa.

Soluautomaatit osoittavat, että yksinkertaiset säännöt voivat johtaa erittäin monimuotoiseen, organisoituneeseen ja kompleksiseen käyttäytymiseen, kun niitä sovelletaan suureen joukkoon kytkettyjä muuttujia, ilman että tarvitaan "johtokeskusta" tai hierarkkista rakennetta.

Stephen Wolfram on hiljattain ilmestyneessä 1200-sivuisessa järkäletooksessaan *A New Kind of Science* (Wolfram Media 2002) esittänyt, että soluautomaateilla voidaan itse asiassa kuvata kaikkea: ne mahdollistavat "universaalisen laskettavuuden". Samalla Wolfram yrittää kirjata nimiinsä koko joukon soluautomaattitutkimuksen viime vuosien tuloksista. Lennokkaasta tekstistään ja innoittavasta kuvituksestaan huolimatta Wolframin kirja on pettymys, kenties siihen liitetyn ennakkokohun ja innokkaan markkinoinnin synnyttämien odotusten vuoksi. Tässä arvioidavat Albert-László Barabásin, Mark Buchananin, Duncan J. Wattsin ja Steven Strogatzin kirjat sen sijaan tarjoavat nautittavaa lukemista verkostoista, kytketyistä muuttujista ja kompleksisista ilmiöistä kiinnostuneille.

## Linkit

Alberto-László Barabásin kirja *Linkit* käsittelee erityisesti nk. mittakaavattomia verkostoja, jotka eroavat tavallisista, säännöllisistä verkostoista heterogeenisuutensa takia: muuttujilla voi olla hyvin erilaisia määriä kytkentöjä.

Asiaa on helppo valaista sosiaalisten verkostojen esimerkillä. Ihmisyhteisössä on yksilöitä,

joilla on laaja kontaktipinta ja paljon tuttavuuksia, kun taas jotkut yksilöt ovat lähes erakoita ja yhteydessä vain harvoihin. Tällaista kytkentärakennetta ei voi kuvata säännöllisellä verkostolla. Pikemminkin se muistuttaa lentoyhtiön reittikarttaa, jossa on muutama paljon käytetty kenttä monine yhteyksineen ja lisäksi paljon harvoin käytettyjä pikkukenttiä. Monet luonnossa esiintyvät ja teknologian synnyttämät verkostot ovat luonteeltaan hyvin heterogeenisiä. Tyypillinen ja usein mainittu esimerkki on Internet/WWW.

Barabásin teksti on innostunutta ja sujuvaa. Alan aktiivitutkijana ja pioneerinä hän tuntee hyvin uusimmatkin tulokset ja kuvaa niiden löytämistä persoonallisella tavalla. Kirjan alkuosa sisältää myös hyvän, anekdoottien värittämän historiallisen katsauksen verkkojen matematiikkaan. Parhaimmillaan Barabási on kuitenkin kuvattessaan mittakaavattomien verkkojen idean soveltamista vaikkapa AIDS-epidemian etenemiseen, Internetin rakentumiseen, tietokonevirus-ten leviämiseen tai biologiisiin prosesseihin.

Vaikka jotkut kirjassa esitetyt analogiat ovat hieman hankalaa nieltävää, yleisvaikutelma onnistuneesta popularisoinnista on vahva. Kirjassa on hyvä viiteluettelo. Kimmo Pietiläisen suomenos on tunnettua laatutavaraa ja on onnistunut jopa silottamaan alkuperäisteoksen joskus vaikeaselkoista jargonia.

*Nexus* on hyvin samantapainen, sekin erinomainen kirja. Sen tekijä Mark Buchanan on ammatiltaan tiedetoimittaja, mikä kenties näkyvyyden hieman laajempaan perspektiiviin ja toisaalta hieman pinnallisempaan otteeseen.

Buchananin teoksessa käsiteltäviä aihealueita ovat mm. tarttuvien tautien leviäminen, julkisen hallinnon järjestelmät, sosiaaliset organisatiot, proteiinien ohjaamat solunsisäiset verkostot, aivotutkimus sekä ihmisten seksuaaliset kontaktit. Siinä missä Barabási seuraa varsin tiukasti oman tutkimuksensa kehittymistä, Buchanan maalaa isomman kuvan, mutta harhautuu toisinaan hieman sivuun itse asiasta. Buchananin kirjoitustyyli on hyvin havainnollistava ja mukanaan vievä.

## Verkostojen rakennetta etsimässä

Duncan Watts on hänkin aktiivinen tieteen tekijä ja verkostojen tutkija. *Six Degrees* käsittelee osin samoja aiheita kuin *Linkit* ja *Nexus*; jopa jotkut esimerkeiksi valitut sovellukset ovat samoja. *Six Degrees* kattaa kuitenkin verkostotutkimuksen yleisemmin kuin lähinnä mittakaavattomiin

verkkoihin keskittyvä *Linkit*. Kirjan tekijän tavoitteena on selvittää, miten verkoston rakenne ja sen kytkentöjen ominaisuudet (mm. niihin liittyvä satunnaisuus) vaikuttavat sen dynamiikkaan, esimerkiksi erilaisten signaalien leviämiseen.

Duncan Watts oli nuori jatko-opiskelija Cornell-yliopistossa, kun hän julkaisi yhdessä Steven Strogatzin kanssa paljon huomiota herättäneen artikkelinsa "Collective dynamics of 'small-world' networks" (*Nature* 393, 440 (1996)). Artikkelin analysoi 'pieni maailma'-ilmiötä, jossa melkein minkä tahansa suurenkin populaation kaksi satunnaisesti valittua jäsentä voidaan yhdistää toisiinsa muutamalla (noin kuuden) linkin välityksellä. Tunnettuja esimerkkejä ovat mm. Hollywoodin näyttelijät ja yliopistomatemaatikot.

Wattsin ja hänen työtovereidensa oivallus oli, että mittakaavattomuuden lisäksi tärkeä verkostoihin vaikuttava tekijä on niiden 'ryvästyminen'. He myös osoittivat, että riittävä määrä satunnaisia kytkentöjä tekee säännöllisestä tai ryvästyneestä verkostosta mittakaavattoman.

Wattsin kirja on helppolukuinen (varsinkin alkuosaltaan) ja mukaansatempaava. Kirja on paljolti kertomus hänen kokemuksistaan Australiasta tullessaan jatko-opiskelijana Yhdysvaltain murattiliigan yliopistoissa, ja sitä värittävät monet humoristiset ja sarkastiset havainnot työtovereista. *Six Degrees* käyttää esimerkkeinä lähinnä sosiaalisia, yhteiskunnallisia ja talouden verkostoja, mikä ymmärrettävästi helpottaa ongelmanasettelujen omaksumista ja lisää satunnaisen lukijan kiinnostusta. Tätä nykyä Duncan Watts on sosiologian professori Columbia-yliopistossa New Yorkissa.

## Tapahtumien synkronisaatiohakuisuus

Steven Strogatz on sovelletun matematiikan professori Cornellissa ja Duncan Wattsin väitöskirjatyön ohjaaja. *SYNC* sivuaa myös yllä kuvattuja verkostotutkimuksen asioita, mutta sen varsinaisen teeman synkronisaatio: miksi näennäisesti toisistaan riippumattomat värähtelijät (kellokappan kellot, sirittävät kaskaat, sykkivät kiiltomatot ja tulikärpäset, suprajohtavat Josephson-liitokset jne.) käyttäytyvät ajan oloon kollektiivisesti, samassa tahdissa, ilman ulkoista ohjausta tai johtokeskusta? Selitys on siinä, että hyvinkin heikot kytkennät riittävät kollektiivisuuden emergenssiin. Hämmästyttävää on se, miten universaalina ja laajasti esiintyvänä ilmiönä synkronisaatio pitää oivaltaa.

Strogatz työtovereineen on sekä matemaattisia että tietokonesimulointiin perustuvia menetelmiä käyttäen ratkaissut monia kytkettyjen oskillaattorien mysteerejä ja kirjoittanut niistä mainion kirjan.

Hollantilainen fyysikko Christiaan Huygens raportoi havaintojaan heilurikellojen synkronisaatiosta jo 1600-luvulla. Ilmiö oli pitkään unohduksissa. Vasta 1960-luvulla teoreettisen biologian pioneeri Arthur Winfree osoitti, että iltayöstä sykkivien tulikärpästen tahdistuminen johtui heikoista kytkennöistä toistensa signaalit näkevien kärpästen välillä. Kytkennot johtavat lopulta täysin kollektiiviseen sykkeeseen, jonka biologista funktiota voi vain spekuloida.

SYNC kertoo mielenkiintoisen tarinan järjestyksen emergenssistä kytkettyjen värähtelijöiden joukossa. Sujuva teksti kuvailee kompleksisuuden mallinnuksen matemaattisia ja numeerisia haasteita, mutta väistää liian teknisyyden vaaran ja onnistuu välittämään tieteentekijöille tutut tunteet, harvinaiset uusien ideoiden syttymiset, arkipäivän puurtamisen ja frustraation, onnistumisen palkitsevan mielihyvän sekä ratkaisujen muuntumisen ajan oloon itsestään selviksi ja triviaaleiksi. Strogatz käyttää esimerkkinään biologisia ja fysiologisia systeemejä, laserfysiikkaa ja atomien Bose-Einstein-kondensaatteja sekä sosiaalisia ja yhteiskunnallisia verkostoja. Muiden ylläesiteltyjen kirjojen tapaan SYNC on myös henkilökohtainen tarina tekijänsä kokemuksista tiedeyhteisön aktiivisena jäsenenä. Strogatz

myös laatii agendaa tulevalle tutkimukselle ja luettelee koko joukon avoimia haasteita, mm. heterogeenisuuden vaikutuksen kytkettyjen oskillaattorien synkronisaatioon.

## *Verkostotutkimus suuren huomion kohteena*

Verkostojen keskeinen rooli mutkikkaiden ilmiöiden ymmärtämisessä on kiistaton. Uutiset ympäri maailman leviävistä biologisista (AIDS, SARS) ja tietokoneviruksista (SoBig), sähkönjakelujärjestelmien romahtamisesta sekä valuuttajärjestelmien epästabiilisuudesta ovat tehneet niihin liittyvät ilmiöt myös suurelle yleisölle dramaattisella tavalla tutuiksi. Verkostojen dynamiikan ymmärtämisen kautta voidaan parantaa Internetin tietoturvasuutta, taistella tautiepidemioiden leviämistä vastaan, pyrkiä tukahduttamaan terrorismi ja kenties avata genetiikan salakieli, monen muun sovelluksen ohella.

Verkostojen poikkitieteellinen tutkimus jatkuu vilkkaana. Ylläkuvatut kirjat ovat erinomainen yleistajuinen johdatus aiheeseen, ja niiden ripeää ilmestymistä (osittain myös suomeksi!) voi tervehtiä ilolla.

*Kirjoittaja on akatemiaprofessori Teknillisessä korkeakoulussa ja laskennallisen materiaalfysiikan tutkimuksen huippuyksikön (COMP) johtaja.*