



OULUN YLIOPISTO  
UNIVERSITY of OULU

OULUN YLIOPISTON KAUPPAKORKEAKOULU

**Lasse Jaakonmäki**

**TALOUSTIEDE KOMPLEKSISUUSTALOUSTIETEEN NÄKÖKULMASTA**

Kandidaatintutkielma

Taloustiede

5/2018

## Sisällys

<b>1</b>	<b>JOHDANTO</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>KOMPLEKSISUUSTALOUSTIEDE</b> .....	<b>5</b>
2.1	Endogeenisesti muodostunut epätasapainotila.....	6
2.2	Teorioiden muodostaminen epätasapainotilan vallitessa .....	8
2.3	Ilmiöiden muodostuminen.....	10
2.4	Positiivinen takaisinkytkentä .....	13
2.5	Talous muodostuessaan .....	14
<b>3</b>	<b>KOMPLEKSISUUSTALOUSTIEDE FINANSSIMARKKINOILLA</b> .....	<b>18</b>
3.1	Tausta .....	18
3.2	Kääntöpisteet ja signaalit .....	18
3.3	Finanssiverkostot ja niiden vaikutukset.....	21
3.4	Agentit ja käyttäytyminen.....	22
<b>4</b>	<b>YHTEENVETO</b> .....	<b>24</b>
<b>5</b>	<b>LAINATUT LÄHTEET</b> .....	<b>26</b>

## 1 JOHDANTO

Viimeisen 25 vuoden aikana taloustieteen puolella on kehittynyt uudenlainen näkökulma, kompleksisuustaloustiede. Kompleksisuustaloustiede eroaa perinteisestä ja niin sanotusta klassisesta taloustieteestä väittämällä, että talous ei aina olekaan tasapainotilassa. Kompleksisuustaloustiede nostaa myös komputaation tärkeäksi työkaluksi matematiikan rinnalle ja olettaa, että nousevia tuottoja esiintyy taloudessamme yhdessä laskevien tuottojen kanssa. Käytännössä kompleksisuustaloustiede hahmottaa talouden dynaamisena ja kehittyvänä järjestelmänä, eikä vain tasaisena systeeminä. Kompleksisuustaloustiede lähti liikkeelle Yhdysvaltojen Santa Fe:stä, jossa 80-luvun loppupuolella eri tiedekuntien huippuosajat kerääntyivät yhteen kehittämään uudenlaisia raameja kompleksisuustaloustieteelle. Heidän joukkoonsa kuului Nobel voittaja ja kvarkkien löytäjä Murray Gell-Mann sekä myös Nobel palkinnon saanut Phil Anderson fysiikan puolelta. Taloustieteen puolta taas edustivat Kenneth Arrow ja Brian Arthur.

Taloustieteen näkökulmasta kompleksi lähestymistapa ei ole vain jatkoa klassiselle taloustieteelle vaan sitä voidaan pitää täysin uutena lähestymistapana (Arthur, 2015). Kompleksi taloustiede olettaa, että toiminnot ja strategiat taloudessa muuttuvat dynaamisesti, aika on merkityksellinen, talouden rakenteet muuttuvat ajan myötä ja rakentuvat uudestaan, jolloin syntyy ilmiöitä, joita ei ole havaittavissa klassisen taloustieteen tasapainotiloihin keskittyvissä malleissa (Arthur, 1999). Perinteiseen mikro- ja makrotaloustieteeseen lisätään meso-kerros, jossa ilmiöiden todellinen muodostuminen tapahtuu. Kompleksisuustaloustiede siis antaa uuden tavan ajatella talouttamme organisaationa maailmana, jossa tapahtuu luonnollista evoluutiota ja joka on historiastaan riippuvainen.

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan kompleksisuustaloustieteen ominaispiirteitä ja tärkeimpiä periaatteita. Seuraava kappale kertoo miten kompleksisuustaloustiede hahmottaa taloutta epätasapainotilojen kautta ja miten niiden vallitessa voi muodostaa teorioita. Käsittelemme myös ilmiöiden muodostumista sekä talouden käyttäytymistä muodostuessaan. Kolmannessa kappaleessa käydään läpi, millaisia käytännön sovelluksia kompleksisuustaloustieteellä on finanssimarkkinoilla ja millaisia hyötyjä

se tarjoaa tulevaisuudessa. Kappaleessa käydään myös hiukan läpi, miten kompleksisuustaloustiedettä voidaan mallintaa.

Tutkimuksen tarkoituksena on esitellä kompleksisuustaloustiedettä ja sen tärkeimpiä periaatteita. Kompleksisuustaloustiede on itsessään suhteellisen uusi taloustieteen suuntaus ja siihen liittyvä tutkimus on vielä vaiheessa. Parhaimmillaan kompleksisuustaloustiedettä voidaan käyttää yhdessä klassisten taloustieteen menetelmien kanssa, jotta saavutetaan laaja kuva taloudestamme. Kompleksisuustaloustiede ei siis yritä syrjäyttää klassista taloustiedettä, vaan tuoda uusia välineitä ja ajatuksia vastaamaan ongelmiin, mihin klassinen taloustiede ei ehkä ole riittävää.

## 2 KOMPLEKSISUUSTALOUSTIEDE

Talous on laaja ja monimutkainen systeemi, jossa eri toimijat, kuten kuluttajat, yritykset ja valtio yhdessä käyvät kauppaa ja tuovat uusia elementtejä tarjottavaksi. Tämän järjestelmän voidaan kuvailla oppivan ja innovoivan. Systeemi on laajalti rinnakkainen ja vuorovaikutuksessa olevien toimijoiden teoista muodostuu lopulta markkinoiden hinnat, rakenne ja instituutiot. Tältä pohjalta muodostuu taloudellinen sopeuttava systeemi (Arthur, 2015).

Adam Smith aikoinaan huomasi kuinka tämän taloudellisen systeemin lopulta muodostaa yksilöllinen käyttäytyminen ja kuinka yksilöt näin myös sopeuttavat omaa toimintaansa tämän mallin pohjalta (1776). Tästä muodostuu silmukka, joka on vahvasti yhteydessä kompleksiin taloustieteeseen. Kompleksisuutta ei voida vielä pitää yhteneväisenä teoriana, vaan enneminkin tieteenä joka tutkii kuinka systeemien osien vuorovaikutus muodostaa mallin ja kuinka lopulta tämä malli saa systeemin osat sopeuttamaan malliin nähden (Beinhocker, 2007). Brian Arthur (2015) käyttää tästä esimerkkinä liikennettä, jossa yksittäiset autot muodostavat trendejä ja seurattavia kuvioita ja kuinka nämä kuviot saavat lopulta autot muuttamaan omaa käyttäytymistään sopeutuakseen syntyneisiin kuvioihin. Näin ollen voidaan sanoa, että kompleksisuus kertoo muodostumisesta ilmiönä, rakenteiden muodostumisesta ja kuinka tämä lopulta vaikuttaa niihin osiin, jotka olivat kuviota alun perin aiheuttamassa.

Kun tarkastellaan taloutta kompleksina systeeminä, silloin tutkitaan, kuinka se muodostuu ja kehittyy ja näin ollen tarkastellaan huolellisesti miten yksittäisten agenttien käyttäytyminen muodostaa jonkun lopputuleman ja kuinka tämä lopputulema taas vaikuttaa agentteihin. Käytännössä kompleksisuus siis kysyy, miten yksittäinen käyttäytyminen mahdollisesti reagoi usean käyttäytymisen yhdessä muodostamaan kuvioon ja miten tämä kuvio lopulta muuttuu tämän seurauksena (Arthur, 1999).

Tämä on muodostanut hankalan kysymyksen taloustieteen osalta. Siksi taloustieteen historian alussa otettiin käyttöön yksinkertaisempi ja matemaattisempi lähestymistapa (Arthur, 2015). Taloustiede ei kysynyt miten agenttien käyttäytyminen

reagoisi agenttien itsensä luomaan malliin, vaan se kysyi mitkä käyttäytymisen mallit (teot, strategiat, odotukset) olisivat sopusoinnussa keskimääräisten mallien kanssa. Toisin sanoen se kysyi mitkä mallit eivät vaadi muutoksia mikrotason käyttäytymisessä ja olisivat näin ollen tasapainotilassa. Yleinen tasapainoteoria pyrkiikin selittämään mitkä hinnat ja määrät tuottaessa ja kuluttaessa saavuttaisivat tasapainon, josta ei ole insentiiviä muuttua.

Tämä näkökulma oli luonnollinen tapa tarkastella talouden rakenteita mallien näkökulmasta ja hyödyntää niiden yhteydessä matematiikkaa (Arthur, 2015). Tämä onkin mahdollistanut monen hyödyllisen mallin rakentamisen, kuten yleisen tasapainotilamallin, jolla voidaan elegantisti tarkastella taloutta. Tämä näkökulma joutuu kuitenkin tekemään suhteellisen rajuja oletuksia, jotka selitetään alla, rationaalisesta käyttäytymisestä (Arthur, 2015)

Jos tasapainotila oletetaan, joudutaan käyttämään voimakasta filteriä talouden ilmiöiden tarkasteluun. Tasapainotilan alla ei ole tilaa kehittymiselle, etsimiselle, luomiselle. Käytännössä siis kaikki asiat, jotka tekevät, sopeutuvat tai muuttuvat, kuten: adaptaatio, innovaatio, rakenteiden muutos, ja historian aikakäsitys joudutaan jättämään pois tai ohittamaan. Lopputulema voi olla elegantti ja yksinkertainen malli, mutta siitä jää uupumaan elämä, aitous ja luominen (Arthur, 2015).

## **2.1 Endogeenisesti muodostunut epätasapainotila**

Käytännössä kysymällä miten agentit mahdollisesti reagoivat, johtaa epätasapainotilan oletukseen. Kun sattumanvariset reaktiot ovat mahdollisia ja muuttavat lopputulemaa systeemi ei voi määritelmän mukaan olla tasapainossa. Arthurin (1999) mukaan epätasapainotila muodostuu taloudessa sisältä käsin. Tämä johtuu kahdesta syystä fundamentaalisesta epävarmuudesta ja on teknologisesta innovaatiosta.

Fundamentaalin epävarmuus muodostuu siitä, että kaikki ongelmat sisältävä aina jonkinasteisen oletuksen tulevasta. Tulevaisuus itsessään tuo epävarmuutta ja vaikka joissain tilanteissa tapahtumia voidaan mallintaakin toimivilla jakaumilla, kuitenkin enimmäkseen tämä ei anna todellista kuvaa epävarmuudesta jolloin joitain asioita ei vain tiedetä. Arthur (2015) myös lisää, että epävarmuus luo epävarmuutta kuten

esimerkiksi tulevaisuuden oletuksissa saatetaan joutua ajattelemaan muiden agenttien tulevaisuuden oletuksia, jolloin subjektiivisia oletuksia tehdään jo subjektiivisista oletuksista. Muiden agenttien täytyy tehdä samaa. Näin ollen epävarmuus johtaa suurempaan epävarmuuteen. Kun lopputulemat ovat epätiedossa, niihin johtamia päätöksenteon ongelmia ei voida hyvin määritellä. Tästä johtuen puhdas rationaalisuus ei myöskään ole hyvin määriteltyä ja näin ollen ei voi olla loogista ratkaisua ongelmaan, joka ei ole looginen. Tämä tarkoittaa, että näissä tilanteissa rationaalinen deduktiivinen päättely ei vain ole huonoa, vaan se ei yksinkertaisesti voi olla olemassa. Näin ollen tätä oletusta ei voi tehdä. Tämä ei tarkoita sitä, etteikö agentit voisi toimia taloudessa tai tehdä mitään päätöksiä.

Behavioraalisisessa taloustieteessä keskitytäänkin juuri tähän ongelmaan ja tarkastellaan, kuinka ihminen toimii tietyssä kontekstissa (Lin, 2012). Kognitiivisessa tieteessä ollaan osoitettu, että kun valinta on tärkeä, ihmiset käyttävät puhtaita arvauksia, historiasta kertynyttä tietoa ja kokemustaan saadakseen kuvan tulevasta (Kahneman, 1979). Käytännössä taloustieteen puolella voidaan ajatella, että yksittäiset agentit muodostavat yksilöllisiä uskomuksia tai hypoteeseja, sisäisiä malleja, tilanteisiin ja päivittävät näitä malleja uutta oppiessaan.

Tämä uusien mallien tutkiminen ja etsiminen aiheuttaa pysyvän Arthurin mukaan (Arthur, 2015) Brownin liikkeen talouden sisällä. Brownin liike on fysiikasta tuttu käsite, jolla kuvataan nesteessä tai kaasussa olevien hiukkasten jatkuvaa sattumanvaraista liikettä. Talous on näin ollen pysyvästi disruptiivisessa liikkeessä, kun agentit tutkivat, oppivat ja adaptoituvat.

Toinen tekijä disruptiivisuudelle on teknologinen muutos. Schumpeter (1911) aikoinaan totesi teknologisen muutoksen olevan: “a source of energy within the economic system which would of itself disrupt any equilibrium that might be attained.” Kyseinen energian lähde on uudet teknologian yhdistelmät Arthurin (2009) mukaan uudet teknologiat luovat kysynnän aina uudemmille teknologioille. Tietokoneiden saapuessa syntyi kysyntä paremmalle datan säilönnälle, tietokonekielille, algoritmeille. Uusi teknologia ei siis ole pelkästään yksittäinen disruptio tasapainotilalle vaan on jatkuva generaattori yhä uudemmille teknologioille, jotka itsessään luovat uudempaa kysyntää. Teknologinen muutos luo uutta muutosta

endogeenisesti ja jatkuvasti ja näin ollen asettaa talouden pysyvästi disruptiiviseen tilaan (Arthur, 2009).

Tästä muodostuu uudenalainen kuva taloudelle jossa olisi vain klassinen tasapainotila. Fundamentaalin epävarmuus ja teknologinen muutos ovat koko ajan läsnä ja näkyvät joka tasolla. Agenttien täytyy tutkia tiensä eteenpäin ja oppia valintojen edessä ja reagoida niiden luomiin mahdollisuuksiin. Tällaisessa maailmassa uskomukset, strategiat ja agenttien teot joutuvat testiin selviytymisestä tietyissä tilanteissa tai tietyissä lopputulemissa, joka muodostaa jo niin sanotun ekologian uskomuksille, strategioille ja teoille, jota ne yhdessä luovat. Tämä agenttien etsiminen muuttaa taloutta itseään ja tilanteita joita agentit kohtaavat. Näin agentit eivät vain reagoi ongelmaan jota he selvittävät, vaan nämä teot yhdessä kollektiivisesti reformoivat sen hetkistä lopputulemaa, mikä asettaa agentit taas sopeuttamaan. Näin ollen voidaan puhua kompleksista systeemistä ja kompleksisuudesta, joka on hyvin yhteydessä epätasapainotilaan.

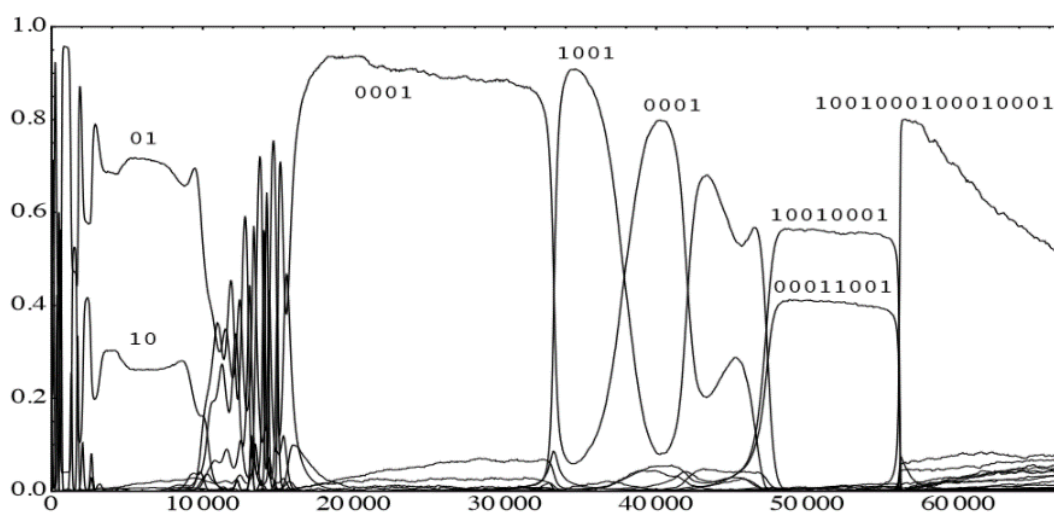
## **2.2 Teorioiden muodostaminen epätasapainotilan vallitessa**

Kun talous on jatkuvasti dynaamisesti muuttuva, voidaan olettaa, että käsitelämme kaaosta, joka ei ole analyyttisessä kontrollissa (Arthur, 2015). Arthur myös toteaa kärjistäen että, aikaisemmin historian saatossa taloustiede on tässä kohtaa nostanut kädet ilmaan ja luovuttanut (2015) .

Käytännössä tällaisessa systeemissä ymmärretään, että taloudessa tämänhetkiset olosuhteet muodostavat olosuhteet sille mitä tulee seuraavaksi. Talous on systeemi jonka elementit päivittyvät koko ajan tilanteen vaatimalla tavalla. Toisella tavalla ilmaistuna talous on jatkuva komputaatio ja laaja disruptiivinen, rinnakkainen, sattumanvarainen systeemi. Tällöin talous kehittyy algoritmisesti (Arthur, 1999) .



Vuonna 1991 Kristian Lindgren rakensi tietokoneistetun turnauksen (Lindgren, 1991), jossa eri strategiat kilpailivat sattumanvaraisesti muodostetuissa pareissa ratkaistakseen vangin dilemmaa. Vangin dilemmassa kaksi henkilö ovat tehneet rikoksen ja sopineet, etteivät puhu kuulusteluissa mitään. Kuulustelijat taas tarjoavat vangeille vaihtoehtoa, jossa kumpikin saa vuoden vankeutta, jos pysyvät hiljaa. Toinen vaihtoehto on, että jos vain toinen puhuu, pääsee hän vapaaksi ja toinen vangeista taas joutuu kolmeksi vuodeksi vankilaan. Strategioiden ohjeena oli miten toimia huomioimalla vastustajan edelliset siirrot. Jos strategiat toimivat ne toistuivat, muuntuivat ja jos eivät ne jätettiin pois. Strategiat pystyivät myös syventymään hyödyntämällä laajempaa muistia vastustajan ja omien liikkeiden tulkinnassa. Lindgren huomasi, että alussa strategioina toimi hyvinkin yksinkertaisia malleja, mutta ajan myötä strategia syvenivät monimutkaisempiin.



(Lindgren, 1991) Strategioiden kehittyminen Lindgrenin kokeessa.

Pystyakselilla aika ja vaaka-akselilla tiettyjen strategioiden lukumäärä, koodit viittaavat strategioiden muistin syvyyteen.

Brian Arthur väittää, että yllä olevan kokeen dynamiikat ovat suhteellisen yksinkertaisia, jotta ne voidaan kirjoittaa yksinkertaisilla stokastisilla yhtälöillä, mutta nämä eivät näytä koko kuvaa (2015). Mitä todellisuudessa muodostuu, on strategioiden ekologia, jossa eri strategiat kokeilemalla koittavat selviytyä ympäristössä, jonka nämä kollektiiviset strategiat yhdessä ovat muodostaneet. Tämä ekologia on pienimuotoinen biosfääri missä uudet lajit (strategiat) jatkuvasti

ilmestyvät ja tutkivat aikaisempien lajien ympäristöä ja jos ne eivät selviydy ne häviävät. Evoluutio on siis syntynyt, mutta sitä ei ole tuotu järjestelmän ulkopuolelta vaan se on endogeenisesti muodostunut. Tämän tapaisessa systeemissä ratkaisu on tyypillisesti ekologia, jossa strategiat, uskomukset tai teot kilpailevat selviytyäkseen. Ekologia ei välttämättä päädy tasapainoon ja sillä on omat ominaispiirteensä, jota voidaan tutkia kvalitatiivisesti tai kvantitatiivisesti.

Tutkimus antaa kuvan siitä, miten taloustiedettä voidaan komputaation avulla tehdä. Käytännössä tämä helpottaa epätasapainotilassa olevan talouden näkökulman hahmottamisessa. Talous, tai sen osat voidaan nähdä jatkuvasti muuttuvina ja oppivina minkä vuoksi näitä osia voidaan tarkastella. Myös klassisia ongelmia talouden sisällä, kuten omaisuuden hinnoittelu, kansainvälinen kauppa ja pankkitoiminta voidaan nähdä tämän näkökulman avulla muodostamalla malleja, jossa vastaukset eivät ole pelkästään tasapainossa vaan myös sen ulkopuolella.

### **2.3 Ilmiöiden muodostuminen**

Ilmiöiden muodostuminen on olennainen osa kompleksia tiedettä ja Arthur tarkasteleekin ilmiöiden muodostumista käyttäen liikennettä esimerkkinään (Arthur, 2015). Arthurin mukaan tyypillinen malli hahmottaisi että, kun liikenteessä olevien autojen välit ovat liian pieniä autot hidastavat ja kun taas välit ovat kasvaneet autot kiihdyttävät. Kun autoja on liikenteessä tarpeeksi, saadaan aikaan tietty keskiarvo väleistä ja autot sekä kiihdyttäisivät, että hidastaisivat päästäkseen tähän. Tasapainotila nopeudelle syntyy ja jos malli on rajoitettu tutkimaan vai tasapainoja, tämän enempää ei nähdä. Todellisuudessa epätasapainotilan ilmiö syntyy. Osa autoista saattaa hidastaa- autoilija voi menettää keskittymisensä minkä vuoksi takana olevat autot hidastamaan. Tämä välittömästi vaikuttaa sujuvuuteen ja aiheuttaa edelleen hidastumista takana olevissa autoissa. Ruuhka syntyy. Arthur löytää tästä kolme huomioitavaa asiaa. Ilmiö on spontaani, jokainen osa on uniikki niin ajallisesti kuin paikallisesti. Näin ollen sitä on vaikea hahmottaa suljetuilla ratkaisuilla ja paremmin sopii todennäköisyyslaskelmat ja statistiikka. Toiseksi ilmiö on väliaikainen. Se muodostuu ajassa ja ei voi esiintyä tasapainon vallitessa. Kolmanneksi, ilmiö ei

esiinny mikrotasolla (yksittäinen auto) tai makrotasolla (koko liikenteen sujuvuus) vaan näiden välissä olevalla meso-tasolla.

Ilmiöiden muodostumista voidaan tarkastella myös muiden esimerkkien avulla. Ensimmäinen on ”itseään vahvistavat varojen hintojen muutokset”, eli käytännössä kuplat ja niiden jälkeiset romahdukset. Näiden tulkinnessa hyödynnetään Santa Fe instituutissa luotua keinotekoista osakemarkkinaa (Brian Arthur, 1997). Tässä tietokonemallissa sijoittajat ovat tekoälyllisiä tietokoneohjelmia, jotka eivät voi vain olettaa tai deduktiivisesti päätellä rationaalista ennustusmallia, vaan joutuvat yksilöllisesti löytämään nämä mallit ja odotukset jotka toimisivat hyvin. Nämä sijoittajat sattumanvaraisesti löytävät omat ennustemallinsa, kokeilevat lupaavia, jättävät pois ne jotka eivät toimi ja periodisesti luovat uusia tilalle. Osakkeiden hinnat muodostuvat tarjouksista ja pyynnöistä ja näin ollen muodostuvat ennustemalleista. Markkinasta tulee ennustemallien ekologia, jossa osa malleista selviytyy ja osa kuolee pois. Ekologia joka ajan myötä muuttuu. Mallissa nähdään monia ilmiöitä ja tärkeimpinä spontaanit kuplat ja romahdukset.

Arthur tarjoaa myös esimerkin mallin taustalla olevasta mekaniikasta. Oletetaan että osa sijoittajista löytää mallin jonka mukaan, jos hinta on noussut  $k$  periodeja, voidaan sen olettaa nousevan  $x\%$  seuraavalla periodilla. Oletetaan myös että, osa sijoittajista löytää mallin, jossa kun hinta on enemmän kuin  $Y$  kertaa fundamentaalisen tuoton (osingot), hinta tulee tippumaan  $z\%$ . Ensimmäinen malli aiheuttaa kuplan kaltaista käyttäytymistä. Kun hinta nousee tämä vahvistaa uutta hinnan nousua. Lopulta tämä johtaa tilanteeseen, jossa toinen ennustemalli odottaa hinnan tippuvan ja tätä mallia käyttävät myyvät, joka saa myös ensimmäisen mallin sijoittajat myymään, jolloin romahdus syntyy. Näiden ilmiöiden koko ja kesto vaihtelee ja ne tapahtuvat sattumanvaraisesti ajan kuluessa, joten niitä ei voi ennustaa. Mitä taas voidaan ennustaa, on että, näitä ilmiöitä syntyy ja näillä tulee olemaan tietty todennäköisyysjakauma koosta ja asteikosta.

Toinen väliaikainen ilmiö joka mallissa nähdään, on klusteroitu volatilitiiteetti. Tämä esiintyy sattumanvaraisina alhaisen volatilitiiteetin jaksoina ja niitä seuranneina korkean volatilitiiteetin jaksoina. Alhainen volatilitiiteetti ilmestyy, kun agenttien ennustemallit toimivat suhteellisen hyvin yhdessä ja näin ollen ei ole suurta insentiiviä vaihtaa

malleja. Korkea volatilititeetti taas tapahtuu, kun osa agenteista löytää parempia malleja. Tämä hajottaa koko kuviota, joten muut sijoittajat joutuvat nyt etsimään uusia malleja aiheuttaen lisää hajontaa ja lisää adaptoitumista. Tulos on korkean volatilititeetin jakso. Tällainen ilmiö esiintyy finanssimarkkinoilla myös ja sitä kutsutaan GARCH käyttäytymiseksi.

Kolmas ilmiö liittyy enemmän tilaan kuin aikaan. Tätä kutsutaan äkilliseksi perkolaatioksi. Kun välittyvä ilmiö tapahtuu jossain päin verkkoa ja verkko on hajanaisesti yhdistynyt, muutos tulee ajan mittaan tyrehtymään linkkien puutteesta. Jos taas verkko on tiukasti yhdistynyt, muutos lisääntyy ja jatka lisääntymistään. Pankkien verkossa esimerkiksi yksittäinen pankki voi huomata omistavansa huonoja varallisuuseriä. Näin ollen se joutuu paineen alle lisätäkseen likvidejä varojaan ja soittaa muihin pankkeihin. Nämä puolestaan tulevat myös paineen alle lisätäkseen likviditeettiään ja tämä paine leviää koko verkostoon. Nämä ilmiöt tyrehtyvät harvasti yhdistetyssä verkostossa mutta prekoloivat tiiviissä verkostossa.

Viimeinen tuo lähemmäs yleistä ominaisuutta. Yleisesti komplekseissa systeemeissä ilmiöt eivät esiinny ennen kuin joku alla oleva parametri havaitsee intensiteetin kasvun adaptoitumiseen tai, kun yhteyden aste nousee jonkun kriittisen pisteen yli (Brian Arthur, 1997). Tämä tarkoittaa siis, että systeemi käy läpi vaiheensiiron (phase transition). Keinotekoisessa osakemarkkinassa kun sijoittajien uusien mallien löytämisen aste on alhainen, malli muuttuu rationaaliseen tasapainotilaan. Yksinkertaista käytöstä syntyy. Kun taas uusien mallien etsimisen aste kasvaa vastaamaan enemmän todellisuutta, markkina kehittää ”rikkaan psykologian” uusille eroaville malleille ja alkaa ilmentää väliaikaisia ilmiöitä. Kompleksia käytöstä syntyy. Kun etsimisen astetta lisätään entisestään, yksittäinen käyttäytyminen ei ehdi adaptoitua muutokseen ja kaoottista käytöstä syntyy.

Nyt alamme näkemään kuinka tällaiset ilmiö tai rakenteet tai järjestykset yhdistyvät kompleksisuuteen. Kompleksisuus tutkii juuri vuorovaikutusten seurauksia. Se tutkii kuviota, rakenteita tai ilmiöitä, jotka muodostuvat agenttien, solujen elementtien, partikkeleiden tai firmojen vuorovaikutuksessa.

Kompleksisuus tutkii kuinka muutokset vaikuttavat systeemiin. Toisin sanoen kompleksisuus tutkii muutoksen etenemistä sitoutuneen käyttäytymisen kautta. Tapahtuma jossain aiheuttaa lisää tapahtumia. Välillä tapahtuman aikaansaama muutos välittyy vain muutama elementtiin systeemeissä ja välillä se taas useampiin elementteihin. Matemaattinen teoria, joka on hyvin läsnä kompleksissa teoriassa, osoittaa että tämän kaltainen ilmiö omaa erilaisten voimalakien elementtejä, pitkäjänteisiä todennäköisyysjakaumia ja pitkän aikavälin korrelaatioita. Näitä ominaisuuksia havaitaan kaikissa systeemeissä, niin fysikaalisissa, kemiallisissa, biologisissa kuin taloudellisissa. (Brock, 1992)

Voimme nähdä myös että, kun interaktion määrää tällaisissa systeemeissä lisätään ulkoapäin, etenemisen todennäköisyyttä lisätään esimerkiksi tuomalla lisää linkkejä, systeemi muuttuu harvoista seurauksista moniin surauksiin ja tästä muuttumattomiin surauksiin. Se tekee vaiheensiirron. Kaikki nämä elementit ovat kompleksisuuden ominaisuuksia.

Voimme nyt todeta, että epätasapaino yhdistyy kompleksisuuteen. Epätasapaino taloudessa johtaa etenemisen tutkintaan ja niiden muutosten tulkintaan. Näin ollen taloustiede on hyvinkin kompleksisuuden määritelmässä.

## **2.4 Positiivinen takaisinkytkentä**

Positiiviset takaisinkytkennät (feedbacks) ovat määrittävä osa komplekseja systeemejä (Arthur, 1999). Tarkemmin sanottuna sekä negatiiviset että positiiviset takaisinkytkennät ovat läsnä komplekseissa systeemeissä. Jos systeemissä on pelkästään negatiivisia takaisinkytkentöjä, taloustieteessä laskevat tuotot, se nopeasti muuttuu tasapainotilaan ja käyttäytyy ”kuolleena”. Jos systeemi taas sisältää sekä positiivisia että negatiivisia takaisinkytkentöjä, se alkaa näyttämään kompleksia käyttäytymistä. Tällaisessa systeemissä rakenteet tulevat ja menevät ja systeemi on elävä. Taloustieteessä käsite tunnetaan nousevina tuottoina. Jos firma saavuttaa pienen edun ja nousevat tuotot oletetaan, tämä firma tulee saavuttamaan suurempaa etua lisää. (Arthur, 1989)

Nousevien tuottojen elämään saava vaikutus on hyvin tiedossa. Arthur väittää, että nousevia tuottoja kuitenkin esiintyy taloudessa laajemmin kuin kuvitellaan (Arthur, 1989). Ne eivät esiinny pelkästään firmoissa tai tuotteissa vaan suurissa ja pienissä mekanismeissa, käyttäytymisessä markkinoilla ja verkostojen dynaamisuudessa. Ne toimivat jokaisessa asteessa epätasapainottaakseen taloutta jopa makrotasolla (keynesin teoria voidaan ajatella positiivisena feedbackina väliaikaisesti lukkiutuvan kahteen tilaan: täystyöllisyys täystyöttömyys (Arthur, 1989)). Ja luovat komplekseille systeemeille ominaisia piirteitä.

## **2.5 Talous muodostuessaan**

Talous jatkuvasti luo ja uudelleen luo itseään lähtökohtaisesti uusien elementtien kautta. Yleisesti uusien teknologioiden ja instituutioiden kautta jotka luovat uusia rakenteita kehittyessään. Schumpeter (1911) aikoinaan totesi talouden muodostumisen olevan: “the most important of all the phenomena we seek to explain”. Kompleksisuus voi tuoda tähän lisää sillä se nimenomaan käsittelee rakenteiden luomista ja uudelleenluomista.

Jos halutaan ymmärtää miten talous rakentaa itseään ja muuttuu, täytyy ensin tarkastella, kuinka teknologia rakentuu ja muuttuu ajan myötä (Arthur, 2015). Teknologia ei ole ainut muutoksen agentti taloudessa, mutta se on yksi tärkeimmistä (Solow, 1957). Perinteisesti taloustieteessä talouden muutoksessa rinnastetaan teknologia tuotantofunktioiden kanssa ja talous toimii näiden ympäristönä (Arthur, 2015). Uusien teknologioiden syntyessä tuotantofunktiot muuttuvat, tuotos lisääntyy ja työ tai muut resurssit vapautuvat uuteen käyttöön, joka luo uutta vaurautta, joka voidaan taas sijoittaa uusiin teknologioihin. Talous siirtyy sulavasti alkuperäisestä tasapainotilasta uuteen endogeenisesti kasvaen. Tämä määritelmä on perinteinen taloustieteessä ja toimii hyvin tasapainotiloihin keskittyvässä tieteessä. Mutta tässä mallissa muutoksen suurin tekijä, teknologia, asetetaan taka-alalle hintojen ja määrien ollessa keskipisteenä. Teknologia hahmotetaan muodottomana asiana, joka vain sattumanvaraisesti saapuu jostain ilman rakenteita muutokseen (Arthur, 2009).

Kompleksisuuden näkökulma laittaa teknologian taas etusijalle ja asettaa hinnat ja määrät vähemmälle huomiolle. Tässä määritelmässä hahmotetaan, että teknologioiden muodostumisella on selvä rakenne (Arthur, 2009). Näin ollen kompleksin taloustieteen näkökulma keskittyy suoraan tällä hetkellä olevien teknologioiden joukkoon ja kysyy, miten se muuttuu ajan myötä, miten sen jäsenet syntyvät, miten ne luovat ja uudelleen luovat kollektiivisesti tukevan verkon ja kuinka tämä taas lopulta muuttaa koko talouden rakenteita.

Arthurin mukaan (Arthur, 2009) aluksi voidaan määritellä yksittäiset teknologiat mahdollistaviksi tekijöiksi ihmisten tarkoituksille. Tällöin näihin lukeutuisivat tuotannolliset prosessit, koneet, lääketieteelliset prosessit, algoritmit ja taloudelliset prosessit. Myös organisaatiot, lait ja instituutiot voidaan lukea mukaan. Teknologioiden merkittävä piirre on se, että ne rakentuvat aina perustuen edelliseen teknologiaan käyttämällä joitain osia niistä.

Seuraavaksi määritellään talous tiettyjen järjestelyiden ja tekemisten kokonaisuudeksi jonka avulla yhteiskunta täyttää tarpeensa. Nämä järjestelyt tässä määritelmässä ovat talouden teknologioita. Näin ollen talous syntyy kehkeytyvästi järjestelmistään eli teknologioistaan ja sen voidaan sanoa olevan näiden teknologioiden ilmaisu. Kun talous hahmotetaan näin, siitä muodostuu tekijöidensä ekologia, jossa käytössä olevien teknologioiden tulee olla toisiaan tukevia ja taloudellisesti johdonmukaisia.

Arthurin mukaan voidaan tehdä vielä yksi lisäys. Teknologioita syntyy vain, jos niille esiintyy kysyntää. Suurin osa tästä kysynnästä tulee teknologioiden omasta kysynnästä. Esimerkiksi auton olemassaolo vaatii uutta teknologiaa öljyn käsittelylle. Jokaisella ajanhetkellä systeemissä on avoin verkosto uusille teknologioille ja järjestelyille.

Seuraava algoritmi voidaan koostaa talouden muodostumiselle (Arthur, 2009).

1. Uusi teknologia ilmestyy. Se luodaan tietyistä olemassa olevista osista ja tulee aktiiviseen kokoelmaan uutena elementtinä.
2. Uusi teknologia tulee saataville korvatakseen aiempaa teknologiaa ja niiden osia.

3. Uusi teknologia asettaa uusia tarpeita tukeville teknologioille ja organisaationaalisille järjestelyille.
4. Jos vanhat teknologiat katoavat kokoelmasta, niiden liitosten tarpeet häviävät. Niiden tarjoamat mahdollisuudet häviävät liitosten kadotessa ja uudet korvaavat elementit jotka täyttävät tämän tilan muuttuvat passiivisiksi.
5. Uusi teknologia tulee saataville potentiaalisena komponenttina uusille teknologioille.
6. Talous, tuotettujen ja käytettyjen tavaroiden malli, adaptoituu näihin vaiheisiin. Kulut ja hinnat (insentiivit uusille teknologioille) muuttuvat näiden mukana.

Vaikka algoritmi on yksinkertainen se mahdollistaa aina uudenlaista käyttäytymistä systeemissä.

Talouden muodostumiseen voidaan lisätä vielä toinen kerros, joka luo uutta rakennetta. Uudet teknologiat tulevat usein ryhmissä (Arthur, 2009). Ajan myötä teknologioita tulee joukoissa, perustuen johonkin aikaisempaan teknologiaan joka on luonut näille kysyntää. Ne perustuvat muutamaan keskeiseen teknologiaan ja täyttävät lisäävien teknologioiden tarpeen. Nämä teknologiat eivät muuta talouden runkoa, mutta kohtaavat talouden yhdistellen aikaisempia prosesseja luoden samalla uusia insentiivejä. Talous, joka koostuu tarpeidemme mukaisia järjestelyjä ja toiminnoista, rakentuu kaiken tämän ympärille. Talous on siis seurausta kaikelle tälle uuden teknologian syntyemiselle (Arthur, 2015). Prosessi voidaan määritellä itsestään luovaksi. Uudet teknologiat syntyvät perustuen vanhoihin teknologioihin, joten teknologioiden kollektiivinen joukko on itsestään tuottava. Näin ollen myös talous.

Tästä näemme, että talous muuttuu rakenteellisesti. Uusia fyysisiä teknologioita syntyy, uusia organisaationaalisia ja institutionaalisia teknologioita vaaditaan ja nämä luovat aina uuden kysynnän uusille teknologioille. Rakenne muodostuu. Pitkällä aikavälillä tiettyjen teknologioiden rungot osoittavat taloudelle suunnan. Historian saatossa näitä runkoja ovat olleet esimerkiksi höyrykoneiden aika, raitioteiden aika ja digitaalinen aika (Arthur, 2009). Voimme eristää muuttumisen mekanismeja, mutta



emme voi ennustaa kuinka lopulta tulee käymään. Koko prosessi, komputaatio, ei ole määrätty ja se on esimerkki epätasapainotilasta.

### 3 KOMPLEKSISUUSTALOUSTIEDE FINANSSIMARKKINOILLA

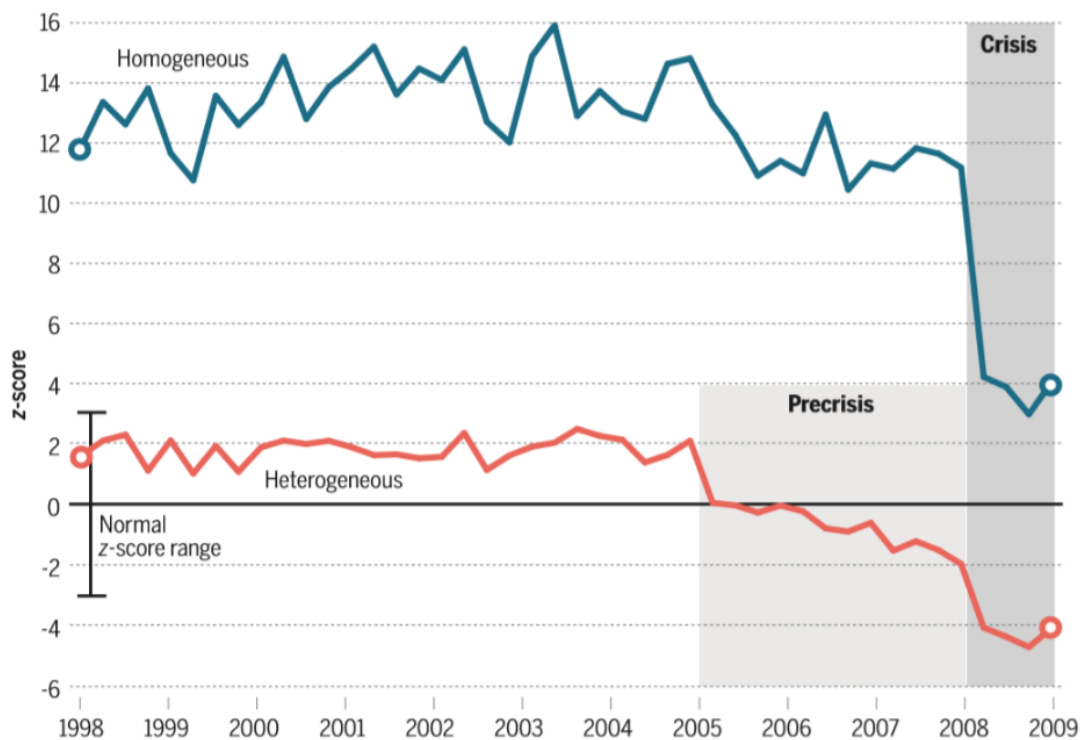
#### 3.1 Tausta

Perinteinen taloustiede ei voinut selittää tai ennustaa vuonna 2008 tapahtunutta finanssimarkkinoiden romahdusta ja sitä seuranneita pitkäaikaisia vaikutuksia globaaliin talouteen. Viime vuosina myös kompleksisuustaloustiedettä on alettu hyödyntämään markkinoiden ymmärtämisessä. Käsitteet kuten käänköpisteet (tipping point), verkostot, takaisinkytkentä ja joustavuus ovat nousseet tarkastelun kohteeksi. Kuitenkin kompleksisuusmallien todellinen hyödyntäminen on vasta alkutekijöissä. Viimeaikaiset tekniikat ja löydöt kuitenkin tarjoavat potentiaalisia mahdollisuuksia korkeasti toisiinsa sitoutuneiden taloudellisten ja rahoituksellisten systeemien monitoroinnissa ja hallinnassa auttaen esimerkiksi havaitsemaan tulevia romahduksia finanssisektorilla paremmin (Stefano Battiston J. D., 2016).

#### 3.2 Käänköpisteet ja signaalit

Finanssimarkkinat ovat historian saatossa kokeneet suuria ja ennustamattomia romahduksia systeemisellä tasolla. Tämän kaltaiset vaiheensiirrot ovat joissain tapauksissa voineet aiheutua ennakoimattomista stokastisista tapahtumista. Useimmiten systeemin sisällä on kuitenkin tapahtunut endogeenisiä muutoksia. Kompleksien systeemien analyysi aina ilmastosta ekosysteemeihin paljastaa, että enne suurta vaiheensiirtoa, systeemissä havaitaan asteittaista ja huomaamatonta kestokyvyn menetystä. Tämä tekee systeemeistä hauraita. Pieni disruptio voi laukaista dominoilmiön, joka etenee systeemin läpi ja vie systeemin kriisiin. Viimeaikainen tutkimus on tuonut esille geneerisiä empiirisiä kvantitatiivisia indikaattoreita systeemien kestokyvystä, joita voidaan käyttää monissa komplekseissa systeemeissä käänköpisteiden havainnointiin. Indikaattoreihin kuuluu nouseva korrelaatio verkon solmujen välillä, nouseva ajallinen korrelaatio systeemissä sekä varianssi ja vinouma vaihtelumalleissa. Indikaattorit ovat alun perin ennustettu matemaattisesti ja myöhemmin demonstroitu kokeellisesti todellisissa komplekseissa systeemeissä, kuten elävissä systeemeissä (Marten Scheffer, 2012) . Hiljattain tehty tutkimus Hollannin pankkien välisestä verkosta osoitti, että homogeenisen verkkomallin avulla tapahtuva standardianalyysi voisi johtaa vain vuoden 2008 kriisin myöhäiseen

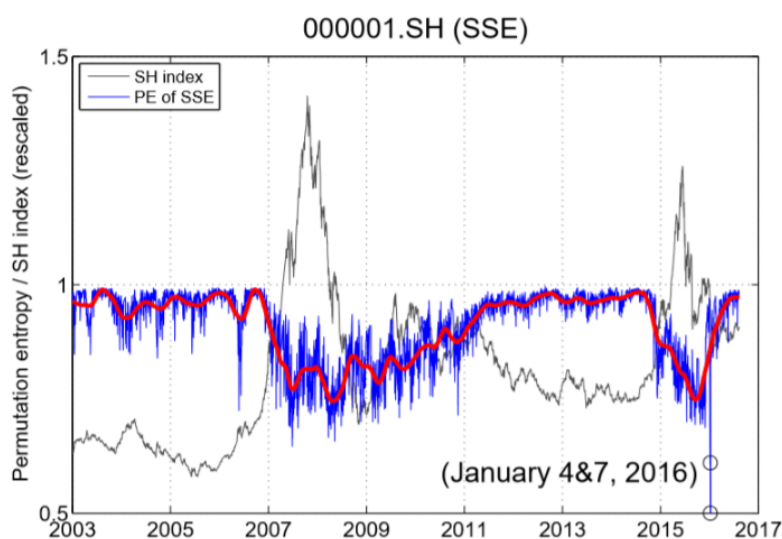
havaitsemiseen, kun taas realistisempi ja heterogeenisempi verkkomalli voisi tunnistaa ennalta varoittavia signaaleja kolme vuotta ennen kriisiä (Saracco, 2016). Alla oleva kuvio esittää homegeenisen ja heterogeenisen mallin eroja.



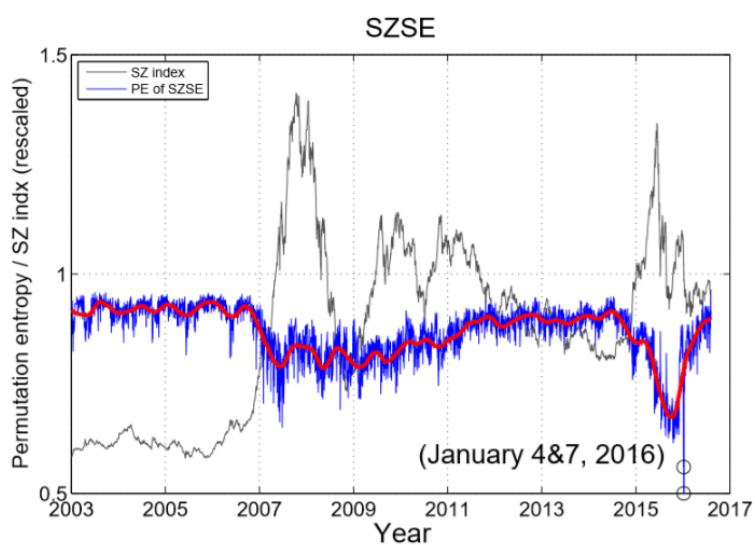
### Hetrogeenisen ja homogeenisen mallin erot (Saracco, 2016)

Hou (2017) väittää tuoreessa tutkimuksessaan, että taloudellisten aikasarjojen analyysit ovat olleet merkityksellisiä fundamentaalisten talousteorioiden kehityksessä historiassa. Kuitenkin suuri osa näistä analyysistä perustuu pitkän aikavälin keskiarvolliseen käyttäytymiseen ja näin ollen ei hahmota markkinoiden väliaikaista evoluutiota, joka voi aika ajoin johtaa kupliin ja romahduksiin. Kompleksin tieteen pohjalta ei vielä tiedetä kasvaako vai väheneekö markkinoiden ja systeemin kompleksisuus kuplien ja niitä seuraavien romahdusten aikana. Tähän kysymykseen vastatakseen Hou tutki permutaationaalisen entropian (PE) väliaikaista variaatiota kiinan osakemarkkinoilla laskemalla PE:n arvoa Shanghai Stock Exchange (SSE) ja Shenzhen Stock Exchange (SZSE) indekseistä. Käytännössä PE mittaa systeemin sattumanvaraisuutta arovan yksi tarkoittavan täysin sattumanvaraista systeemiä. Tutkijat havaitsivat, että PE laski merkittävästi kahtena aikavälinä, joissa molemmissa markkinat nousivat ensin voimakkaasti ja tämän jälkeen romahtivat merkittävästi.

Ensimmäinen aikaväli alkoi vuoden 2006 puolessavälissä, kauan ennen vuoden 2008 kriisiä, ja jatkui aina vuoden 2011 alkuun saakka. Toinen aikaväli oli tuorempi ja ajoittui vuoden 2014 puoleenväliin ja loppui vuoden 2016 puolessavälissä. Koska molemmat aikavälit olivat vähintään vuoden mittaisia ja edelsivät pörssiromahduksia vähintään puolella vuodella, voidaan PE:n olettaa antavan tärkeää tietoa mahdollisista vaaran merkeistä markkinoilla niin regulaattoreille kuin sijoittajillekin. Alla oleva kuvio esittää PE:n muutoksia Kiinan osakemarkkinoilla.



**PE Shanghai pörssissä** (Yunfei Hou, 2017)



**PE Shenzhenin pörssissä** (Yunfei Hou, 2017)

Myös ekologit ovat kehittäneet työkaluja, joilla voidaan havaita elintarvikeverkkojen kestävyyttä ja vakautta ja esittäneet kuinka nämä ominaisuudet riippuvat verkon topologiasta ja siteiden vahvuudesta (May RM, 2008).

Epidemiologit ovat kehittäneet taas työkaluja mittaamaan tapahtumien leviämistä interaktiivisissa systeemeissä tunnistaakseen infektion pysyvyyteen vaikuttavat keskeiset ryhmät tai aiheuttajat. Näiden avulla voidaan suunnitella strategioita levinneisyyden estämiseen tai tarttuvuuden havaitsemiseen (Heesterbeek H, 2015).

Luonnontieteiden tulosten ekstrapolointi taloustieteen ja rahoituksen puolelle kuitenkin tuo hankaluuksia. Esimerkiksi aikaisten varoitusmerkkien julki tuominen muuttaa systeemin käyttäytymistä ja vaikuttaa tulevaisuuden dynamiikkaan (Lucas, 1976). Tämä voidaan kuitenkin estää, jos indikaattorit ovat selvillä vain sääntelijöille tai kun tarkoituksena on rakentaa parempia rajoituksia verkkoihin levinneisyyden rajoittamiseksi.

### **3.3 Finanssiverkostot ja niiden vaikutukset**

Verkkoefektit vaikuttavat taloudellisen systeemin vakauteen, koska shokin vahvistuminen voi tapahtua vahvojen vaihtuvien efektien kautta. Verkostojen teoria on myös olennainen osa kompleksisuustaloustiedettä. Kansainvälinen järjestelyiden pankki (Bank of International Settlements) hiljattain kehitti puitteet, jotka perustuvat pankkien yhteen liitettävyyteen liittyviin tietoihin, joiden avulla arvioidaan globaalisti ja järjestelmällisesti tärkeiden pankkien systemaattinen riski rahoitusverkostolle. (lähde). Viimeaikainen tutkimus tarttuvuudesta rahoituksellisissa verkostoissa on näyttänyt, että verkoston topologia ja pankkien asema ovat tärkeitä tekijöitä. Globaali finanssiverkosto voi romahtaa, vaikka yksittäiset pankit näyttäisivätkin turvallisilta. (Stefano Battistona D. D., 2012). Näiden efektien ymmärtäminen on olennaista yksittäisten pankkien stressin määrittelemisessä ja systemaattisen riskin määrittelemisessä koko systeemissä. Viimeaikaisista pyrkimyksistä huolimatta näitä efektejä ei kuitenkaan rutinoimaisesti harkita vielä lähiaikoina.

Asymmetrinen informaatio verkostossa, jossa pankit eivät esimerkiksi tiedä huonojen varojen osuutta muissa pankeissa, voi muodostua ongelmalliseksi. Pankkiverkossa on

tyypillisesti ydin-kehärakenne, jonka ytimessä on suhteellisen pieni määrä suuria, tiheästi toisiinsa liitettyjä pankkeja, jotka eivät ero kovin suuresti liiketoiminta- ja riskimalleista. Tämä viittaa siihen, että ydinpankkien maksukyvyttömyys on hyvin korreloitunutta. Tämä taas saattaa johtaa kollektiiviseen moraalikadon ongelmaan, kun pankit huomaavat, että ne tulevat tuetuksi hädän tullen. Tämä todennäköisyys aiheuttaa laumakäyttäytymistä alun perinkin.

Systemaattisen riskin arviointi perustuu rahoitusverkoston rakeiseen informaatioon. Valitettavasti pankkien väliset liiketoimet ovat usein piilossa luottamuksellisuuksista johtuen. Kehitteillä olevia työkaluja verkkojen rekonstruoinniseksi osatiedoista ja systemaattisen riskin arvioimiseksi osoittavat, että julkisesti saatavilla olevat pankkitiedot eivät muodosta luotettavia arvioita järjestelmäriskeistä (Cimini, 2015). Arvio paranisi jo huomattavasti, jos pankit julkisesti raportoisivat yhteyksiensä määrän muihin pankkeihin anonymistikin. Aineiston ymmärtämisen lisäksi, yhteen liittäntöjen vaikutusten ymmärtäminen perustuu myös yhdistäviin kvantitatiivisiin mittareihin, jotka tuovat esille tärkeitä verkko-ominaisuuksia, kuten yksittäisten solmujen epäonnistumisen vaikutukset koko systeemiin. Esimerkiksi DebtRank, joka mittaa yksittäisten instituutioiden systemaattista tärkeyttä rahoitusverkostossa, näyttää kuinka ilmiö on liian keskeinen kaatuakseen (Stefano Battiston M. P., 2012).

### **3.4 Agentit ja käyttäytyminen**

Agenttipohjaiset mallit (ABM) ovat tietokonemalleja missä agenttien käyttäytymistä ja niiden yhteyksiä esitetään eksplisiittisesti valinnan sääntöinä tuomalla agenttien havainnot teoiksi. Agenttipohjaisia malleja käytetään yleisesti kuvaamaan kompleksisuusteorian ilmiöitä. Vaikka agenttipohjaisia malleja ei olekaan käytetty suureksi osin taloudellisten systeemien analysointiin, kuin esimerkiksi liikenteen, tai sotatilanteiden analyysiin, ne ovat kuitenkin tuoneet esille lupaavia tuloksia. Axtell (Axtell, 2015) kehitti yksinkertaisen agenttipohjaisen mallin, joka selittää yli kolmeakymmentä empiiristä ominaisuutta yritysten muodostumisessa ilman ulkoisten shokkien lisäämistä. Agenttipohjaiset mallit tarjoavat hyvän selityksen miksi hintojen volatilitteetti on klusteroinutta ja ajallisesti vaihtelevaa (LeBaron, 2006). Niitä on myös hyödynnetty systemaattisen riskin testaamisessa Basel komitean tuomien reformien yhteydessä, ja ne ovat osittaneet kuinka dynaamisesti muuttuvat riskirajat voivat johtaa

hintojen rajuihin nousuihin ja laskuihin (Stefan Thurner, 2012), (Farmer, 2015). Agenttipohjaiset mallit markkinoiden dynamiikasta voidaan yhdistää sosiaalisten tieteiden agenttipohjaisiin malleihin mielipiteiden dynamiikasta (Andreas Flache, 2011) ymmärtääksemme kuinka mielipiteiden muutoksen lisääntyminen sosiaalisissa verkostoissa vaikuttaa kehkeytyvään makrokäyttäytymiseen. Tämä taas on kriittistä sosioekonomisten systeemien vakauden ja kestävyuden hallinnassa.

Laboratorioissa tehdyt kokeet ihmisten päätöksistä tuo empiiristä validointia agenttien yksittäisiin päätöksentekosääntöihin, niiden yhteyksiin sekä kehkeytyvään makrokäyttäytymiseen. Viimeaikaiset käyttäytymistä koskeneet kokeet näyttävät kuinka taloudelliset järjestelmät voivat poiketa huomattavasti rationaalisesta tehokkaasta tasapainoilasta niin yksittäisellä, kuin keskiarvillisella tasollakin (T. Bao, 2015). Tämä positiivisten palautejärjestelmien yleinen piirre johtaa hintojen pysyviin poikkeamiin tasapainosta ja spekulatiivisesta käyttäytymisestä johtuvien kuplien ja romahdusten syntyyn. Tätä ilmiötä vahvistaa koordinaatio, trendien seuranta ja laumakäyttäytyminen (Hommes, 2013). Näistä ilmiöistä on vahvaa empiiristä tutkimusta finanssimarkkinoilla käytännössä ja kontrolloidut laboratoriokokeet tarjoavat vielä yksityiskohtaisemman ymmärryksen makroilmiöiden kehkeytymiseen johtavista mekanismeista, kausaalisista sekä olosuhteista.

Yksinkertainen behavioraalinen malli, jossa agentit vaihteittain vaihtavat paremmin toimiviin heuristiikkoihin, selittää yksilöllistä sekä kehkeytyvää makrokäyttäytymistä laboratorioissa luoduissa talouksissa. Nämä kokeet tarjoavat myös yleisiä mekanismeja sosiaalisen tartunnan hallintaan. Esimerkiksi raha- ja finanssipolitiikan keinot jossa heikennetään positiivista takaisinkytkentää ovat olleet onnistuneita vakauttamaan kokeellisia makroekonomisia systeemejä oikein kalibroituina (T. Bao, 2015). Kompleksisuusteoria tarjoaa matemaattisen ymmärryksen näihin ilmiöihin.

#### 4 YHTEENVETO

Kompleksisuustaloustiede ei ole pelkkä lisä klassiseen taloustieteeseen, eikä se tarkoita vain agenttiperusteisen käyttäytymisen lisäämistä nykyisiin malleihin. Se on uudenlainen tapa ajatella taloutta. Se ei hahmota taloutta tasapainotilassa olevana systeeminä vaan ennemminkin systeeminä joka on koko ajan liikkeessä vaiheittaisena komputaationa, joka vaiheittain luo itseään. Siinä missä tasapainotilaan perustuva taloustiede korostaa järjestystä, tasapainoa ja deduktiota kompleksisuustaloustiede korostaa jatkuvuutta epävarmuutta ja avoimuutta muutokselle. Käytännössä voidaan sanoa, että aikaisemmin talous on ollut substantiivipohjainen sana eikä verbimuotoinen.

Muutos kompleksien systeemien ajattelutapaan paljastaa tärkeän välikerroksen taloudessa, niin kutsutun meso-kerroksen. Se myös määrittelee uudelleen mitä ”ratkaisu” tarkoittaa taloustieteessä. Ratkaisu ei enää ole pelkästään matemaattisten yhtälöiden ja ehtojen joukko, vaan ennemminkin kuvio tai emergenttien ilmiöiden joukko. Joukko muutoksia, jotka saattavat luoda uusia muutoksia endogeenisesti ja olemassa olevia yhteisöjä luomassa uusia yhteisöjä. Teoria taas tällöin voidaan määrittellä syvänä ymmärryksenä niistä mekanismeista, jotka luovat näitä kuvioita ja mallintavat muutoksen etenemistä.

Tämä muutos on havaittavissa laajemmin koko tieteen alalla. Kaikki tiedesuuntaukset ovat muuttumassa enemmän algoritmiseen suuntaan. Tämä johtuu osin biologian noususta tieteessä ja myös komputaation teorian sekä tietokoneiden laskentatehon noususta. Myös matematiikka on kääntynyt tähän suuntaan. Gregory Chaitin (2012).

Kompleksisuustaloustiede ei ole neoklassisen taloustieteen erityisosa, vaikka toisaalta tasapainotiloihin keskittyvä taloustiede on epätasapainotilojen erityisosa ja näin ollen kompleksisuustaloustiedettä. Kompleksisuustaloustieteen voidaan sanoa olevan taloustiedettä yleisemmällä tasolla. Tasapainotilat tulevat pysymään hyödyllisenä välinenä mallien rakentamisessa, mutta se ei silti pysty mallintamaan kaikkia talouden ilmiöitä, kun siirrytään pois tasapainotiloista.



Kompleksisuustaloustiede on vielä aikaisessa vaiheessa ja monet taloustieteilijät ovatkin ajan myötä luomassa sille uutta suuntaa. Kompleksisuustaloustieteen avulla voidaan mallintaa taloutta, joka vaiheittain keksii itseään uudelleen ja on vaiheittain aina muutoksessa. Sen avulla voidaan mallintaa taloutta, joka ei ole kuollut, staattinen ja ajaton, vaan taloutta, joka on orgaaninen, elävä ja täynnä muutosta.

Viime aikoina kompleksisuustaloustiedettä on myös alettu hyödyntämään enemmän taloudellisten mallien luonnissa ja systemaattisten riskien tulkinnassa rahoituksellisissa järjestelmissä.

## 5 LAINATUT LÄHTEET

Andreas Flache, M. W. (2011). Local Convergence and Global Diversity . *Journal of Conflict Resolution*.

Arthur, B. (1989). Competing Technologies, Increasing Returns, and Lock-In by Historical Events. *Economic Journal*, 116-131.

Arthur, B. (1994). Bounded Rationality and Inductive Behavior. *American Economic Review Papers and Proceedings*, 406-411.

Arthur, B. (1999). Complexity and the economy. *Science*, 107-109.

Arthur, B. (2009). *The Nature of Technology: What it Is and How it Evolves*. New York: Free Press.

Arthur, B. (2015). Complexity Economics: A Different Framework for Economic Thought. Teoksessa B. Arthur, *Complexity and the economy* (ss. 1-30). New York: Oxford University Press.

Axtell, R. (2015). Endogenous Dynamics of Multi-Agent Firms. *GMU Working Paper in Economics No. 16-39*.

Beinhocker, E. D. (2007). *The origin of wealth*. London: Random House.

Brian Arthur, J. H. (1997). Asset Pricing under Endogenous Expectations in an Artificial Stock Market. *Economic Notes*, 297-330.

Brock, W. J. (1992). Simple Technical Trading Rules and the Stochastic Properties of Stock Returns. *Journal of Finance*, 1731–1764.

Cimini, G. (2015). Systemic Risk Analysis on Reconstructed Economic and Financial Networks. *Scientific Reports*.

- Farmer, C. A. (2015). The dynamics of the leverage cycle. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 155-179.
- Heesterbeek H, A. R.-S. (2015). Modeling infectious disease dynamics in the complex landscape of global health. *Science*.
- Hommes, C. (2013). *Behavioral Rationality and Heterogeneous Expectations in complex economic systems*.
- Kahneman, A. T. (1979). Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk. *Econometrica*, 263-292.
- LeBaron. (2006). Handbook of Computational Economics vol.2. *Handbook of Computational Economics vol.2*, 1187-1233.
- Lin, T. C. (2012). A Behavioral Framework for Securities Risk. *Seattle University Law Review* , 325-378.
- Lindgren, K. (1991). Evolutionary Phenomena in Simple Dynamics. *Artificial Life 2*, 295-312.
- Lucas, R. (1976). Econometric policy evaluation: A critique. *Carnegie-Rochester Conference Series on Public Policy*, 19-46.
- Marten Scheffer, S. R. (2012). Anticipating Critical Transitions. *Science*, 344-348.
- May RM, L. S. (2008). Complex systems: ecology for bankers. *Nature*.
- Saracco, F. D. (2016). Detecting early signs of the 2007-2008 crisis in the world trade. *Scientific Reports*.
- Schumpeter. (1911). The Theory of Economic Development. *Oxford University Press*.

- Smith, A. (1776). *An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations*. London: W. Strahan and T. Cadell.
- Solow, R. (1957). Technical Change and the Aggregate Production Function. *Rev. Economics and Statistics*, 312-320.
- Stefan Thurner, J. D. (2012). Leverage causes fat tails and clustered volatility. *Journal of Economic Dynamics and Control*.
- Stefano Battiston, J. D. (2016). Complexity theory and financial regulation. *Science*.
- Stefano Battiston, M. P. (2012). DebtRank: Too Central to Fail? Financial Networks, the FED and Systemic Risk. *Scientific Reports*.
- Stefano Battistona, D. D. (2012). Liasons dangereuses: Increasing connectivity, risk sharing and systematic risk. *Journal of Economic Dynamics and Control*.
- T. Bao, C. H. (2015). Bubble formation and (in)efficient markets in learning-to-forecast and –optimize experiments. *Working paper Tinbergen institute*.
- T. Bao, C. H. (2015). When speculators meet constructors: Positive and negative feedback in experimental housing markets. *Working paper University of Amsterdam*.
- Yunfei Hou, F. L. (2017). Characterizing Complexity Changes in Chinese Stock Markets by Permutation Entropy. *Entropy*, 1-10.