



Juuso Otto Martti Haapalainen

TEKOÄLYN MERKITYS TALOUSKASVULLE

Pro gradu -tutkielma

Taloustiede

Elokuu 2023

Yksikkö Taloustiede			
Tekijä Haapalainen Juuso Otto Martti		Työn valvoja Mikko Puhakka	
Työn nimi Tekoälyn merkitys talouskasvulle			
Oppiaine Taloustiede	Työn laji Pro-Gradu	Aika Elokuu 2023	Sivumäärä 57
Tiivistelmä			
<p>Teknologinen kehitys on ajautunut siihen pisteeseen, jossa tekoäly on jo varteenotettava talouskasvun ajuri. Tämä kehitys kuvastaa tilannetta, jossa tekoäly voi auttaa maailman talouksia kehittymään ennennäkemätöntä vauhtia, mutta myös aiheuttaa tietynlaisia uhkakuvia. Tähänastinen kehityksemme on vaikuttanut niin tuottavuuteen, työmarkkinoihin kuin innovaatioihinkin. Mutta erot kokonaistuotannossa ovat silti todella suuria eri maiden välillä. Tekoälyn vaikutukset talouteemme ovat siis laajoja, mutta ne eivät jostain syystä tavoita vielä kaikkia maapallolla. Tämä tutkielma on keskittynyt selvittämään teknologisen kehityksen sekä tekoälyn vaikutuksia taloutteen tuottavuuden, työllisyyden sekä innovaatioiden osalta. Myös taloudellinen singulariteetti nousee keskiöön.</p> <p>Tutkielman tarkoituksena on käydä läpi talouskasvuun vaikuttavat tekijät teknologian, tuottavuuden, työmarkkinoiden ja innovaatioiden näkökulmasta sekä perehtyä mihin asti teknologiamme voikaan kehittyä. Niin sanottu taloudellinen singulariteetti on nykypäivänä aiheellinen käsite, mutta voimmeko oikeasti päätyä pisteeseen, jossa jokin ihmisen tekemä keksintö jää ihmisen viimeiseksi keksinnöksi. Tutkielmassa käytetty kirjallisuus on haettu Oulun yliopiston käyttämistä tietokannoista koskien teknologista muutosta, tekoälyä sekä talouskasvua. Kirjallisuuden sekä artikkeleiden perusteella on esitetty, miten talouskasvu on kehittynyt viime- sekä tällä vuosituhanella ja mitä voisi olla odotettavissa tulevaisuudessa tekoälyn kehityksen myötä.</p> <p>Tekoälyn vaikutukset talouskasvuun ovat ajankohtainen aihe aina poliittisesta päätöksenteosta lähtien. Taloustieteessä aihe on noussut esille myös aikaisemminkin, mutta tutkimuksen kohdistuminen tähän aihealueeseen on lisääntynyt merkittävästi tällä vuosituhanella. Teknologinen kehitys ja tekoäly tulevat koskettamaan tulevaisuudessa meidän koko yhteiskuntaa jokaisella asteella. Pahimmassa tai parhaimmassa tapauksessa kehitys voi johtaa lopulta taloudelliseen singulariteettiin, josta paluuta entiseen ei enää ole.</p>			
Asiasanat Tekoäly, talouskasvu, automaatio, tuottavuus, singulariteetti, työmarkkinat, innovaatiot			

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	5
2	TUOTANNON AUTOMAATIO	8
	2.1 Automaatio sekä Baumolin kustannustauti.....	10
	2.2 Teknologinen kehitys ja erot tuottavuudessa maiden välillä.....	15
3	TALOUSKASVU AUTOMAATION KESKELLÄ	20
	3.1 Singulariteetti taloustieteessä.....	21
	3.2 Kysyntäpuolen kasvueuforia.....	25
	3.3 Tarjontapuolen singulariteetti.....	31
	3.4 Etenemmekö kohti singulariteettia?.....	34
4	TEKOÄLY, TYÖMARKKINAT JA INNOVAATIOT	37
	4.1 Tekoälyn vaikutukset työmarkkinoihin.....	38
	4.2 Tekoälyn vaikutukset innovaatioihin.....	42
5	JOHTOPÄÄTÖKSET	48
	LÄHTEET	54

KUVIOT

Kuvio 1. Havainnollistus tuotannon kehityksestä käyttäen manuaalista- tai teollista teknologiaa (Zeira, 1998).....	19
Kuvio 2. Kokonaistuotoksen suuruus tuotannon a funktiona (Zeira, 1998). 19	19
Kuvio 3. Baumolin vaikutus tietyille hyvin mitatuille toimialoille (Nordhaus, 2021).	30
Kuvio 4. Kasvumallin simulointi, jossa pääoman teknologinen muutos on nopeaa ja työvoiman sekä pääoman välinen substituuatio on joustavaa. (Nordhaus, 2021.)	33
Kuvio 5. Automatisaation uhkaamat työpaikat OECD-maissa (prosenttia työpaikoista) (Kauhanen, 2016).	39
Kuvio 6. Työpaikkojen tuhoutuminen sekä syntyminen yrityssectorilla Suomessa vuosivälillä 1989–2011 (Asplund & Kauhanen, 2018).....	40
Kuvio 7. Ammattirakenteiden muutokset Suomessa vuosivälillä 1997–2015 (Asplund & Kauhanen, 2018).....	41

TAULUKOT

Taulukko 1. Henkilökohtaisten kulutusmenojen log-hinnan kerroin yhtälössä (Nordhaus, 2021).	28
Taulukko 2. Suhteellisten hintojen ja osuuksien keskimääräinen muutos Yhdysvalloissa kuuden eri informaatioteknologia sektorin osalta vuosivälillä 1990–2012 (Nordhaus, 2021).	29
Taulukko 3. Kuuden eri singulariteettitestin tulokset (Nordhaus, 2021).	35

1 JOHDANTO

Tämä tutkielma käsittelee tekoälyn ja teknologian vaikutusta talouskasvuun. Tekoäly voidaan kuvata laitteen tai koneen kykynä imitoida sekä suorittaa ”älyllistä” käyttäytymistä. Tällainen määritelmä herättää tietysti perustavanlaatuisia taloudellisia kysymyksiä, kuten mitä tapahtuisi, jos tekoäly mahdollistaisi jatkuvasti kasvavan määrän tehtäviä suoritettavan automaattisesti, joita ihmiset ovat aiemmin suorittaneet? Tekoälyä voidaan käyttää tavallisten tuotteiden sekä palveluiden tuotantoon, mikä mahdollisesti vaikuttaa taloudelliseen kasvuun, mutta myös tulojen osuuksiin. Mutta tekoäly voi myös luoda meille uusia prosesseja tuottaa ideoita ja teknologioita, jotka auttavat ratkaisemaan entistä monimutkaisempia ongelmia sekä skaalaamaan luovaa työskentelyä. On myös huomioitava, että osa tutkijoista on tuonut esille näkökulman, jossa tekoälystä tulisi todella nopeasti itsekehittyvä kokonaisuus, joka voisi johtaa niin sanottuun taloudelliseen singulariteettiin. (Aghion, F. Jones & I. Jones, 2018.) Tämänkaltainen singulariteetti kuvaisi tilannetta, jossa tekoäly olisi kehittynyt niin pitkälle, että se johtaisi rajoittumattomaan taloudelliseen kasvuun tai koneiden ”oppimiseen” tietyssä aikaikkunassa (Good 1965; Vinge 1993; Kurzweil 2005).

Jos haluamme ymmärtää miten tekoäly vaikuttaa talouteemme, pitäisi meidän miettiä traktoria. Tällä ”vaatimattomalla” keksinnöllä kesti kauan aikaa ennen kuin se teki vaikutuksen ihmisiin. Yhdysvalloissa vielä 1950-luvulla vain alle puolella maataloista oli traktoreita. Spekulaatiot tekoälyn seurauksista työpaikoille, tuottavuudelle ja elämänlaadulle käyvät nyt kiivaimpana kuin koskaan aiemmin. Teknologia herättää ihmisissä kunnioitusta, mutta silti sen taloudelliset vaikutukset jäävät vähäisiksi, elleivät miljoonat yritykset piilaakson kaltaisten teknologiakeskusten ulkopuolella ota sitä käyttöönsä. Tämä tarkoittaa paljon muutakin kuin satunnaista chatbottien käyttämistä. Se merkitsisi yritysten ja niiden sisäisten tietojen täysimittaista uudelleenorganisointia. Nancy Stokey Chicagon Yliopistosta mainitsee, että teknologisten parannusten leviäminen on todennäköisesti yhtä ratkaisevaa kuin innovointi pitkän aikavälin kasvun kannalta. (The Economist Newspaper, 2023.)

Vuosikymmenien ajan innokkaat teknologia-asiantuntija ovat väittäneet, että tekoäly tulee mullistamaan yritysmaailman ja tuo valtavia hyötyjä niin yrityksille kuin asiakkaillekin. Konsulttiyritys McKinseyn tekemän tutkimuksen mukaan vuonna 2022

50 prosenttia yrityksistä eri puolilla maailmaa oli yrittänyt käyttää tekoälyä jollakin tavalla. Vielä vuonna 2017 tämä luku oli 20 prosenttia. Uudet yleiskäyttöiset teknologiat siirtyvät nopeasti laboratorioista oikeaan maailmaan, kuten vaikkapa Chatgpt, joka on herättänyt huomioita sen kyvyillä auttaa ihmisiä mitä erikoisimmissa asioissa ja selittää tieteellisiä käsitteitä. (The Economist Newspaper, 2022.)

Tässä tutkielmassa keskiöön nousee miten tekoäly vaikuttaa sekä voisi vaikuttaa taloudelliseen kehitykseen, ja mitä ongelmia se voi aiheuttaa. Myös singulariteetti, sen mahdollinen synty sekä siihen johtavat tekijät ovat mukana tässä tutkielmassa. Keskitymme vastaamaan seuraaviin kysymyksiin:

- Jos tekoäly kasvattaa automaation tasoa, miten se vaikuttaa talouskasvuun?
- Voiko tekoäly johtaa kohtuuttomaan kasvuun ja täten singulariteetteihin?
- Mitkä ovat tekoällyn vaikutukset työmarkkinoihin ja työntekijöiden kysyntään?
- Miten tekoäly ja talouskasvu näkyvät yritysten harkinnassa innovoida sekä miten nämä vaikuttavat organisaatioiden rakenteeseen?

Pohtimalla näitä kysymyksiä voimme jakaa tutkielman kahteen teemaan. Ensimmäiseksi pohdimme tekoällyn tuomaa automaatiota aina höyrymoottoreista nykyisiin mikrosiruihin, miten automaation kasvaminen on auttanut tuottavuutta ja tätä kautta talouskasvua aina teollisesta vallankumouksesta saakka. Tätä näkökulmaa tuon pääasiallisesti Aghion, F. Jones & I. Jones (2018), julkaisusta ”Artificial Intelligence and Economic Growth”. Toinen teema tutkielmassa on tekoällyn kasvusta aiheutuvat seuraukset ja miten tämä voi vaikuttaa yritysten toimintaan. Onko singulariteetti aiheellinen uhkakuva ja voiko jokin laite olla jossain vaiheessa ihmisen viimeinen keksintö? Tähän liittyen myös Baumolin (1967) ”cost disease” nousee esille. Aiempaa tutkimusta tekoälystä ja sen vaikutuksista talouteen sekä työllisyyteen tuodaan esille jo aiemmin mainitun Aghionin, F. Jonesin ja I. Jonesin (2018) tutkimuksen lisäksi Zeiran (1998) tutkimuksesta ”Workers, Machines and Economic Growth”, jonka pääpaino on talouskasvun ja teknologisen omaksumisen mallissa.

Acemoglun ja Restrepon tutkimuksesta” The Race between Man and Machine: Implications of Technology for Growth, Factor Shares and Employment”, joka keskittyy teknologian vaikutuksiin työllisyydessä sekä Kauhasen (2016) tutkimuksesta ”Uusi työnjako. Robotit töihin”. Innovaatioihin ja tekoälyyn pohjautun suurilta osin Cockburnin, Hendersonin, Sternin (2018) tutkimukseen ”The Impact of Artificial Intelligence of Innovation”. Nämä kyseiset tutkimukset ovat pääosassa tässä tutkielmassa, mutta myös useita muita tutkimuksia ja artikkeleita on mukana. Perehdyn näiden pohjalta tekoälyyn, sen laajamittaisiin vaikutuksiin taloudessamme ja mitä se tuo mukanaan.

2 TUOTANNON AUTOMAATIO

Viimeisen 150 vuoden aikana taloudellista kehitystä on ajanut suurilta osin automaatio sekä teknologinen kehitys. Teollisesta vallankumouksesta lähtien kehitys on johtanut höyrymoottoreihin, jonka jälkeen se on edistynyt tuotantoprosessien sähköistymiseen aina nykypäivän puolijohteisiin sekä mikropiireihin. Tähän viitaten, voi hyvin olla, että seuraava kehityksen vaihe on tekoäly. Tekoäly onkin luonnollinen jatkumo jo keksityille autopiloteille sekä tietokoneohjatuille moottoreille. Nykypäivän automaailmaa johtaakin sähköistyminen voimalinjassa sekä kuljettajaa avustavat järjestelmät aina adaptiivisista vakionopeudensäätimistä itse ohjautuvuuteen. Tähän mennessä tekoäly on lähinnä auttanut meitä rutiininomaisissa ja vähäistä taitoa vaativissa tehtävissä, mutta suunta on enenevässä määrin ei-rutiininomaisiin sekä kognitiivisia kykyjä vaativiin tehtäviin, joita ovat tähän saakka suorittaneet kyvykkäät työntekijät. Näkökulmana tässä on hyödyllistä se, että voimme käyttää historiallista tietoa hyväksi arvioidessamme mitä kaikkea tekoäly voi tulevaisuudessa tuoda meille kehityksen jatkuessa tällaisena (Aghion, F. Jones & I. Jones, 2018).

Zeira (1998), esittelee selkeän ja elegantin mallin automaatiolle ja talouskasvulle. Malli on yksinkertaisimmassa muodossa ja tuotantofunktio on seuraavanlainen:

$$Y = AX_1^{a_1} AX_2^{a_2} \dots \cdot X_n^{a_n}, \text{ jossa } \sum_{i=1}^n a_i = 1. \quad (1)$$

Kyseisessä mallissa Zeira (1998), olettaa X_i : t hyödykkeiksi, mutta otan tässä mallia Acemoglun ja Autorin (2011) tulkinnasta, ja viittaan näillä tehtäviin. Molemmilla tulkinnoilla on puolensa, ja käytän tässä molempia hyväksi. Tehtävät, joita ei olla vielä automatisoitu, voidaan tuottaa yksi yhteen ihmistyövoimalla. Tehtävät, jotka on automatisoitu, voidaan työvoiman sijasta käyttää yhtä yksikköä pääomaa:

$$X = \begin{cases} L \text{ ei automatisoitu} \\ K \text{ automatisoitu} \end{cases} \quad (2)$$

Jos yhteenlaskettu pääoma K ja työvoima L on kohdistettu näille tehtäville optimaalisesti, voidaan tuotantofunktio esittää muodossa:

$$Y_t = A_t \cdot K_t^a \cdot L_t^{1-a} \quad (3)$$

Tässä funktiossa eksponentti a kuvaa automatisoitujen tehtävien tärkeyttä sekä määrää. Kohtelen eksponentti a : ta vielä tässä vaiheessa vakiona ja käytän vertailevaa statiikkaa, joka kasvattaa automatisoitujen tehtävien määrää.

Seuraavassa vaiheessa sovitan tämän mallinnuksen tavalliseen uusklassiseen kasvun malliin, jossa vakiona toimii investointien määrä. Tuotantomaksujen osuus, joka menee pääomaan, on kuvattu a : na ja pitkän aikavälin kasvutahti kaavalle $y \equiv Y / L$ on:

$$g_y = \frac{g}{1-a}, \quad (4)$$

jossa g on A : n kasvutahti. Täten, automaation lisääntyminen kasvattaa pääoman osuutta a , mutta myös pitkän aikavälin kasvuvauhtia, koska pääoman kertymiseen vaikuttaa siihen liittyvä kerroinvaikutus.

Zeira (1998) painottaa, että automaatio on ollut osana tuotantoa ainakin teollisesta vallankumouksesta saakka ja hänen hienostunut malli auttaa meitä ymmärtämään tämän. Vahvat oletukset kasvuvauhdin sekä pääoman osuuksista jatkuvasti nousevina automaation lisääntyessä ovat kuitenkin Kaldorin (1961) mallia vastaan, jossa pääoman osuudet sekä kasvuvauhti pysyvät suhteellisen vakaina ajan kuluessa. Tämä vakaus kuvaa erityisesti Yhdysvaltain taloutta 1900-luvulla. Zeiran mallinnusta tuleekin parantaa, jotta se vastaa historiallisia todisteita, joita meillä on käytössämme.

Acemoglu & Restrepo (2016), esittävät tälle ongelmalle toisenlaisen ratkaisun. Heidän ympäristönsä mahdollistaa jatkuvan substituutiojoustavuuden (CES) tuotantofunktion ja kehittää sisäisesti tehtävien määrän, kuin myös automaation. He olettavat, että tutkimus voi suuntautua kahteen eri suuntaan. Joko löytää keino automatisoida jo olemassa oleva tehtävä tai löytää kokonaan uusia tehtäviä, joita voitaisiin käyttää tuotannossa. Heidän asetelmassaan a kuvaa pientä osaa tehtävistä, jotka on automatisoitu. Tämä johtaa heidät korostamaan yhtä mahdollisuutta, joka Zeiran mallista puuttui. Ehkä muodostamme uusia tehtäviä samaan tahtiin, kuin saamme

automatisoitua aiempia tehtäviä. Automatisoitujen tehtävien lukumäärä olisi vakio, joka johtaisi tasaiseen kasvuvauhtiin.

Tämän aiheen kirjallisuus on lisääntynyt nopeasti ja myös näitä on nostettava esille. Peretto & Seater (2013) tarkastelevat eritoten tutkimustekniikkaa, jonka avulla organisaatiot voisivat muokata eksponentin arvoa Cobb-Douglas tuotantofunktiossa. Vaikka he eivät korosta yhteyttä Zeiran malliin, ovat yhteydet tarkemmin tarkasteltuna mielenkiintoisia heidän ja Zeiran mallin kesken. Hemousin & Olsenin (2016) malli keskittyy CES tuotantofunktioon Cobb-Douglasin sijaan, mutta painottavat heidän viitekehyksessään palkkojen epätasa-arvoisuutta kyvykkäiden ja vähemmän kyvykkäiden työntekijöiden välillä. Seuraavassa osiossa paneudumme tämän kirjallisuuden sekä Zeiran mallinuksien avulla Baumolin vaikutukseen ja ymmärtämään tämän aiheuttamia rakenteellisia muutoksia.

2.1 Automaatio sekä Baumolin kustannustauti

Vuonna 1966 William J. Baumol ja William G. Bowen julkaisivat kirjan nimeltä *Performing Arts: The Economic Dilemma*. Heidän kirjansa oli todella merkityksellinen ja on yleisesti hyväksytty, että taiteen taloustiede on saanut pohjansa tuosta kirjasta. Tämä taloustieteellinen pulma, jota Baumol & Bowen kuvasivat, oli rahoitukseen liittyvä ongelma taiteiden maailmassa, jossa yksikkökustannukset nousivat väistämättä. He väittivät, että tämä oli seurausta tuottavuuden laahaamisesta. Tästä seurannut kustannuspaine on tullut tunnetuksi nimellä ”Baumol’s cost disease” (Heilbrun, 2003.)

Ekonomistit kuvaavat tuottavuuden fyysisenä tuotoksena suoritettua työtuntia kohden. Tuottavuuden kasvu ajan kuluessa voi seurata seuraavista tekijöistä; työntekijän pääoman kasvusta, kehittyneemmästä teknologiasta, lisääntyneestä ammattitaidosta, paremmasta johtamisesta ja mittakaavaeduista. Kuten tämä lista osoittaa, tuottavuuden kasvu on helpoimmin saavutettavissa aloilla, joilla käytetään paljon koneita sekä laitteita. Esittävä taide on spektrin toisesta päästä verrattuna paljon koneita käyttäviin aloihin. Tämä ei kuitenkaan pois sulje sitä, etteikö teknologian kehittyminen olisi

auttanut esittävien taiteiden toimialaa ollenkaan. Esimerkkinä tästä voisi olla vaikkapa lavavalaistus, joiden elektronin ohjaaminen on kehittynyt sekä ilmastointi ja ilmanvaihto, joka on mahdollistanut pidemmät esitykset yleisön mukavuuden lisääntyneenä. Mutta nämä kehityksen askeleet eivät ole keskeisiä esittävän taiteen liiketoiminnassa. Baumol & Bowen huomauttavat, että 'tuotannon' olosuhteet tekevät tuottavuuden kasvun mahdottomaksi tällä toimialalla. Esiintyjän työ on tällä toimialalla sinänsä se päämäärä, eikä sitä voi välineistää jonkin asian tuottamiseen. Esiintyjän työ on itse tuotos, eikä täten tuottavuutta ole mahdollista parantaa. Laulajan laulua tai tanssijan tanssia on mahdotonta parantaa siten, että sen tuotos työtuntia kohden kasvaisi (Heilbrun, 2003.)

Baumol (1967) havaitsi, että toimialat, jotka ovat kokeneet nopeaa tuottavuuden kasvua, kuten maatalous ja teollisuus, menettävät usein osuuttaan bruttokansantuotteesta. Vastaavasti aloilla, joilla tuottavuuden kasvu on ollut suhteellisen hidasta, kuten palvelualat, ovat kasvattaneet osuuksiaan bruttokansantuotteesta. Tämän seurauksena voi olla, että taloudellinen kasvu olisi rajoittunut ennemminkin siitä, mikä on tärkeää ja vaikeasti kehitettävää, kuin siitä mitä me pystymme tekemään tuottavasti. Aghion, F. Jones & I. Jones (2018) ehdottavat, että automaatio ja tekoäly voivat olla rajoittuneita Baumolin kustannustaudin seurauksena, ja että yhdistämällä tämä ominaisuus kasvusta automaation kanssa, voitaisiin saada täyteläinen kuvaus kasvuprosessista. Kustannustauti viittaakin tilanteeseen, jossa suhteellisen hitaan kasvuvauhdin toimialoista tulisi entistä tärkeämpiä meidän taloudessamme.

Kuten edellisessä kappaleessa jo todettiin, on nopeasti tuottavuuttaan kehittäneiden toimialojen osuudet bruttokansantuotteesta pienentyneet, on myös esimerkiksi maatalouden osuus työllisyydestä lähentymässä nolaa. Tämän lisäksi teollisuuden osuudet ovat laskusuunnassa monissa maissa. Automaatio ehkä kasvattaa pääoman määrää näillä toimialoilla, mutta se myös ajaa tuotantoa sekä kulutusta alaspäin koko bruttokansantuotteesta. Yhteenlaskettu pääoman osuus on tällöin nousevien pääomaosuuksien saldo niin maataloudessa, teollisuudessa kuin automatisoiduissa tuotteissa, jolloin näiden tuotteiden osuus koko bruttokansantuotteesta laskee (Aghion, F. Jones & I. Jones, 2018.)

Katsoessa kohti tulevaisuutta teknologioiden kehityksen osalta, on 3D tulostus sekä nanoteknologia jo tässä vaiheessa suhteellisen kehittyneitä. Ehkä jonain päivänä nämä teknologiat mahdollistavat tuotannon alkamaan molekyylien tai jopa atomien tasolta, joka automatisoisi kaiken tuotannon. Olisiko tekoälyn ja teknologian mahdollista tehdä sama myös palvelualoille ja miten tällainen talouskasvu esiintyisi meille. (Aghion, F. Jones & I. Jones, 2018.) Seuraavassa osiossa laajennan Aghionin, F. Jonesin & I. Jonesin (2018) näkemyksen mukaan Zeiran (1998) ja Acemoglun & Restrepon (2016) malleja, jotta näiden päälle saataisiin kehitettyä viitekehys, joka olisi johdonmukainen suurien rakenteellisten muutosten kanssa.

Aghion, F. Jones & I. Jones (2018) tutkivat mahdollisuutta, jossa automaatio olisi taustalla vaikuttava voima Baumolin kustannustaudille. Seuraavassa mallissa bruttokansantuote on CES yhdistelmä tuotteita, joiden substitutiojoustavuus on alle yhden.

$$Y_t = A_t \left(\int_0^1 x_{it}^p di \right)^{\frac{1}{p}}, \text{ jossa } p > 0, \quad (1)$$

tässä $A_t = A_0 e^{gt}$ kuvaa teknologista muutosta, jonka oletetaan toistaiseksi olevan ulkopuolelta tulevaa. Kun substitutiojoustavuus on alle yhden, ovat tehtävät keskenään komplementteja. Intuitiivisesti tämä on ”heikon lenkin” tuotantofunktio, jossa bruttokansantuote on rajoittunut heikoimman tuotantomuodon takia. Tässä mallinnuksessa nämä heikoimmat tuotantomuodot ovat tehtäviä, jotka suoritetaan perinteisellä työvoimalla, ja tämä rakenne on Baumolin vaikutuksen lähde. (Aghion, F. Jones & I. Jones, 2018.)

Kuten myös Zeiran tutkimuksissa, toinen mahdollisuus teknologialle muutokselle on automaatio tuotannossa. Hyödykkeet, joiden valmistusta ei olla vielä automatisoitu, voidaan valmistaa yhden suhteella yhteen työvoiman kanssa. Kun näiden hyödykkeiden valmistus automatisoidaan, voidaan työvoiman tilalta käyttää yhtä yksikköä pääomaa:

$$X_{it} = \begin{cases} L_{it} & \text{ei automatisoitu} \\ K_{it} & \text{automatisoitu} \end{cases} \quad (2)$$

Tämä jako on tarkka mallin pitämiseksi yksinkertaisena. Vaihtoehtoisena ratkaisuna voisi toimia se, että hyödykkeet tuotettaisiin Cobb-Douglas yhdistelmällä pääomaa ja työvoimaa, ja kun hyödykkeen tuotanto olisi automatisoitu, tuotettaisiin sitä niin sanotusti suuremmalla pääoman eksponentilla. (Aghion, F. Jones & I. Jones, 2018.)

Loppuosa tästä mallista on uusklassista:

$$Y_t = C_t + I_t, \quad (3)$$

$$\dot{K}_t = I_t - \delta K_t, \quad (4)$$

$$\int_0^1 K_{it} di = K_t, \quad (5)$$

$$\int_0^1 L_{it} di = L. \quad (6)$$

Aghion, F. Jones & I. Jones (2018) olettavat mallissa, että työvoiman saatavuus on kiinteää yksinkertaisuuden vuoksi. He esittävät mallin siten, että β_t on automatisoitujen hyödykkeiden osuus ajanjaksosta t lähtien. Seuraavaksi he olettavat, että pääoma sekä työvoima on jaettu tasaisesti kaikkien tehtävien kesken. Täten, K_t / β_t kuvaa yksikköä pääomaa, jonka verran käytetään automatisoiduissa tehtävissä, ja $L / (1 - \beta_t)$ yksikköä työvoimaa, jota käytetään ei-automatisoiduissa tehtävissä. Tuotantofunktio voidaan siis kirjoittaa heidän mukaansa seuraavalla tavalla:

$$Y_t = A_t \left[\beta_t \left(\frac{K_t}{\beta_t} \right)^\rho + (1 - \beta_t) \left(\frac{L}{1 - \beta_t} \right)^\rho \right]^{\frac{1}{\rho}} \quad (7)$$

Noudattamalla automaation ehtoja, voidaan kaava yksinkertaistaa muotoon:

$$Y_t = A_t (\beta_t^{1-\rho} K^\rho + (1 - \beta_t)^{1-\rho} L^\rho)^{\frac{1}{\rho}} \quad (8)$$

Tämä järjestely pelkistyy tiettyyn mallinnukseen uusklassisesta kasvumallista ja resurssien allokointi voidaan hajauttaa normaaliin kilpailukykyiseen tasapainotilanteeseen. Tässä tasapainossa automatisoitujen hyödykkeiden osuus bruttokansantuotteesta on yhtä suuri kuin pääoma tuotantomaksuista.

$$a_{Kt} \equiv \frac{dY_t}{dK_t} \frac{K_t}{Y_t} = \beta^{1-p} A_t^\rho \left(\frac{K_t}{Y_t} \right)^\rho \quad (9)$$

Samankaltaisesti, ei-automatisoitujen hyödykkeiden osuus bruttokansantuotteesta vastaa työntekijöiden osuutta tuotantomaksuista.

$$a_{Lt} \equiv \frac{dY_t}{dL_t} \frac{L_t}{Y_t} = \beta_t^{1-\rho} A_t^\rho \left(\frac{L_t}{Y_t} \right)^\rho \quad (10)$$

Näin ollen automatisoitujen hyödykkeiden suhde ei-automatisoituihin hyödykkeisiin vastaa seuraavaa:

$$\frac{a_{Kt}}{a_{Lt}} = \left(\frac{\beta_t}{1-\beta_t} \right)^{1-\rho} \left(\frac{K_t}{L_t} \right)^\rho \quad (11)$$

Viimeisin yhtälö kertoo meille, että on kaksi perusvoimaa, jotka liikuttavat pääomaosuutta taloudessa. Ensiksi korotus automatisoitujen hyödykkeiden osuudessa β_t lisää myös automatisoitujen hyödykkeiden osuutta bruttokansantuotteessa ja kasvattaa pääomaosuutta, kun K/L pidetään vakiona. Tämä on intuitiivista ja toistaa samaa logiikkaa, jota on myös Zeiran mallissa. Toiseksi, kun K/L nousee, pääomaosuus sekä automatisoidun sektorin arvo osuutena bruttokansantuotteesta laskee. Pääasiallisesti, kun substituutiojoustavuus on alle yhden, on dominoivana voimana hintavaikutus. Automatisoitujen hyödykkeiden hinta laskee suhteessa ei-automatisoituihin hyödykkeisiin pääoman kertymisen vuoksi. Koska kysyntä on suhteellisen joustamatonta, myös näiden hyödykkeiden meno-osuus pienenee. Tuotannon automaatio ja Baumolin kustannustauti liittyvät täten tiiviisti toisiinsa. Ehkä automaatio saa aikaan todella nopeaa kasvua maataloudessa ja tuotannossa ja aiheuttaa siten näiden toimialojen osuuksien pienentymisen bruttokansantuotteessa. Tärkeintä on, että näiden kahden voiman välillä on meneillään kilpajuoksu. Kun

enemmän ja enemmän sektoreita automatisoituu, β_t kasvaa, ja tällä on tapana myös kasvattaa automatisoitujen hyödykkeiden sekä pääoman osuutta. Mutta koska nämä automatisoidut hyödykkeet kokevat nopeampaa kasvua, niiden hinnat laskevat ja alhainen substituutiojoustavuus saa niiden osuuden bruttokansantuotteesta laskemaan. (Aghion, F. Jones & I. Jones, 2018.)

Acemoglun & Restrepon (2016) tavoin, voisimme olettaa, että automaatio olisi sisäsyntyistä ja voisimme määritellä teknologian, jossa tutkimustyö johtaisi hyödykkeiden automatisaatioon. Mutta on suhteellisen selvää riippuen siitä miten määrittelimme tämän teknologian, $\beta_t / (1-\beta_t)$ voi nousta tai laskea nopeammin kuin $(K_t / L_t)^p$ laskee. Tämä tarkoittaa, että tulos riippuisi vahvasti yksityiskohtaisista oletuksista automaatiota kohtaan, ja meillä ei ole vielä tarvittavaa tietämystä tehdä näitä oletuksia. Tämä on tärkeä tutkimuksen suunta tulevaisuutta ajatellen, mutta vielä tässä vaiheessa, kohtelemme automaatiota ulkopuolelta tulevana ja pohdimme mitä tapahtuu, kun β_t muuttuu eritavoilla. (Acemoglu & Restrepo 2016; Aghion, F. Jones & I. Jones 2018.)

2.2 Teknologinen kehitys ja erot tuottavuudessa maiden välillä

Kuten jo aiemmin on todettu, on teknologisella kehityksellä ollut merkittävä rooli talouskasvussa aina teollisesta vallankumouksesta saakka. Joseph Zeira (1998) esittää tutkimuksessaan teknologian kasvun vaikutuksia talouskasvuun ja puhuu taloustietelijöiden analyysin siirtymisestä enemmän sisäsyntyisen teknologian syntyyn ja minkälaisia vaikutuksia tällä on. Huomio on keskittynyt vähemmän teknologioiden leviämiseen ja niiden käyttöönottoon. Koska monet maat ottavat teknologiat käyttöön ja käyttävät niitä, sen sijasta, että he itse kehittäisivät niitä, tulisi meidän ymmärtää maiden välisiä eroja tuottavuudessa sekä teknologioiden käyttöönottoa paremmin. Zeira (1998) ehdottaa artikkelissa, että analyyseista koskien teknologioiden käyttöönottoa tulee paljon realistisempia ja ne johtavat mielenkiintoisiin tuloksiin, jos hylkäämme ajatuksemme teknologisista innovaatioista irrallisina asioina, jotka vähentävät kaikkia tuotannossa tarvittavia resursseja. Tämän sijasta meidän tulisi harkita teknologisia innovaatioita sellaisina asioina, jotka säästävät työvoimaa, mutta

lisäävät pääoman kulutusta esimerkiksi koneiden muodossa, tai muina tuotantopanoksina.

Zeiran (1998) tutkimus paneutuu tällaisten teknologioiden käyttöönottoon ja miten ne eivät ole enää kaikkialla hyödyllisiä. Tämä riippuu vahvasti tuotannontekijöiden hintatasosta kyseisessä maassa, jotka taas riippuvat maan parametreista, kuten tuottavuudesta ja korkotasosta. Tästä syystä jotkin maat voivat nähdä uusien teknologioiden käyttöönoton taloudellisesti ei-kannattavana, kun taas tuottavammat maat ottavat näitä teknologioita käyttöön. Syvemmälle mentäessä, tutkimus osoittaa, että tällä teknologioiden käyttöönoton oletuksella ja tuottavuuseroilla, voidaan selittää eri maiden välisiä suurakin bruttokansantuote per henkilö eroja. (Zeira, 1998.)

Zeiran pääidea hänen tutkimuksessaan on esitetty talouskasvun sekä teknologian omaksumisen mallilla, jossa työntekijät voitaisiin korvata koneilla. Tällaisessa mallissa viimeinen tuotos on tuotettu monella eri puolivalmisteella, joista kaikki voidaan valmistaa joko ”manuaalisella” teknologialla eli käsityöllä, tai teollisella teknologialla, kun sellainen on aluksi keksitty. Teknologian valinta valmistukseen riippuu vahvasti palkka- sekä korkotasosta. Korkeammat palkat houkuttelevat omaksumaan teollista teknologiaa, koska tämä auttaa vähentämään työvoimaa, kun taas korkeampi korkotaso alentaa teknologian omaksumista käyttöön. Zeira (1998) olettaa mallissaan, että korkotasot ovat yhtä suuret maasta riippumatta sekä tilanteessa vallitsee täysi pääoman liikkuvuus. Mutta palkkatasot ovat eriäviä maiden välillä ja niin myös teknologioiden omaksuminen. Tarkemmin ottaen, Zeira näyttää, että jotkin maat omaksuvat kaikki uudet teknologiset keksinnöt käyttöönsä, kun taas osa maista saattaa lopettaa uusien teknologioiden omaksumisen jossain pisteessä, pysyen teknologisesti ”alikehittyneinä”. Eri maiden väliset valinnat voivat vaihdella huomattavasti teknologioiden sekä tuotannontekijöiden välillä. Jos valmistajat omaksuvat enemmän teknologiaa, joutuvat he myös investoimaan enemmän pääomaa tuotantoon, jotta kaikki tarvittavat koneet ja laitteet saadaan käyttöön teknologiaa varten. Tämän seurauksena pääoman kustannus voi nousta liian suureksi, jotta teknologiaa lähdetäisiin omaksumaan. Täten teknologian valinta voidaan nähdä tärkeänä resurssien allokointia koskevana kysymyksenä tuotantofunktiossa, jossa pääoman määrä vaihtelee teknologian kanssa. (Zeira, 1998.)

Kokonaistuottavuudessa ilmenevien erojen pohtiminen eri maiden välillä on aina ollut mielenkiintoista ja hämmäntävää taloustieteilijöiden keskuudessa. Tämä pohdinta sekä muut taloudellisen kasvun rajoitteet ovat saaneet uutta kiinnostusta alleen 1990-luvun jälkeen. Lucas (1990) painottaa, että maailmassa, jossa pääoman liikkuvuus on vapaata, on bruttokansantuote erot per henkilö suuressa ristiriidassa perinteisten taloustieteellisten teorioiden kanssa. Hiljattaiset empiiriset tutkimukset kuitenkin osoittavat, että suuret tuotantoerot maiden välillä eivät vain ole olemassa tällä hetkellä, mutta ne myös tulevat pysymään olemassa olevina tulevaisuudessa (Zeira, 1998).

Useita tutkimuksia ja artikkeleita on kirjoitettu teknologian omaksumisesta ja miksi näissä on niin paljon eroja eri maiden välillä. Näistä muun muassa Grossman & Helpman (1991), Jovanovic & Lach (1991) ja Parente & Prescott (1994). Nämä tutkimukset kuitenkin sisältävät perusoletuksen teknologisista innovaatioista, jossa pienemmällä panoksella pystytään tuottamaan enemmän, ja siksi kaikkien tulisi omaksua nämä innovaatiot. Teknologian omaksumisen erot maiden välillä syntyisivät sen käyttöönottoon liittyvistä kustannuksista. Zeiran (1998) tutkimus taas olettaa, että käyttöönottoon ei sinänsä liittyisi kustannuksia, mutta teknologian omaksuminen vaatisi suurempia pääomapanostuksia.

Esitän yksinkertaisen havainnollistavan esimerkin Zeiran (1998) tutkimuksen pohjalta: Oletetaan kansantalous, jossa vallitsee yksi lopputuote Y, jota käytetään sekä kulutukseen, että investointeihin. Tämä lopputuote Y valmistetaan puolivalmisteella X, jonka valmistukseen tarvitaan työvoimaa ja pääomaa. Lopputuotteen Y tuottoa kuvaa kaava:

$$Y = aX, \tag{1}$$

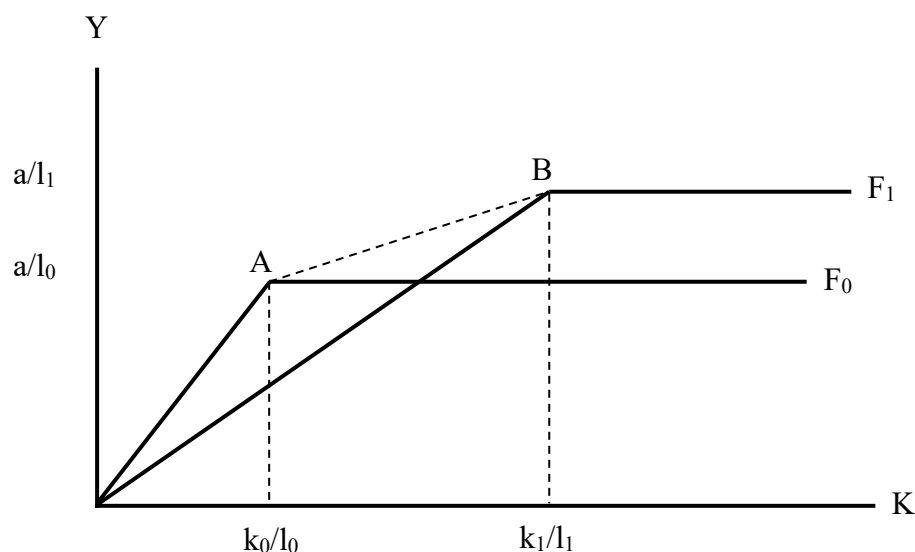
tässä kaavassa a on tuottavuuden parametri, joka vaihtelee eri maiden välillä. Puolivalmiste X valmistetaan työvoimalla ja pääomalla kiinteissä osuuksissa. Tässä mallissa on kaksi eri teknologiaa, joita ovat manuaalinen- sekä teollinen teknologia. Yhden puolivalmisteen X valmistukseen manuaalisella teknologialla vaaditaan l_0 yksikköä työvoimaa ja k_0 yksikköä pääomaa. Teollisella teknologialla tähän vaaditaan l_1 yksikköä työvoimaa ja k_1 yksikköä pääomaa. Zeira (1998) olettaa mallissa, että:

$$l_1 < l_0 \text{ ja } k_1 > k_0, \quad (2)$$

teollinen teknologia tässä tapauksessa siis säästää työvoimaa, mutta vaatii enemmän pääomaa. Tämä on Zeiran (1998) tutkimuksessa pääoletus ja se poikkeaa tämän suhteen tavanomaisista teknologian omaksumisen malleista. Vaikka manuaalista teknologiaa on ollut olemassa iät ja ajat, teollinen teknologia keksitään aikana T, ja on käytettävissä vasta tämän jälkeen. Tässä myös oletetaan, että pääoma, joka investoidaan kumpaankin teknologiaan, pitää olla investoitu yhtä ajanjaksoa aiemmin tuotantoon ja että se on täysin poistettu yhden ajanjakson kuluessa. Oletetaan myös, että tässä taloudessa on jatkumo työntekijöitä, jonka koko on 1 ja korkotaso on kiinteä, jonka suuruus on r. Bruttokorkotaso on merkitty muodossa $R = 1 + r$.

Tässä esimerkki mallinnuksessa työntekijät maksimoivat tulotonsa $Y - RK$, jossa K on kokopääoman panos. Alla olevassa kuvaajassa (kuvio 1.) on esitetty kummankin teknologian tuotantofunktiot, jossa F_0 kuvaa manuaalista teknologiaa ja F_1 teollista teknologiaa. Ajanjaksoon T saakka vain manuaalista teknologiaa on käytetty ja talous on tilanteessa A. Kun teollinen teknologia on keksitty, tuottajat/valmistajat voivat valita omaksuvatko he uuden teknologian käyttöön vai jatkavatko manuaalisella teknologialla. Jos uusi teknologia omaksutaan käyttöön, siirtyy tuottaja tilanteeseen B, jos:

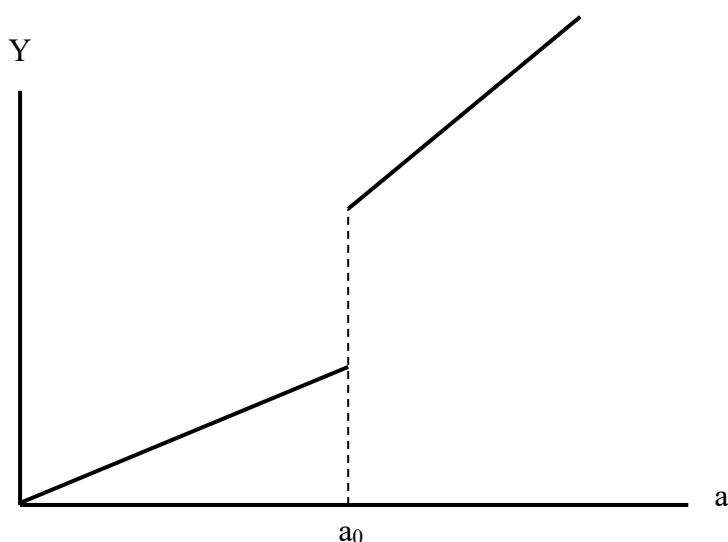
$$a \geq a_0 = R(k_1 l_0 - k_0 l_1) / (l_0 - l_1). \quad (3)$$



Kuvio 1. Havainnollistus tuotannon kehityksestä käyttäen manuaalista- tai teollista teknologiaa (Zeira, 1998).

Uusi teollinen teknologia omaksutaan käyttöön, mikäli A:n ja B:n välisen katkoviivan kulmakerroin on suurempi tai yhtä suuri kuin R. Tulos kuitenkin riippuu vahvasti siitä, että uuden teknologian kanssa pääomavaatimukset ovat suurempia. Tämä esimerkkikuvaaja näyttää meille, että jos teknologiset innovaatiot kasvattavat vaaditun pääoman määrää, teknologiaa ei omaksuta käyttöön kaikkialla. (Zeira, 1998.)

Toinen Zeiran (1998) tutkimuksen tulos on, että teknologian omaksuminen kasvattaa maiden välisiä eroja, joka on esitetty alla olevassa kuvaajassa (kuvio 2.). Kuvaajassa on kuvattu kokonaistuotantoa tuotannon a funktiona. Tuottavuus vaikuttaa tuotantoon kahden eri kanavan kautta. Ensimmäinen näistä on suora vaikutus, joka on esitetty kuvaajassa käyrän positiivisena kulmakertoimena. Toinen on teknologian omaksuminen käyttöön, joka johtaa tuotannon jyrkkään nousuun kohdassa a_0 . Tämä on piste, jossa kynnyks ottaa teollista teknologiaa käyttöön ylittyy. Syy a/R :n voimakkaaseen vaikutukseen tuotannossa on tuotantofunktion suhteellinen tasaisuus pitkällä aikavälillä, koska tuotantofunktioiden F_0 ja F_1 välinen raja-arvo (A:n ja B:n välinen katkoviiva) kuviossa 1. on tasaisempi, kuin kumpikin niistä.



Kuvio 2. Kokonaistuotannon suuruus tuotannon a funktiona (Zeira, 1998).

3 TALOUSKASVU AUTOMAATION KESKELLÄ

Nykypäivän teknologian täyttämässä maailmassa talouskasvun on ennustettu kasvavan huimaa vauhtia tulevana aikana. Aiemmin keskustelut talouskasvusta ovat painottuneet sen hidastumiseen ja stagnaatioon, joilla on pitkä historia taloustieteessä ja asiasta on tehty useita tutkimuksia. Mutta tämä kasvun hidastuminen voi olla hyvinkin jo vanhanaikainen näkemys talouskasvun tulevaisuudesta meidän nykyisten entistä kehittyneempien teknologioiden keskellä. Talouskasvun potentiaalista onkin ollut paljon keskustelua, jonka yhteydessä myös sana ”singulariteetti” on noussut esille. Sana voi olla tuttu useimmille ihmisille tähtitieteeseen ja avaruuteen liittyen, mutta sillä on myös oma tarkoituksensa taloustieteessä. Singulariteetti taloustieteessä voidaan nähdä eräänlaisena tapahtumahorisonttina, jossa ilmenee käännekohta erityisen nopeaan teknologisen kehityksen sekä talouden kasvuun. Tähtitieteissä tämä tapahtumahorisontti tarkoittaa mustien aukkojen ympärillä sijaitsevaa tilaa, jossa painovoima on niin suurta, ettei edes energia pääse pakenemaan sieltä. Tapahtumahorisontissa meidän fysiikkamme lait eivät enää päde.

Singulariteetin tutkiminen taloustieteen näkökulmasta ei vain rajoitu todella edistyneeseen teknologiseen kehitykseen, vaan myös rajoittamattomaan talouskasvuun, josta ei välttämättä ole enää paluuta nykyisen kaltaiseen tilaan. Onko tällä hetkellä mitään merkkejä ilmassa siitä, että voisimme olla matkalla tällaista taloudellisen kasvun singulariteettia kohden teknologisessa kehityksessämme, jossa tekoäly olisi viimeinen ihmisen tekemä keksintö. Kuten Nordhaus (2021) toteaa, kuulostaa tämä lähinnä taloustieteelliseltä fiktiolta. On kuitenkin huomattava, että jotkin näkökulmat ottavat huomioon meidän tietotekniikkamme sekä tekoälyn kehityksen, jotka voivat saada meidät ylittämään jonkun tapahtumahorisontin, jossa talouskasvu kiihtyisi äärimmäisesti. Tämä on erityisesti noussut esille tietojenkäsittelytieteilijöiden parissa, mutta myös osa taloustieteilijöistä on hyväksynyt hieman pehmeämmän version tästä skenaariosta. Käsittelen seuraavissa kappaleissa taloudellisen kasvun mahdollisuuksia ja tuon esille eri näkökulmia tähän liittyen.

3.1 Singulariteetti taloustieteessä

Ennen taloudellisen singulariteetin saavuttamista nykyisellään, pitäisi taloustieteilijöiden keskuudessa aluksi hyväksyä idea siitä, että meidän on mahdollista päätyä sellaiseen. Kuten jo todettu, ei paluu entiseen ole enää mahdollista, jos singulariteetin tapahtumahorisontti saavutetaan. Teknologisen kehityksen ja talouskasvun kiihtyvyyden puolesta puhujien perustana toimii usein laskennan tuottavuuden jatkuva kasvu. Yhtenä tuottavuuden mittarina voidaan käyttää laskentatehon kustannuksia, jotka ovat olleet laskusuunnassa aina vuodesta 1940 lähtien. Tästä voimme päätellä, miten paljon olemme saavuttaneet kehitystä laskennassa ja tietojenkäsittelyssä alle 100 vuodessa. Jos tämä trendi jatkuu laskentatehon ja teknologian kehityksessä, ehkä oikeasti olemme ajautumassa lähemmäs ja lähemmäs singulariteettia. Ihmisaivojen arvioitu laskentateho on jossakin noin 10^{18} laskentaa sekunnissa, jonka on saavuttanut supertietokone jo vuonna 2018. Mutta raaka laskentateho ei sinänsä tarkoita, että tietokone olisi yhtä kyvykäs kuin ihmisen aivot, jos sitä ei saada valjastettua käyttöön samankaltaisesti kuin aivot toimivat. Laskentateho ei siis välttämättä käänny suoraan ihmisenkaltaiseksi älyllisyydeksi, mutta se on hyvä pohja tutkijoille jatkaa tutkimuksia aiheeseen liittyen. (Nordhaus, 2021.)

Vaikka Nordhaus (2021) pitääkin teknologiamme kehitystä valtavana, ei se välttämättä johda kokonaistalouden samankaltaiseen kasvuun. Hän mainitsee syyksi sen, että taloutemme ei pyöri pelkästään ”biteillä” ja tietokoneilla. Talouskasvu pähkinänkuoressa tarvitsee rajallisia resursseja ja tämän vuoksi teknologia itsessään ei välttämättä saata meitä äärimmäiseen talouskasvuun. Mutta on selvää, että se auttaa parantamaan tuottavuutta, kun saamme käytettyä sitä mahdollisimman optimaalisella tavalla.

Singulariteetti taloustieteessä on vielä varsin uusi teoria, mutta se liippaa läheltä aiempia käsityksiä, joissa koneet ja laitteet vievät suurimman osan niin sanotuista helpommista töistä. Alun alkaen makrotaloudelliset huolet keskittyivät ihmisten halujen ja työttömyyden kyllästymiseen. Keynes totesi vuonna 1930, että ongelmat, jotka nousevat nopeasta teknologisesta kehityksestä rajoittuvat ihmisten vapaa-aikaan sekä kuinka käytämme vapauttamme, kun taloudellinen huolenpito vähenee

(Keynes, 1930). Mutta nyt, lähes sata vuotta myöhemmin, voisi sanoa, että ihmiset ovat kiireisempiä kuin koskaan aikaisemmin.

Kun tarkastelemme nykypäivän tilannetta teknologian ja talouskasvun näkökulmasta, voimme päätellä, että talouskasvu voi kiihtyä epänormaalin nopeasti. Tätä voidaan kuvata Cobb-Douglas tuotantofunktiolla:

$$Y_t = K_t^a (A_t L_t)^{1-a}, \quad (1)$$

jossa A kuvaa työvoimaa kasvattavaa teknologiaa. Kuten Nordaus (2021) toteaa, voimme päätyä singulariteettiin, mikäli teknologinen muutos on äärimmäisen nopeaa.

Empiirinen kirjallisuus ei kuitenkaan ole ottanut tosissaan oletusta siitä, että voisimme saavuttaa loputtoman taloudellisen kasvun. Romer (1986, 1990) toteaa, että sisäsyntyinen teknologinen muutos voi auttaa meitä talouskasvussa. Tässä hänen toteamuksessaan tiedon oletetaan olevan tuotettu panos ja kasvu tiedossa olisi verrannollinen tuotantopanoksiin, joita käytetään tuotantoprosesseissa. Tässä mallissa A_t on teknologinen tieto ja Y_t tuotos. λ on murto-osa tuotoksesta, joka on pyhitetty innovatiivisille tuotantopanoksille. Kasvu tiedossa olisi tällöin dA_t / dt . Kasvun funktio voidaan siten esittää seuraavasti:

$$dA_t / dt = \phi(\lambda Y_t) \quad (1)$$

Jos oletamme, että työvoima kasvaa tasaisesti ja tuotanto tapahtuu työvoimalla, se implikoi, että tuotantopanoksien kasvutahti pyrkii äärettömään tilanteessa, jossa innovatiivisten panoksien tuotto lisääntyy. Tätä voidaan kuvata seuraavanlaisesti:

$$\dot{A} / A_t = \phi(\lambda A_t L_t)^\beta / A_t = \phi(\lambda L_t)^\beta A_t^{\beta-1}, \text{ jos } \beta \geq 1. \quad (2)$$

Empiirinen kirjallisuus ei kuitenkaan näe talouskasvua samalla tavalla. Syihin lukeutuvat muun muassa talouskasvussa havaittavissa ollut hienoinen stagnaatio lähivuosien aikana sekä yllä mainitut kasvavat tuotot innovatiivisille tuotantopanoksille. (Nordhaus, 2021.)

Kun tietojenkäsittelytieteilijät ennakoivat tulevaisuutta tekoälyn osalta, he näkevät sen suunnan kohti superälykkyyttä tai supertekoälyä. Tätä voidaan kuvata sellaisena älynä, joka on paljon älykkäämpää jokaisella osa-alueella, kuin ihmisen aivot. Tähän lukeutuvat muun muassa tieteellinen luovuus, yleinen viisaus sekä sosiaaliset taidot. (Bostrom, 2006.)

Siinä pisteessä, kun tietokoneet ovat ylittäneet superälykkyyteen kaikilla ihmisen toiminta-alueilla, olemme saavuttaneet singulariteetin. Tällöin ihmisistä tulee taloudellisesti tarpeettomia siinä mielessä, että heidän suhteellinen suorituskykynsä on vähäpätöistä. Ihmiset olisivat kuin hevoscarryyjä verrattuna kuorma-autoihin. Superälykkäät tietokoneet olisivat tällaisessa tilanteessa ihmisen viimeinen keksintö. (Nordhaus, 2021.) Matemaatikko Irving Good kuvailee tilannetta seuraavasti:

”Ultraälykäs laite voidaan määritellä laitteeksi, joka voi ylittää kaiken ihmisen älyllisen toiminnan, oli henkilö miten älykäs tahansa. Koska tällaisen laitteen suunnittelu on yksi näistä älyllisistä toiminnoista, voisi ultraälykäs laite suunnitella vielä parempia laitteita. Tällöin tapahtuisi väistämättä niin sanottu älyllinen räjähdys ja ihmisen älykkyys jäisi kauas taakse. Näin ollen ensimmäinen ihmisen keksimä ultraälykäs laite olisi viimeinen keksintö, jonka ihmisen tulisi keksiä.” (Good, 1965.)

Charles I. Jonesin (2023) mukaan singulariteetti on kuitenkin mahdollinen, mutta tämä sisältää erittäin suuria riskejä meidän nykyisen kaltaiselle elämälle. Hänen yksinkertainen mallinsa olettaa, että tekoälyn kehittyminen antaa tietokoneille mahdollisuuden täydentää tai jopa kokonaan korvata ihmiset innovoinnissa, johtaen kiihtyvään talouskasvuun jollakin nopeudella g . Tämän tekoälyn käyttö aiheuttaa kuitenkin eksistentiaalisen riskin koko ihmiskunnalle. Kehittyneen tekoälyn käyttäminen ajanjakson T ajan, johtaa kulutukseen henkilöä kohden $c_T = c_0 e^{gT}$, mutta samaan aikaan todennäköisyys, että maailma selviytyy on $S(T) = e^{-\delta T}$. Yksinkertaistettuna vielä, että malli on pohjimmiltaan staattinen. Ainoa päätös on valita T , joka on tekoälyn käytön intensiteetti. Kaikki kasvu ja eksistentiaalinen riski toteutuu välittömästi eikä ajan kuluessa, ja jos ihmiskunta selviytyy, ihmiset kuluttavat ikuisesti vakion c_T verran.

Sosiaalinen hyvinvointi vakiokokoiselle väestölle, jossa on N määrä ihmisiä ja joka saa ikuisesti jatkuvan hyödyn $u(c)$, on seuraavanlainen:

$$U = N \int_0^{\infty} e^{-pt} u(c) dt = \frac{1}{p} N u(c). \quad (1)$$

Vakiintuneet eksogeeniset väestönkasvu- tai vähenemisnopeudet muuttaisivat diskonttokoron p ainostaan $p - n$:ksi, joten se on jo otettu huomioon implisiittisesti. Asetelma pelkistyy tällöin staattiseksi ongelmaksi, jossa T valitaan niin, että maksimoidaan odotettu hyöty, jossa odotus otetaan olemassa olevan riskin suhteen:

$$EU = S(T) \cdot \frac{1}{p} N u(c) = e^{-\delta T} \cdot \frac{1}{p} N u(c_0 e^{gT}). \quad (2)$$

Huomaa, että N ja p vain lisäävät tai vähentävät sosiaalista hyvinvointia, mutta jäävät pois ensimmäisen asteen ehdosta. N ihmistä hyötyy kumpikin korkeammasta kasvusta ja kumpikin kärsii, mikäli maailma loppuu. Ensimmäisen asteen ehto optimaalisuudelle on:

$$S'(T)u(c) + S(T)u'(c) \frac{dc}{dT} = 0 \quad (3)$$

$$\Leftrightarrow S'(T)u(c) + S(T)u'(c)c \frac{d \log c}{dT} = 0 \quad (4)$$

$$\Leftrightarrow v(c) \equiv \frac{u(c)}{u'(c)c} = \frac{d \log c / dT}{-d \log S / dT} = \frac{g}{\delta} \quad (5)$$

Kun tämä kirjoitetaan lyhyesti, ratkaisu on valita T^* siten, että $c^* = c_0 e^{gT^*}$ täyttää $v(c^*) = g / \delta$.

Vasen puoli tästä yhtälöstä on $v(c) \equiv u(c) / u'(c)c$, joka on elinvuoden arvo kulutusvuosina mitattuna. Esimerkiksi Yhdysvalloissa tyypillinen elinvuoden arvo on noin 250 000 dollaria, mikä saadaan noin 10 miljoonan statistisesta elämän arvosta 40-vuotiaalle henkilölle, joka voi vielä elää toiset 40 vuotta. Koska kulutus henkilöä kohden on noin 40 000 dollaria, tämä elämän arvo implikoi $v(c_{us, today}) \approx 6$. Toisin

sanoen, yksi elinvuosi on arvoltaan kuusinkertainen kulutukseen henkeä kohden. Huomaa, että kun kyseessä on lineaarinen hyöty, olisi $v(c) \equiv u(c)/u'(c)c$ yhtä suuri kuin yksi. Kaarevuuden kanssa $v(c)$ on tyypillisesti suurempi kuin yksi: $u'(c)c$ arvottaa kulutuksen käyttämällä rajahyötyä, kun taas $u(c)$ sisältää inframarginaaliset hyödyt vastaavalla tavalla kuin kuluttajan ylijäämä. (Jones, 2023.)

Yksi tapa ymmärtää tätä Jonesin (2023) ensimmäisen asteen ehtoa, on huomata, että tekoälyä on optimaalista käyttää niin kauan kuin menetetyt elämät ovat ylimääräisen kasvun alle:

$$\delta v(c) \leq g \tag{6}$$

Jos annamme tekoälyn toimia vielä yhden ajanjakson ajan, kustannus maailman loppumisesta on todennäköisyys δ , joka on menetys $v(c)$ henkilöä kohden. Hyöty on ylimääräinen ajanjakso, jolloin kulutus kasvaa nopeudella g . Optimaalinen valinta siitä, kuinka kauan tekoälyn annetaan toimia vastaa kustannuksia ja hyötyjä marginaalissa. (Jones, 2023.)

Tekoälyn kehitys on siis kaksiteräinen miekka, joka toisaalta voi lisätä talouskasvua, mutta taas toiselta kantilta, se sisältää valtavia riskejä meidän koko olemassaolomme puolesta. Superälykkään olennon luominen, joka ei välttämättä ole sopuisuudessa ihmisten arvojen kanssa, voi johtaa katastrofaalisiin seurauksiin, jossa ihmiset kuolevat sukupuuttoon. (Jones, 2023.)

3.2 Kysyntäpuolen kasvueuforia

Kysyntäpuolella erityisen nopeaan talouskasvuun vaikuttavia tekijöitä voidaan kuvata Baumolin kasvueuforiana (Baumol's growth euphoria), joka on Baumolin kustannustaudin peilikuva. Baumol painotti omassa teoriassaan matalan tuotantotason toimialojen kasvavista kustannuksista ja miten ne mahdollisesti kasvavat hyvin hitaasti. Riippuen kuitenkin niiden korvaavuusominaisuuksista, voi vaikutus olla myös

kokonaistuottavuuden kasvu eikä alentuminen. Sektorit, jotka kokevat nopeaa tuotannon kasvua omaavat myös suhteellisen nopean laskun hinnoissa, joka taas kasvattaa niiden suhteellista kulutusta. Avainkysymys näillä toimialoilla on se, että onko näiden osuudet nousevia vai laskevia nimellismenoista. Jos alat, joiden tuotannon kasvu on hidasta dominoivat, syntyy siitä stagnaatiota. Jos taas korkean kasvupotentiaalin alat dominoivat, kiihdyttää se kokonaistuotannon kasvua. (Nordhaus, 2021.)

Nordhaus (2021) esittää tutkimuksessaan kahden sektorin esimerkin, jossa taloudessa on kaksi eri sektoria, käsityö- ja informaatiosektorit. Molemmissa tuotantoa hoidetaan yhdellä yhdistelmä-tuotantopanoksella. Kunkin sektorin tuotos on lineaarinen tämän tuotantopanoksen suhteen poikkeavilla tuottavuustrendeillä. Vastaavasti, tuottavuuskasvu on joko todella korkeaa tai matalaa. Baumolin mekanismin mukaan, suhteelliset hinnat muuttuvat nopeasti informaatiosektorin hyväksi. (Nordhaus, 2021.)

Jos kysynnän jousto on epäelastista, eli joustavuus on alle yhden, käsityösektori tulee dominoimaan lopulta kuluissa ja kulutuksen kasvu tulee lähentymään käsityösektorin tuottavuuden kasvua. Jos taas jousto on elastista, informaatiosektori dominoi kulutusta ja kulutuksen kasvuvauhti lähentyy informaatiosektorin kasvuvauhtia. Tässä esimerkissä näiden kahden erilaisen tuotteen välinen jousto on kriittinen parametri. Kuitenkin, toisin kuin tarjontapuolen efekteissä, korkea kysyntäpuolen joustavuus ei johda singulariteetteihin. (Nordhaus, 2021.)

Täsmällisempi esimerkki tästä kahden sektorin mallista Nordhausin mukaan on seuraavanlainen; Oletetaan, että taloudessa on kaksi eri kulutushyödykettä C_1 ja C_2 , jotka ovat informaatio sekä käsityö. Lopputuotokset tuotetaan yhdellä ulkopäin tulevalla yhdistelmä-tuotantopanoksella L . Tuottavuuden kasvun oletetaan olevan vakio molemmilla toimialoilla, kuvataan näitä h_1 ja h_2 . Preferenssit ovat homoteettisia ja näiden kahden hyödykkeen välinen substitutiojousto σ on vakio. Näiden oletuksien perusteella hinnat näillä sektoreilla laskevat vauhdilla h_1 ja h_2 suhteessa palkkoihin. Kokonaiskulutus kasvaa ihanteellisella indeksillä mitattuna vauhdilla $\beta_1 h_1 + \beta_2 h_2$, jossa β_1 ja β_2 ovat näiden hyödykkeiden suhteelliset kulutusosuudet. Tällä voi siis näyttää toteen, että näiden kahden toimialan osuuksien suhde muuttuu logaritmisella nopeudella $(h_1 - h_2)(\sigma - 1)$. Nordhaus olettaa esimerkiksi, että jos $\sigma = 1,25$, $h_1 = 10\%$

vuodessa ja $h_2 = 0$ % vuodessa, kasvaa informaation osuus taloudessa noin 2,5 prosenttia ($10 \% * 0,25$). Vaihtoehtoisesti, jos ottaa spesifin esimerkin tietokoneista, jotka ovat muodollisesti informaatiota prosessoivia laitteita, suhteellinen hintojen lasku viimeisen vuosikymmenen aikana on ollut noin 10 % vuodessa suhteessa muuhun kulutukseen. Tietokoneiden osuus vuonna 2000 on ollut noin 2 prosenttia. Jos substituutiojousto on ollut tietokoneiden ja muiden hyödykkeiden välillä 1,25, kasvaisi tietokoneiden osuus vuosikymmenessä 2,6 prosenttia. Tämä on lähes täsmälleen sama kuin tilanne on ollut oikeasti tällä ajanjaksolla. (Nordhaus, 2021.)

Voimme myös laskea suhteellisen helposti Baumolin ilmiön tälle kahden sektorin esimerkille. Kulutuksen kasvu mitattuna superlatiivisesti Törnqvist-indeksissä on yhtä suuri kuin painotettu kasvu kulutuksessa, $\beta_1(t) h_1(t) + \beta_2(t) h_2(t)$. Tällä oletuksella kulutuksen kasvu indeksissä viimeisen vuosikymmenen ajalta nousisi 1,2 prosentista 1,26 prosenttiin vuodessa. Tämä on sama kuin muutos sektorien osuuksissa kerrottuna kasvuvauhtien erotuksella. On huomioitava, että mikäli substituutiojousto on elastista, pyrkii kasvuvauhti tässä mallissa kohti korkean tuottavuuden toimialan kasvuvauhtia. Tietokoneiden osuus pyrkii kohti yhtä, joten painotettu kasvuvauhti pyrkii kohti 10 prosenttia vuodessa yksinkertaisessa esimerkissä. (Nordhaus, 2021.)

Kysyntäpuolen kasvueuforiaa voidaan testata vertailemalla eri hyödykkeiden osuuksia kokonaiskulutuksesta sekä niiden trendejä suhteellisissa hinnoissa. Nordhaus (2008) mainitsee, että tutkimuksessaan koskien Yhdysvaltain suurimpia teollisuudenaloja, oli niillä aloilla, joilla suhteellisen tuottavuuden suunta meni alaspäin ja suhteelliset hinnat kasvoivat, taipumus kasvattaa osuuttaan nimellistuotannosta ja työllisyydestä. Tämä on yhtenevä Baumolin kustannustaudin trendin kanssa. Tuottavuuden kasvun sekä nimellistuotannon välillä vallitsee negatiivinen yhteys, jossa jämähtäneillä toimialoilla on taipumus ottaa kasvava osuus nimellistuotannosta. Tällä on kuitenkin vain marginaalisesti tilastollisesti merkitystä. (Nordhaus, 2008.)

Vaihtoehtoisesti, Nordhausin (2021) tutkimus lähestyy kysymystä kulutuksen kautta, joka on luontevampi tapa selvittää substituutiomalleja. Tällä tavoin voidaan testata koostumuksen vaikutusta, tutkimalla onko aloilla, joiden hinnat laskevat kaikkein nopeimmin, nousevat vai laskevat osuudet menoista. Identifioiva oletus on tässä se, että hinnat liikkuvat käänteisesti teknologisen kehityksen suhteen ja teknologinen

muutos on ulkopäin tulevaa. Teknologiset shokit eivät myöskään vaikuta kysyntäsuhteiden häiriöihin. Tarkkaan ottaen riittäisi, että yksi sektori omaisi kaikki laskevat hinnat ja valtaisi koko kulutuksen, mutta Nordhaus tutkii asiaa rajoitetummin kaikkien osatekijöiden trendien osalta. (Nordhaus, 2021.)

Yhdysvaltain taloudellisten analyysien virasto BEA on ylläpitänyt pitkän aikavälin dataa kulutuksen menoista sekä hinnoista aina vuodesta 1929 lähtien. Tämä data sisältää 89 eri alaa, jotka vaihtelevat koon mukaan aina pienyrityksestä suuryrityksiin. Nordhaus ottaa analyysissään yksinkertaisen regression menojen logaritmistä suhteesta hintojen muutoksen logaritmiin eri aikajaksoilla. (Nordhaus, 2021.) Nordhausin analyysin tulokset on esitetty seuraavassa taulukossa, jossa tarkastellaan sekä osajaksoja ja koko ajanjaksoa:

Taulukko 1. Henkilökohtaisten kulutusmenojen log-hinnan kerroin yhtälössä (Nordhaus, 2021).

Ajanjakso	Kerroin	t-statistiikka	Havainnot	p-arvo
1929–1948	0,25	1,10	48	0,012
1948–1969	0,90	2,59	54	0,012
1969–1990	0,06	0,37	83	0,714
1990–2013	-0,17	-1,58	90	0,118
1929–1969	0,15	0,50	48	0,617
1969–2012	-0,02	-0,26	83	0,796
1929–2012	0,44	2,04	48	0,047

Yhteenlaskettu, kaikki osajaksot	0,19	2,10	246	0,037
----------------------------------	------	------	-----	-------

Kertoimet vaihtelevat sekä sektoreittain, että ajanjaksoittain. Yleisesti ottaen kertoimet ovat positiivisia, mikä viittaa siihen, että kysynnän substituoitio on epäelastista. Tarkasteltaessa koko ajanjaksoa vuodesta 1929 vuoteen 2012 tai koko ajanjakson yhdistettyjä osajaksoja, näkyy selvä indikaatio substituution epäelastisuudesta. Nämä tulokset ovat yhteneväisiä Nordhausin aiemmin vuonna 2008 tehdyn tutkimuksen kanssa. (Nordhaus, 2021.)

Toinen vaihtoehto katsoa henkilökohtaisen kulutuksen menoja teknologiasektoreilla on esitetty taulukossa 2. Uusien sektoreiden hinnat ovat laskeneet tasaisesti, mutta niiden osuuksien trendi ei ole niin selkeä.

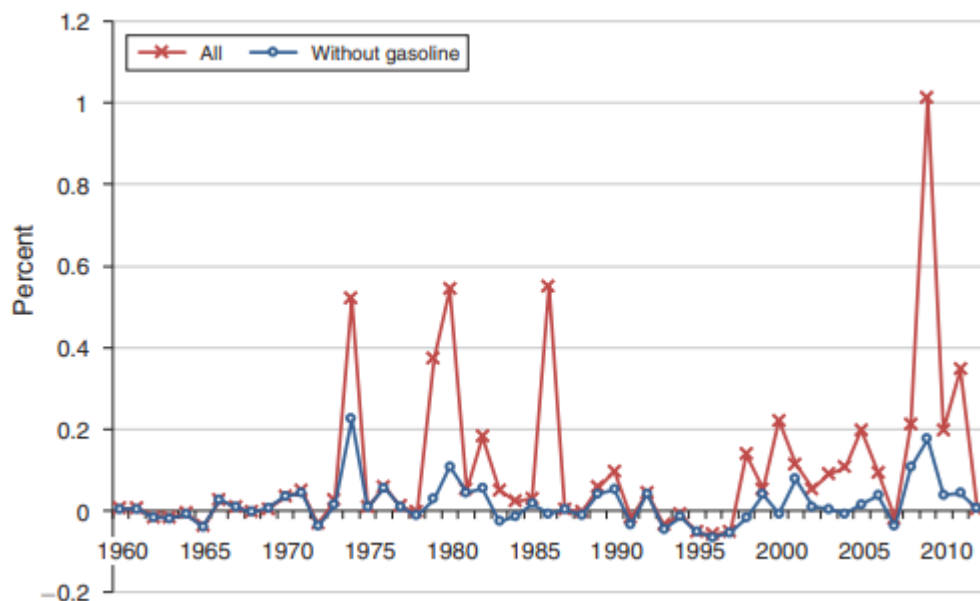
Taulukko 2. Suhteellisten hintojen ja osuuksien keskimääräinen muutos Yhdysvalloissa kuuden eri informaatioteknologia sektorin osalta vuosivälillä 1990–2012 (Nordhaus, 2021).

	Muutos hinnoissa %	Muutos osuuksissa %
Televiestintä	-2,9	-1,3
Videolaitteet	-11,1	-1,8
Informaatiolaitteet	-21,1	4,7
Internet	-5,4	24,7
Televiestintä	-6,3	3,3

 Valokuvauslaitteet -3,2

-6,1

Baumolin stagnaatiovaikutuksen suuruus on pieni näissä esitetyissä arvioissa. Kuviossa 3 on esitetty laskelma Baumolin vaikutuksesta tietyillä hyvin mitatuilla toimialoilla. Baumolin vaikutus on osuuksien muutosten summa kerrottuna logaritmisella hintojen muutoksella. Positiivinen numero viittaa kustannustautiin. Näiden toimialojen osalta Baumolin vaikutus on positiivinen ja kokonaiskulutuksen kasvu vähenee 0,098 prosenttia vuodessa, jos bensiini on otettu mukaan. Kasvu vähenee 0,015 prosenttia vuodessa, mikäli bensiiniä ei lasketa mukaan. Molemmissa tapauksissa vaikutus on pieni, mutta se ei lisää kummassakaan talouskasvua. Bensiinin hallitseva vaikutus johtuu sen osuuden suuruudesta sekä siitä, että se on erittäin hintajoustavaa lyhyellä aikavälillä. (Nordhaus, 2021.)



Kuvio 3. Baumolin vaikutus tietyille hyvin mitatuille toimialoille (Nordhaus, 2021).

Nämä tulokset viittaavat siihen, että Baumolin vaikutus muuttuvissa osuuksissa kulutuksessa aiheuttavat stagnaatiota ennemmin kuin kiihdyttävät kasvua. Sektorit, jotka kokevat kaikkein nopeinta hintojen laskua kokevat myös hienoista alenemista menojen osuuksissa. Tämä taipumus tarkoittaa, että kasvu kokonaiskulutuksessa hidastuisi tulevaisuudessa, jos taustalla olevat teknologiset suuntaukset ovat vakaita.

On kuitenkin huomattava, että osuuksien muuttumisen vaikutus kokonaiskulutuksen kasvuun on ollut historiallisesti erittäin pientä, noin 0,1 prosenttia vuodessa. Syy tälle on se, että korkean ja matalan tuottavuuden kasvualojen osuudet eivät ole muuttuneet merkittävästi kahden viime vuosikymmenen aikana. Tämän Nordhausin ensimmäisen testin perusteella ei siis näytä olevan minkäänlaisia merkkejä siitä, että kysyntäpuolella tapahtuisi erityisen nopeaa kasvua tai Baumolin kasvueuforiaa. (Nordhaus, 2021.)

3.3 Tarjontapuolen singulariteetti

Tarjontapuolen kiihdyttävänä tekijänä toimii pääoman syventämisen kiihtyvä tahti. Pääoman syventämisellä tarkoitetaan pääomakannan osuuden kasvua suhteessa tehtyihin työtunteihin. Eli pääoman määrä taloudessa lisääntyy. Nordhaus ottaa myös tarjontapuolella esimerkiksi kahden panoksen mallin, jolla vie analyysiä eteenpäin. Tässä mallissa on kaksi eri tuotannon muotoa ja yksi yhdistelmä tuotos, jota voidaan käyttää joko kulutukseen tai investointeihin. Yksi tuotantopanos on kiinteä tai hitaasti kasvava ja se on tavallisesti ajateltu työvoimana, tai vaihtoehtoisesti työvoiman ja hitaasti kasvavan pääoman yhdistelmänä. Toinen tuotantopanos on niin sanottu informaatiopääoma, jota tuotetaan nopeasti kehittyvällä teknologialla. (Nordhaus, 2021.)

Tässä yksinkertaisessa mallissa keskeinen parametri on tuotannon substituutiojousto. Jos tämä jousto on suurempi kuin yksi niin tuotannon jousto suhteessa informaatiopääomaan kasvaa ja tuottavuuden kasvu kiihtyy. Jos substituutiojousto on alle yhden, informaatiopääoman jousto laskee ajan kuluessa ja kokonaistuottavuuden kasvu pyrkii kohti suhteellisen kiinteää kasvua. Yksikköjoustavassa Cobb-Douglas tapauksessa tuotoksien joustot ovat vakioita, ja tuottavuuden kasvu pyrkii kohti kahden panoksen painotettua keskiarvoa kohti vakiopainoilla. (Nordhaus, 2021.)

Kehittääkseen tätä mallia pidemmälle Nordhaus (2021) käyttää tavallista suljetun talouden uusklassista kasvun mallia, jossa säästöt ovat vakiot tietyillä muokkauksella. Työvoima kasvaa vakiotahdilla n ja kaikki teknologinen muutos on pääomaa lisäävää nopealla, mutta vakiolla tahdilla. Informaatiopääoma on sisältäpäin tuleva muuttuja ja

kaikki muut panokset sulautetaan osaksi työvoimaa. Pääomaa syventävässä mekanismissa tuotantofunktio on seuraavanlainen:

$$Y_t = F(B_t, K_t, L_t). \quad (1)$$

Tässä määritelmässä oletetaan, että teknologinen muutos on puhtaasti pääomaa lisäävää vakiotahdilla z . Tämä johtaa seuraavaan yhtälöön tuotannon kasvulle g_t , jossa α_t on tuotannon jousto suhteessa pääomaan:

$$g_t = \alpha_t (z + sY_t / K_t - \delta) + (1 - \alpha_t) n. \quad (2)$$

Yksinkertaisuuden vuoksi Nordhaus (2021) olettaa, että $z > n$, joten siinä on pääoman syventymistä. Substituutiojouston pääoman ja työvoiman välillä oletetaan olevan yli yhden. Tämä johtaa rajoittamattomaan tuotannon kasvuun, kun pääoman osuus menee kohti yhtä:

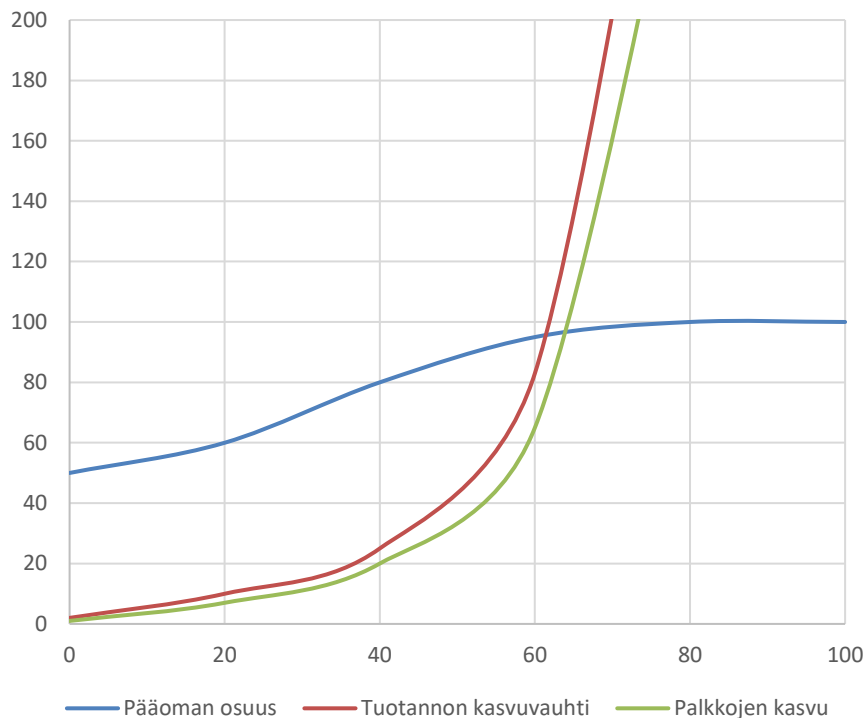
$$g_t \rightarrow z + sY_t / K_t - \delta \rightarrow z + s (Y_T / K_T) e^{z(t-T)} - \delta \rightarrow \infty. \quad (3)$$

Nordhaus (2021) yksinkertaistaa yhtälöä (3) olettaen, että pääoma on olemassa yhden periodin ajan ja on yhtä suuri kuin investoinnit edellisellä periodilla. Raja-arvossa $\alpha_t \rightarrow 1$ tämä merkitsee, että $Y_t = B_t K_t = B_t sY_{t-1} = B_0 e^{zt} sY_{t-1}$, joten $Y_t / Y_{t-1} = 1 + g_t = B_0 e^{zt} s \rightarrow \infty$. Toisin sanoen tuotannon kasvu pyrkii äärettömyyteen.

Yllätys tässä on se, että tuotannon kasvu on rajoittamatonta. Käytännössä talous on vain informaatiopääoman tuottamaa informaatiota, joka on tuotettu informaatiolla, joka taas tuottaa informaatiota nopeammin vuosi vuodelta. Nordhaus nostaa kolme pääpointtia tähän liittyen. Ensimmäinen on se, että informaatiopääoman arvo-osuus pyrkii kohti yhtä (unity). Toisena, tämän seurauksena informaatiopääoman osuus kasvaa ja kolmantena, koska informaatiopääoma on tuotettu panos, tuotannon kasvuvauhti kiihtyy. (Nordhaus, 2021.)

Nordhaus (2021) esittää numeraalisen esimerkin tälle rajoittamattomalle kasvulle. Tässä hän olettaa, että työvoima on vakio, kaikki teknologinen muutos on pääomaa

lisäävää 10 prosentin vuosivauhtia ja substituutiojoustavuus työvoiman sekä informaatiopääoman välillä on 1,25. Seuraavassa kuviossa (kuvio 4.) on esitetty, miten pääoman tulo-osuus sekä tuotanto ja palkat kasvavat. Kasvu menee yli reunoista noin 70 vuoden kohdalla. Tulos on sama niin kauan kuin efektiivinen pääoma kasvaa nopeammin kuin työvoima, mutta jos pääoman kasvu on hitaampaa, singulariteettiin päätyminen viivästyy. Kuvion vaaka-akselilla on vuodet ja pystyakselilla prosentit, jotka kertovat muutoksen nopeudesta.



Kuvio 4. Kasvumallin simulointi, jossa pääoman teknologinen muutos on nopeaa ja työvoiman sekä pääoman välinen substituutio on joustavaa. (Nordhaus, 2021.)

Toinen seikka, joka kuviosta käy ilmi koskee nopeasti kasvavan kasvun vaikutusta palkkoihin. Palkkojen kasvu saavuttaa 200 prosenttia vuodessa noin vuosien 70–80 välillä. Lopulta pääoma saa kuitenkin suurimman osan potista ja työntekijöille jää vain pieni osa tästä, joka sekin kasvaa ilmiömäisellä vauhdilla. Tarkka ajoitus riippuu parametreistä, mutta joustavan tuotannon ja nopean pääoman tuottavuuden vallitessa kuvio näyttää samankaltaiselta kuin kuvio 4. (Nordhaus, 2021.)

3.4 Etenemmekö kohti singulariteettia?

Olemmeko sitten etenemässä kohti singulariteettia on hyvä kysymys, johon pohdimme seuraavaksi vastauksia. Vaikka optimistit uskovat, että superälykyys voidaan saavuttaa muutaman vuosikymmenen aikana laskentatehon kehityksen perusteella, ei se vielä takaa räjähtävästi kasvavaa talouskasvua. Voimme kuitenkin tutkia singulariteettiin päätymistä ja onko tämän mahdollista lähitulevaisuudessa. Nordhaus (2021) tarkastelee tätä kuuden erilaisen testin avulla, mutta en käy tässä läpi jokaisen testin tulosta yksittäin, vaan käsittelen testien tulokset yleisesti. Nordhausin testit ovat seuraavat:

1. Substituutiojoustavuuden ollessa yli 1 työvoiman ja pääoman välillä
2. Nouseva tuottavuuden kasvu
3. Nouseva pääoman osuus
4. Kiihtyvä kasvu pääoma - tuotanto suhteessa
5. Nouseva informaatiopääoman osuus
6. Mittausvirheiden vuoksi piilossa oleva nousu tuottavuuden kasvussa

Kuten olen jo aiemmin tutkielmassa todennut, on varsin selvää, että tuottavuus ja tätä kautta talous kasvaa teknologian ja automaation kehittyessä. Mutta onko tämä teknologian kehittyminen niin nopeaa, että voisimme päätyä singulariteettiin tulevaisuudessa. Testit antavat osviittaa siitä, mihin asioihin kannattaa kiinnittää huomiota tarkasteltaessa tähän vastauksia.

Nordhaus (2021) määrittelee singulariteetin olevan käsillä silloin, kun vuosittainen talouskasvu ylittää 20 prosenttia vuodessa. Hänen tekemänsä testit eivät suurelta osin tähän päätyneet, mutta kaksi näistä testeistä osoittautui heikosta positiiviseksi. Loput neljä testiä olivat joko negatiivisia tai tulkinnanvaraisia. Näille kahdelle heikosti positiiviselle testille voidaan laskea kuinka kaukana olemme singulariteetista.

Nordhaus käyttää tähän yksinkertaista ekstrapolaatiota. Tämän mukaan aika, jolloin taloutemme voisi kohdata singulariteetin on joskus vuoden 2100 tuolla puolen.

Taulukko 3. Kuuden eri singulariteettitestin tulokset (Nordhaus, 2021).

	Testin tulos	Aika singulariteettiin
1. Substituutiojoustavuuden ollessa yli 1 työvoiman ja pääoman välillä	Epäselvä	x
2. Nouseva tuottavuuden kasvu	Negatiivinen	x
3. Nouseva pääoman osuus	Positiivinen	>100 vuotta
4. Kiihtyvä kasvu pääoma - tuotanto suhteessa	Negatiivinen	x
5. Nouseva informaatiopääoman osuus	Positiivinen	>100 vuotta
6. Mittausvirheiden vuoksi piilossa oleva nousu tuottavuuden kasvussa	Negatiivinen	x

Yksi ajatus singulariteettien taloustieteeseen on, että se on vain menneisyyden trendien ja suuntausten jatkumista tulevaisuuteen. Erilaiset laitteet voivat lentää ja tietokoneet suoriutuvat mitä monimutkaisemmista laskutoimituksista, mutta nämä eivät ole tehneet ihmisestä kuitenkaan tarpeetonta. Yrityksillä menee vuosia tai vuosikymmeniä oppia kuinka uutta teknologiaa saadaan hyödynnettyä, kuten höyryllä tai sähköllä kävi aikaisemmin. Kaikenlainen tietotaito ja laitteet ovat lisääntyneet sekä niin sanottu ”big

data” voi tehdä suuria laskelmia, mutta ne eivät ole korvanneet esimerkiksi opettajia, eivätkä nämä voi suorittaa vaikkapa puusepän töitä. (Nordhaus, 2021.)

On tärkeää erottaa singulariteetin teoria aiemmista innovaatioista. Hyöry, sähkö sekä internet ovat esimerkiksi aiempia innovaatioita ja nämä moninkertaistavat ihmisen tekemän työn. Singulariteetti on luonteeltaan erilainen, sen periaate on, että se korvaa älykkyydellään ihmisen tekemän työn kokonaan. Työn tuottavuus kaksinkertaistuu, kun lentokoneesta jätetään perämies pois, mutta tuottavuus kasvaa äärettömästi, jos myös kapteeni otetaan pois, kuten esimerkiksi droneissa. Singulariteetin näkymiä voi tarkastella myös kilpailuna tehtävien automatisoinnin ja tehtävien innovoinnin välillä. Ihmisen tekemän tehtävän laajuus rajautuu kahteen eri ulottuvuuteen, joita ovat lateraalinen ja temporaalinen. Lateraalinen ulottuvuus sisältää kaiken mitä ihminen tekee tänään, kuten lentäjä tai puuseppä, kun taas temporaalinen ulottuvuus sisältää sen, miten innovaatiot laajentavat tehtävien määrää kokonaan uusiin, kuten koodin kirjoittaminen ohjelmointikielellä tai autonomisten autojen suunnittelu. (Nordhaus, 2021.)

Ehkä tekoäly voi jokin päivä vuosikymmenien päästä suorittaa suurimman osan meidän tämän päivän työtehtävistä, mutta tehtävät kuitenkin kehittyvät ajan kuluessa. Siihen mennessä, kun tekoäly pystyy suorittamaan tämän päivän ihmisen suorittamat työtehtävät, liuta täysin uusia työtehtäviä on jo syntynyt (Nordhaus, 2021). Tämä analyysi on myös Acemoglun & Restrepon (2018) esille nostama. Heidän viitekehityksensä mukaan, kun aiemmat tehtävät ovat saatu automatisoitua, innovaatiot ovat luoneet entistä monimutkaisempia uusia tehtäviä, joiden suorittamiseen ihmisellä (työvoimalla) on suhteellinen etu.

Vaikka tämä kuvaus tehtävien automatisoinnin ja tehtävien innovoinnin välisestä kilpailusta auttaa ymmärtämään ihmisen tekemän työn kehitystä ja sen luonnetta, puuttuu siitä singulariteetin keskeinen piirre. Kun superälykkäät koneet kehittyvät, tehtävien automatisoinnin pitäisi siirtyä tehtäviä automatisoiville koneille. Jos nämä koneet tulevat oikeasti superälykkäiksi, niiden nopeus automatisoida tehtäviä ylittäisi tehtävien innovoinnin nopeuden. Kaikki tämä on tietenkin hyvin spekulatiivista, mutta se auttaa näyttämään, miksi singulariteetti eroaa aiemmista tehtävien kehityksen malleista. (Nordhaus, 2021.)

4 TEKOÄLY, TYÖMARKKINAT JA INNOVAATIOT

Viimeisten vuosikymmenten aikana olemme todistaneet todella nopeaa kehitystä tekoälyn saralla uudenlaisten koneoppimistekniikoiden sekä massiivisten tietokokonaisuuksien osalta (Acemoglu ym., 2020). Kuten olen myös tässä tutkielmassa aiemmin todennut, on odotettavissa, että tämä teknologinen kehitys tulee vain kiihtymään tulevina vuosina ja vuosikymmeninä. Jotkut tutkijat näkevät tämän kuitenkin ennusteena työttömästä tulevaisuudesta, jossa tekoäly ja automaatio hoitaisi ihmisten työt. Toiset taas näkevät tämän rikastavana tekijänä ihmisten tuottavuudelle ja työkokemukselle (Chui, 2017). Näiden vastakkaisten näkemysten jatkuvuus ei sinänsä ole yllättävää, kun otetaan huomioon, miten vähän meillä on tietoa tekoälyn ja automaation vaikutuksista työmarkkinoihin. Tietojen kerääminen on alkanut vasta vähän aikaa sitten määrittääksemme tekoälyn kaupallista käyttöä, eikä meillä ole vielä edes systemaattista näyttöä siitä, onko tekoälyn käyttö lisääntynyt merkittävästi. (Acemoglu ym., 2020.)

Nopeilla kehitysaskelilla tekoälyssä on mahdollisuus vaikuttaa suoraan monenlaisten tuotteiden ja palveluiden tuotantoon, ja sillä on ominaisuuksia, joilla on merkittäviä vaikutuksia niin tuottavuuteen, työllisyyteen kuin kilpailuunkin. Vaikka nämä vaikutukset ovatkin merkittäviä, tekoälyllä on myös mahdollisuus muuttaa innovointia ja siihen liittyviä prosesseja. Ja tämä vaikutus voi olla yhtä merkittävä tai jopa hallitseva suora vaikutus, jonka tekoäly aiheuttaa tulevaisuudessa. (Cockburn, Henderson & Stern, 2018.)

Käsittelen seuraavissa luvuissa tekoälyn vaikutuksia niin työmarkkinoihin, kuin innovaatioihinkin erillisissä osioissa. Miten tekoäly vaikuttaa ihmisten työllisyyteen ja mitä vaikutuksia sillä voi olla ihmisten taitoihin. Onko alemman taidon tehtävien tulevaisuus tuhoon tuomittu jo tässä vaiheessa ja onko tarve vain todella kyvykkäille työntekijöille. Innovaatioiden osalta perehdyn siihen, miten tekoäly vaikuttaa niihin, ja mikä rooli politiikalla ja instituutioilla on luoda tehokkaita kannustimia innovoinnille, niiden leviämislle sekä kilpailulle.

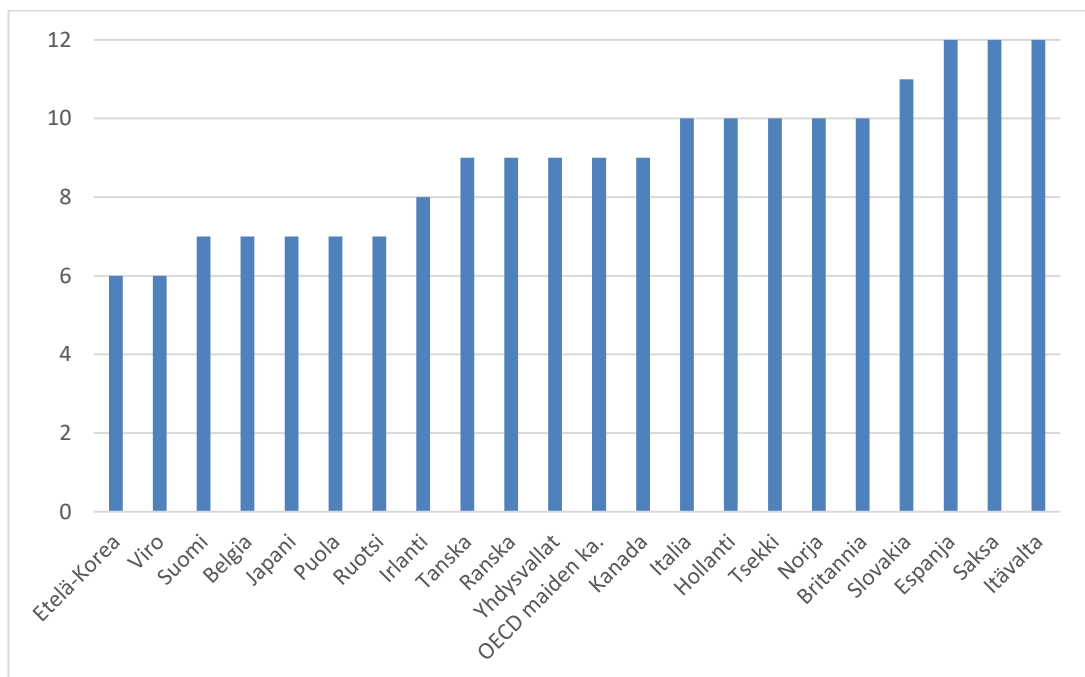
4.1 Tekoälyn vaikutukset työmarkkinoihin

Acemoglu ym. (2020) ovat tutkineet tekoälyn käyttöönottoa ja sen vaikutuksia Yhdysvalloissa. Heidän menetelmänään oli tunnistaa tekoälyn käyttöönottoa, sillä perustein, että se jättäisi jälkensä tekoälyn omaksuviin yrityksiin, koska he tarvitsevat työntekijöitä, jotka ovat erikoistuneet tekoälyyn liittyviin toimintoihin. Leduc & Liu (2019) tutkivat taas automaation vaikutuksia työllisyyteen kehittämällä johdonmukaisen kvantitatiivisen kehyksen yleiselle tasapainolle.

Yleisesti viimeaikaiset kehitysaskleet robottien, automaation sekä tekoälyn saralla ovat herättäneet huolta, että robotit voisivat tehdä työvoimasta tarpeetonta ja kenties johtaa Keynesin (1930) mainitsemaan teknologiseen työttömyyteen. Seisahtunut palkkojen kasvu sekä työvoiman osuuden pienentyminen ovat aiheuttaneet huolta, että automaation kasvava merkitys on heikentänyt työntekijöiden neuvotteluvoimaa. On kuitenkin huomattava, että käsitys siitä, että koneet korvaavat työntekijät ovat yksikertaistus automaation makrotaloudellista vaikutuksista. Vaikka koneet suorittavat yhä useammin standardisoituja tehtäviä, syntyy kuitenkin myös uusia tehtäviä, joihin työntekijöillä on suhteellinen etu. (Autor, 2015; Acemoglu & Restrepo, 2018; Leduc & Liu, 2019.)

Acemoglu & Restrepo (2016) pohtivat millä tavoin tekoäly ja automaatio voivat syrjäyttää ihmistyövoiman ja miten tämä voisi johtaa pienempään työllisyyteen ja paikallaan polkeviin palkkoihin. Heidän pääasiallisena innovaationaan toimii yhdistetty kehys, jossa työvoiman aiemmin suorittamat työtehtävät on automatisoitu, kun samaan aikaan uudet teknologiat täydentävät työvoimaa. Jos jo aiemmin mainittu ihmisten suhteellinen etu uusiin työtehtäviin on tarpeeksi tärkeää, voi työllisyys ja työvoima pitää osuutensa tasaisena pitkällä aikavälillä, vaikka kohtaisimme todella nopeaa teknologista kehitystä. Uusien työtehtävien tärkeyden he demonstroivat toisen teollisen vallankumouksen aikaan ilmenneillä teknologisilla sekä organisatorisilla muutoksilla, jotka loivat uusia työvoimaintensiivisiä tehtäviä. Nämä tehtävät loivat työpaikkoja niin uudennlaisille insinööreille kuin myös mekaniikoille, konduktööreille ja toimistotyöntekijöille. (Acemoglu & Restrepo, 2016.)

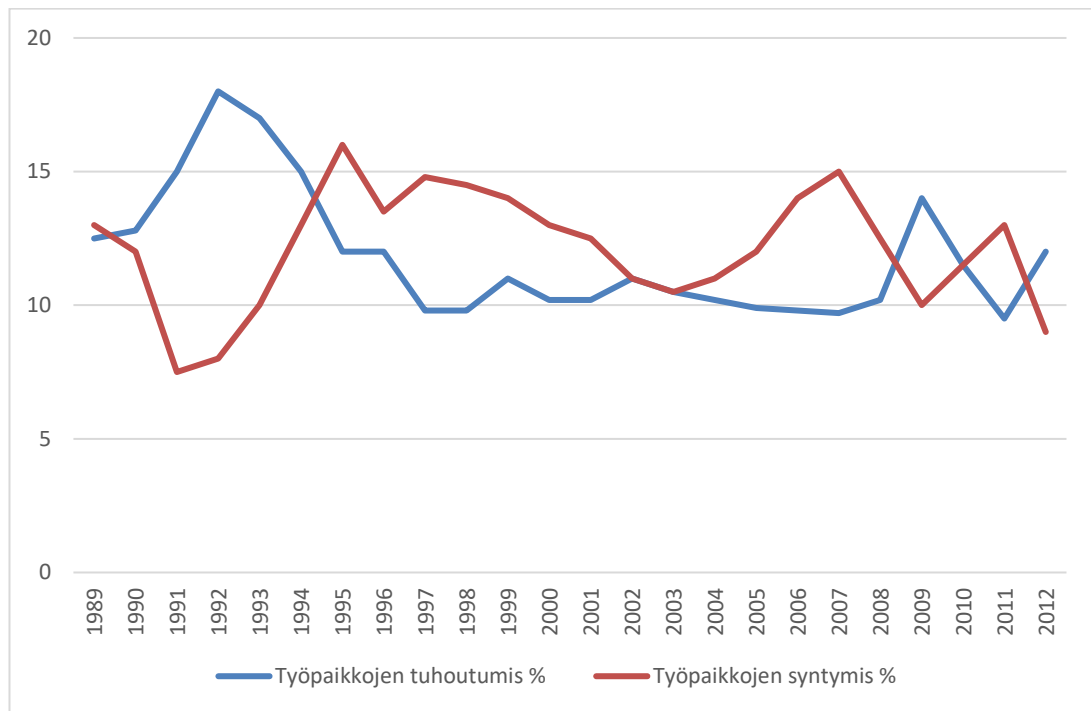
Myös nykypäivänä, kun teolliset robotit, uudet teknologiat ja tekoälylliset laitteet korvaavat työvoimaa, syntyy uusia työtehtäviä samalla tavoin kuin teollisen vallankumouksen aikaan. Tarvitaan uudenlaisia data analytikoita, insinöörejä ja ohjelmoijia täyttämään uudet työtehtävät. Kauhanen (2016) toteaa artikkelissaan, että robotisoituminen ja tekoäly eivät johda massiiviseen työttömyyteen. Näillä pystyttäisiin korvaamaan hänen mukaansa lähinnä yksittäisiä työtehtäviä, eikä niinkään kokonaisia ammatteja. Arviot niin sanottujen uhkien alla olevista työtehtävistä ei sinänsä ennusta tulevaisuudessa teknologista työttömyyttä muun muassa siksi, että uusien teknologioiden omaksuminen ja hyödyntäminen vaatii paljon aikaa ja sitä on vaikea ennakoida. Teknologioiden hyödyntämiseen vaikuttavat myös useat taloudelliset sekä lainsäädännölliset, mutta myös yhteiskunnalliset seikat.



Kuvio 5. Automatisaation uhkaamat työpaikat OECD-maissa (prosenttia työpaikoista) (Kauhanen, 2016).

Teknologisella kehityksellä olisi työllisyyteen vaikuttavia tekijöitä, mikäli se tuhoaisi enemmän työpaikkoja kuin synnyttäisi niitä. Historian pohjalta kuitenkin tiedämme, että aikaisemmin teknologisen kehityksen noustua, on sillä ollut tapana luoda enemmän uusia työpaikkoja kuin tuhota vanhoja. Työmarkkinat, jotka toimivat hyvin, pystyvät tavallisesti vastaamaan automaation tuomiin haasteisiin. Vaikka Suomen tapauksessa 7 prosenttia tämän päivän työtehtävistä olisikin uhattuna, ei määrä sinänsä

ole kovin suuri, kun otamme huomioon, että yrityssectorilla tuhoutuu jo nyt maassamme noin 12 prosenttia työpaikoista vuosittain. (Kauhanen, 2016.)

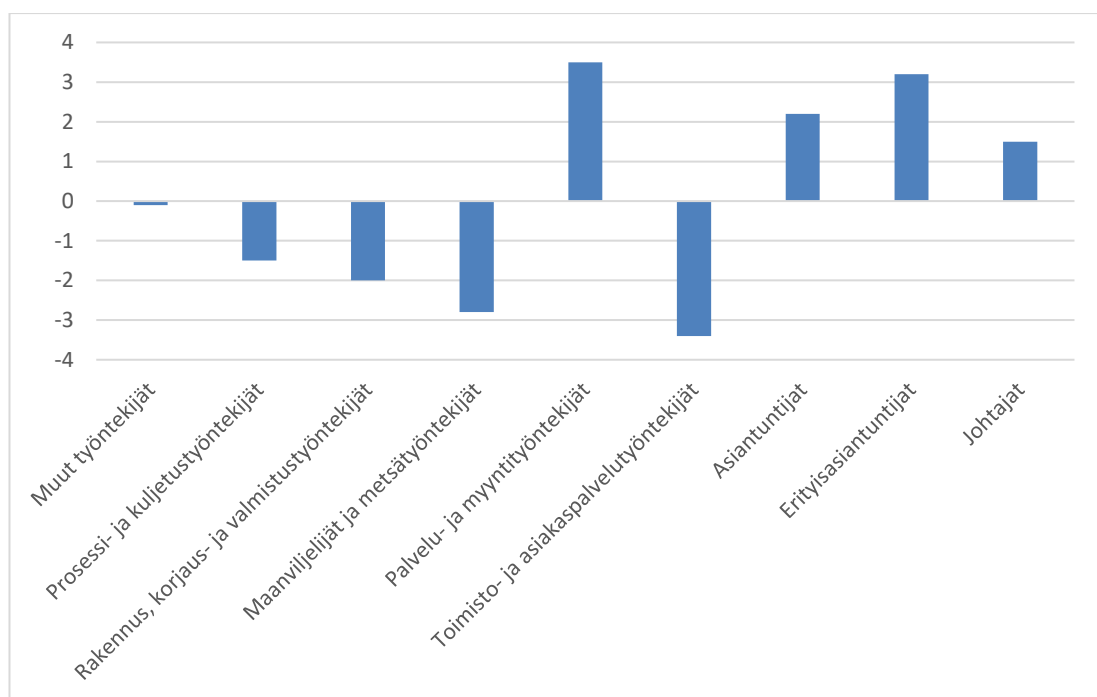


Kuvio 6. Työpaikkojen tuhoutuminen sekä syntyminen yrityssectorilla Suomessa vuosivälillä 1989–2011 (Asplund & Kauhanen, 2018).

Työpaikkoja Kauhasen (2016) mukaan syntyy jopa hieman enemmän kuin vanhoja tuhoutuu. Tähän syynä on se, että kyse on saman prosessin kahdesta eri puolesta. Teknologinen kehitys ja innovaatiot sekä synnyttävät, että tuhoavat työpaikkoja, mutta nämä eivät tuhoa itse työtä, se kenties muuttaa vaan muotoaan.

Nämä uudet syntyvät työpaikat ovat niin työsuhteiltaan, kuin myös ominaisuuksiltaan tavallisesti erilaisia kuin vanhat työpaikat. Tämän seurauksena sekä ammattirakenteet työmarkkinoilla, että itse ammattien tehtävärakenteet muuttuvat. Myös Suomessa tämänkaltainen tehtävien rakenteiden muutos on ollut melko kiivasta 2000-luvulla. Asplund & Kauhanen (2018) mainitsevat, että Suomessa on ollut Yhdysvaltojen tapaista polarisaatiokehitystä työmarkkinoilla. Tämä tarkoittaa sitä, että ammattien kehitys on johtanut työllisten osuuksien kasvamiseen pieni- sekä korkeapalkkaisissa tehtävissä, ja keskipalkkaisten tehtävien työllisyysosuus on ollut laskusuunnassa (Asplund & Kauhanen, 2018).

Kuviossa 7 on eritelty ammattirakenteiden muutoksia Suomessa 1990-luvun lopusta vuoteen 2015 saakka. Tämän mukaan ammattiluokkien kasvu on sijoittunut eritoten johtajiin, asiantuntijoihin sekä palvelu- ja myyntityöntekijöihin. Pieneneviä ammattiluokkia ovat taas olleet teollisuuden- ja rakentamisentyöntekijät sekä toimisto- ja asiakaspalvelutyöntekijät. Tämän syyksi Asplundin ja Kauhasen mukaan on ylivoimaisesti teknologinen kehitys. Ammattitehtävät, joiden osuus on pienentynyt, ovat suhteellisen helppo korvata tietotekniikalla, ja joita on voitu siirtää ulkomaille halvempiin olosuhteisiin. Kasvatvat ammattitehtävät ovat taas sellaisia, joiden suorittamista tietotekniikka tukee. (Asplund & Kauhanen, 2018.)



Kuvio 7. Ammattirakenteiden muutokset Suomessa vuosivälillä 1997–2015 (Asplund & Kauhanen, 2018).

Teknologinen kehitys, tekoäly sekä automaatio tulevat muokkaamaan työmarkkinoita ja ammattirakenteita niiden osaamisvaatimuksien muuttuessa. Tulevaisuudessa tehtävien luonne tulee muuttumaan yhä enemmän luovaksi ongelmanratkaisuksi, kun useampia ja useampia kognitiivisia ja manuaalisia tehtäviä tullaan automatisoimaan. Onkin selvää, että tällaisten taitojen kysyntä tulee vähentymään merkittävästi, kun koneet ja laitteet pystyvät suorittamaan nämä tehtävät. Vastaavasti ihmisten työtehtäviin sisältyy enenevässä määrin vuorovaikutusta ja luovuutta

ongelmanratkaisussa, joka tulee kiihdyttämään näiden taitojen kysyntää työmarkkinoilla entisestään, lähes jokaisessa ammatissa. Teknologinen kehitys myös mahdollistaa kysymyksiin vastaamisen entistä helpommin, nopeammin ja halvemmalli. Tulevaisuuden työmarkkinoilla tämä tarkoittaa sitä, että hyvät kysymykset tulevat olemaan entistä suuremmissa arvossa. Jotta voi pärjätä työmarkkinoilla tulevaisuudessa, on tärkeää osata luovaa ongelmanratkaisua, vuorovaikutusta, mutta myös kykyä kysyä hyviä kysymyksiä. (Asplund & Kauhanen, 2018.)

Työelämässä tapahtuvat muutokset tulevat olemaan yhä vähemmän ennakoitavissa, äkillisempiä sekä todennäköisesti myös nopeampia lisääntyvän teknologisen kehityksen sekä globalisaation myötä. Tässä uudessa teknologian ja globalisaation valtaamassa ympäristössä tärkeitä ominaisuuksia ovat sopeutumiskyky ja oppimistaidot, jotka edesauttavat työelämään pääsyä ensimmäistä kertaa, mutta myös tilanteessa, jossa ollaan palaamassa työelämään. Tämä haastaa Asplundin & Kauhasen mukaan koulutusjärjestelmän niin nuorisotasolla, mutta myös aikuiskoulutuksessa. Koulutuksen pitäisi pystyä varmistamaan se, että tulevilla työntekijöillä olisi sellaiset tiedot, taidot ja valmiudet, joka avaa ovet työelämään. Aikuiskoulutuksen pitäisi pystyä vastaamaan teknologisen kehityksen edesauttamiin rakennemuutoksiin työtehtävissä ja saada tarjottua joustavia jatko- ja uudelleen koulutusmahdollisuuksia. Tämä varmistaisi niin työssä pysymistä, kuin myös työhön palaamista. Vähenevissä ammattitehtävissä on todella harvoin mahdollista siirtyä suoraan teknologian synnyttämiin uusiin ja korvaaviin tehtäviin. (Asplund & Kauhanen, 2018.)

4.2 Tekoälyn vaikutukset innovaatioihin

Viimeisten vuosikymmenten aikana taloustieteilijät ovat arvostaneet sitä, että sellaisille tutkimusaloille, joilla keksinnön tekijälle ei ole siitä juurikaan hyötyä, investoidaan perustutkimukseen merkittävästi liian vähän. Onkin saatu huomattavan hyviä tietoja aiheista ja olosuhteista, joissa kannustimet innovaatioille voivat olla enemmän tai vähemmän vääristyneitä suhteessa niiden yleiseen tasoon sekä tutkimuksen suuntaan. Kun tarkastellaan tekoälyn ja teknologian kehityksen

vaikutuksia innovaatioihin, nousee kaksi kirjallisuudessa esillä ollutta teemaa. Ensiksi mahdollisuus sopimusongelmille, jotka liittyvät uuden laajasti sovellettavan tutkimusvälineen kehitykseen sekä koordinoitongelmat uuden ”yleiskäyttöisen” teknologian käyttöönotossa ja levittämisessä. Toisin kuin teknologinen kehitys suhteellisen kapeilla aloilla, kuten perinteinen automaatio tai teollisuusrobotit, nopeimman teknologisen kehityksen alat, kuten syväoppiminen, aiheuttavat todennäköisesti suuria haasteita molempiin suuntiin. (Cockburn, Henderson & Stern, 2018.)

On otettava huomioon haasteet, jotka liittyvät asianmukaisten kannustimien tarjoamiseen innovaatioille, jos innovaatio on sellainen, jolla voi olla potentiaalia saada aikaan teknologisia ja organisatorisia muutoksia laajalla rintamalla. Tällaiset ”yleiskäyttöiset” teknologiat ovat yleensä sellaisia keskeisiä keksintöjä, joilla on potentiaalia parantaa tuottavuutta tai laatua useilla eri toimialoilla. Tällaisesta esimerkkinä muun muassa kuudennen sukupolven matkapuhelinverkko 6G, jota on kaavailtu käyttöönotettavaksi 2030-luvulla. Tätä 6G verkkoa on kutsuttu yleiskäyttöiseksi alustaksi, jossa hyödynnetään uudenlaisia teknologisia mahdollistajia, kuten ihmisen ja koneen välisiä rajapintoja, hajautettua tietojenkäsittelyä ja tekoälyä paikallisissa pilvissä, moniaistista tarkkuushavainnointia ja datan fuusiointia sekä toimimista fyysisen maailman hallitsemiseksi (Yrjölä ym., 2021). Davidin (1990) tutkimus sähkömoottoreista osoitti, että kyseinen yleisluontoinen keksintö toi mukanaan merkittäviä teknologisia ja organisatorisia muutoksia usealle toimialalle niin teollisuuteen, maatalouteen, vähittäiskauppaan kuin rakentamiseenkin. Tämänkaltaisten keksintöjen ymmärretään yleensä täyttävän kolme eri kriteeriä, jotka erottavat ne muista innovaatioista. Nämä kriteerit ovat; niitä sovelletaan monella eri alalla, ne synnyttävät uusia innovaatioita ja ne itse kehittyvät parempaan suuntaan nopeasti. (Cockburn, Henderson & Stern, 2018.)

Bresnahan ja Trajtenberg (1995) korostavat yleiskäyttöisten teknologioiden vaikutuksia niin vertikaalisiin kuin horisontaalisiin ulottuvuuksiin innovaatioprosesseissa. Tämä voi johtaa investointeihin, jotka eivät ole tarpeeksi suuria, mutta myös erilaisiin häiriöihin investointien kohdentamisessa, riippuen siitä, missä määrin yksityiset ja yhteiskunnalliset tuotot jakautuvat eri sovellussektoreille. Erityisesti siinä tilanteessa, jossa yleiskäyttöisten teknologioiden ja kunkin

sovellussektorin välillä olisi ”innovaatiokomplementarisuutta”, eli innovaatiot täydentäisivät toisiaan, kannustimien puute jollakin sektorilla voisi aiheuttaa epäsuoria ulkoisvaikutuksia, jotka johtaisivat koko järjestelmän laajuiseen innovatiivisten investointien vähenemiseen. Vaikka yksityiset kannustimet innovatiivisiin investointeihin kullakin sovellussektorilla riippuvat sen markkinarakenteesta ja olosuhteista, joissa sitä voi käyttää, kyseisen sektorin innovaatiot lisäävät innovaatioita itse generatiivisessa esikoulutetussa muuntujassa (GPT), mikä puolestaan saa aikaiseksi kysyntää ja lisää innovaatioita muilla tuotantoketjun loppupään sovellussektoreilla. Näitä hyötyjä saadaan harvemmin hyödynnettyä alkuperäisellä sektorilla. Koordinoinnin puute GPT:n sekä sovellussektoreiden välillä vähentää todennäköisesti investointeja innovaatioihin. Näistä haasteista huolimatta, tulisi innovaatioiden kiertokulkua GPT:n ja sovellussektoreiden välillä saada vahvistettua, joka loisi koko talouden laajuisen systemaattisemman muutoksen, kun innovaatiotahti kasvaisi kaikilla sektoreilla ja aloilla. Monet tekoälyn osa-alueet voidaan ymmärtää generatiivisina esikoulutettuina muuntujina ja oppimalla esimerkeistä, kuten vaikkapa mikroprosessoreista, olisi todennäköisesti hyödyllinen perusta pohdittaessa niiden talouteen kohdistuvien vaikutusten suuruutta, mutta myös niihin liittyviä poliittisia haasteita. (Cockburn, Henderson & Stern, 2018.)

Toinen käsitteellinen kehys tekoälyn pohtimiselle, jonka Cockburn ym. (2018) nostavat esille, on tutkimusvälineiden taloustiede. Tutkimusaloilla jotkin innovaatiot avaavat uusia tutkimusväyliä tai yksinkertaisesti parantavat tuottavuutta (Cockburn, Henderson & Stern, 2018). Jotkin näistä uusista tutkimusvälineistä ovat keksintöjä, jotka eivät vai luo tai paranna tiettyä asiaa, vaan ne muodostavat uuden tavan luoda uusia asioita ja tuotteita, joita voidaan soveltaa paljon laajemmalti (Griliches, 1957). Grilichesin (1957) tutkimuksessa, sen sijaan että hybridimaissi olisi ollut keino luoda kokonaan uusi maissilajike, se edusti enemmänkin laajasti sovellettavissa olevaa menetelmää erilaisten uusien lajikkeiden jalostamiseen. Kun sitä sovellettiin haasteeseen luoda uusia lajikkeita, jotka olisi optimoitu monille eri alueille, kaksoisristeytyshybridisaation keksinnöllä oli suuri vaikutus maatalouden tuottavuuteen.

Tärkeä asia, joka nousee esille tällaisesta Grilichesin kaksoisristeytyshybridisaatiosta on innovaatio, joka luo uuden tavan innovoida. Tietyntyypisten tutkimusvälineiden

ja innovaatioiden taloudellinen vaikutus ei rajoitu vain niiden kykyyn vähentää kustannuksia, mutta myös siihen miten ne mahdollistavat uuden tavan innovoida. Ennen kuin hybridilajikkeiden elinvoimaisuutta ymmärrettiin systemaattisesti, maataloudessa oli keskitytty lannoitukseen ja miten parantaa tekniikoita mahdollistaa yhä erikoistuneempien luonnollisten lajikkeiden syntyminen. Kun hybridilajikkeita koskevat säännökset systematisoitiin ja näiden lajikkeiden elinvoimaisuudesta ymmärrettiin enemmän, maatalouden innovaatiomenetelmät muuttuivat, joka johti pitkään järjestelmälliseen innovointiin käyttäen näitä uusia välineitä ja tietoja. (Cockburn, Henderson & Stern, 2018.)

Kehitykset tekoälyssä ja koneoppimisessa omaavat suuren potentiaalin tutkimusvälineenä ongelmien luokitteluissa ja ennustamisessa. Tekoälypohjainen oppiminen onkin enemmän kuin vain rajoitettu ratkaisu johonkin tiettyyn ongelmaan. Se voi mahdollistaa monien ongelmien ja ratkaisujen löytämisen. Tekoälyyn perustuvalla oppimisella voidaan ehkä merkittävästi automatisoida niin sanottua löytämistä monilla aloilla, joilla luokittelu- ja ennustustehtävät ovat tärkeässä asemassa. Toisaalta ne voivat myös laajentaa ymmärrystämme siten, että ne avaavat uusien ongelmien joukkoja, joita voimme käsitellä sekä muuttaa radikaalisti tieteellisten yhteisöjen käsitteellisiä lähestymistapoja ja ongelmien muotoilua. Optisten linssien keksiminen esimerkiksi 1800-luvulla sisälsi tärkeitä taloudellisia vaikutuksia, kuten silmälasit, mutta optiset linssit mikro- ja teleskooppien muodossa sisälsivät todella suuria ja pitkäkestoisia vaikutuksia välillisesti. Tieteen, teknologisen muutoksen, kasvun ja hyvinvoinnin edistymistä tapahtui, kun pystyimme ensimmäistä kertaa ikinä näkemään hyvin pienet ja kaukaiset kohteet. Linssit avasivatkin täysin uusia tutkimusalueita ja teknologisia mahdollisuuksia, kuten nyt hyvin tiedämme. (Cockburn, Henderson & Stern, 2018.) Koneoppimista onkin luonnehdittu mahdollisuudeksi ”oppia lukemaan perimäämme” tavoilla, joihin ihmisen kognitio ja havainnointi eivät pysty (Leung, DeLong, Alipanahi & Frey, 2016).

Aghion ym. (2018) tutkivat miten automaatio ja tekoäly vaikuttavat innovointiprosessiin ja voidaanko innovointiprosessin tehtävät automatisoida täysin. Miten tekoäly vaikuttaisi uusien ideoiden tuottamiseen, miten sen mukaan ottaminen tuotantoon voi avata uusia ideoita ja miten se voi vaikuttaa kasvuun tätä kautta. Heidän mukaansa tutkimustehtävät, jotka ovat hyötyneet automatisaatioista ovat muun muassa

tutkimusaineistojen ja tietojen hankkiminen, tietojen analysointi, matemaattisten ongelmien ratkaiseminen sekä erilaisten tasapainolopputulosten laskeminen. Taloustieteellisten näkemysten lisäksi hyötyneitä tehtäviä ovat myös esimerkiksi erilaisten kokeiden suorittaminen, genomien eli perimän sekvensointi sekä monien kemiallisten reaktioiden ja materiaalien tutkiminen. Toisin sanoen samoihin tehtäviin perustuvan mallin soveltaminen tuotantofunktioon, jossa on mukana ideat sekä tutkimustehtävien automatisoinnin huomioon ottaminen vaikuttavat merkitykselliseltä. (Aghion, F. Jones & I. Jones, 2018.)

Tekoälyä omaksutaan yhä enenevässä määrin osaksi organisaatioiden innovaatioprosesseja ja tämä näkyy myös tieteellisessä työssä suurelta osin. Organisaatiot ovat suhteellisen nopeasti löytäneet tavan käyttää hyväksi teknologiaa kehittääkseen omaa innovatiivisuuttaan sekä suorituskykyä. Tarkemmin ottaen yritykset ovat oppineet kuinka innovatiiviset teknologiat auttavat heitä saamaan kilpailullista etua markkinoilla. Digitaalisten teknologioiden lisäksi, jotka auttavat yrityksiä innovoimaan niin sanotulla digitaalisella aikakaudella, mukaan on tullut myös tekoäly, joka muuttaa sitä, miten yritykset todellisuudessa innovoivat ja miten kuluttajat reagoivat tekoälyyn perustuviin innovaatioihin (Mariani, Machado, Magrelli & Dwivedi, 2022). Taloustieteilijät ovatkin viime aikoina koittaneet saada vastausta siihen, mikä vaikutus tekoälyllä on innovaatioihin ja he peräänkuuluttavat tutkimuksen lisäämistä niin toimiala, kuin organisatorisella tasollakin (Cockburn, Henderson & Stern, 2018).

Mariani ym. (2022) analyysit organisaatioiden tekoälyn omaksumisesta osaksi innovaatioita johtavat kolmen eri kategorian lopputuloksiin, joita ovat; taloudelliset lopputulemat, kilpailulliset ja organisatoriset lopputulemat sekä innovatiiviset lopputulemat. Taloudelliset seuraukset linkittyvät vahvasti yrityksen suorituskykyyn ja tehokkuuteen. Kilpailulliset ja organisatoriset seuraukset kasvattavat yrityksen kilpailuetua epävakaisissa markkinaympäristöissä ja uudelleen muotoilevat yrityksen dynaamisia valmiuksia tarjoamalla siten mahdollisuuden siirtyä kasvavista innovaatiovalmiuksista radikaaleihin tai suuriin valmiuksiin. Viimeiseksi innovaatio seuraukset tukevat yritysten tuote, prosessi sekä liiketoimintamallia koskevia innovaatioita. Tämän lisäksi tekoäly voi auttaa tunnistamaan uusia mahdollisuuksia

tuotekehitykseen mahdollistaen tekijänoikeuksien turvallisemman luonnin ja hyödyntämisen. (Mariani, Machado, Magrelli & Dwivedi, 2022.)

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Aloitin tämän tutkielman käsittelemällä tekoälyä ja sen vaikutuksia talouskasvuun niin automaation kuin tuottavuuden näkökulmista. Miten kasvuprosessi voi muuttua, kun tuotantofunktioon otetaan mukaan automaation vaikutukset, jotka seuraavat tekoälyn lisääntyvää käyttöönottoa. Automaation vaikutukset kokonaisuudessaan ovat varsin merkittäviä taloudelle, kun pääomanosuus kasvaa investoitaessa tekoölyyn. Tätä varten tuotantofunktioon onkin otettava mukaan sekä automatisoidut tehtävät, jotka lisäävät pääoman osuutta, ja ei-automatisoidut tehtävät, jotka lisäävät työvoiman kustannuksia. Tähän saimme Zeiran (1998) tutkimuksen pohjalta hyvän vastauksen, millä eri tavoin erilaisilla talousalueilla suhtaudutaan tekoölyn ja automaation käyttöönottoon. Kun talousalueen korkotasoa on korkea, on tällä alueella kannustin tuottaa hyödykkeitä käyttämällä työvoimaa. Kun palkkataso on tietyllä alueella korkea, kannustin muuttuu automaation suuntaan. Tämä on varsin selkeästi nähtävissä kehittyneissä talouksissa, joissa automaation määrä on korkea verrattuna matalamman elintason maihin, joissa korkotasot ovat korkeita ja palkat matalia.

Se miten lopulta automaation lisääntyvä määrä vaikuttaa talouden bruttokansantuotteeseen ja hyödykkeiden osuuksiin oli myös keskiössä. Aghionin ym. (2018) tutkimuksen perusteella tähän voidaan vastata siten, että kun automatisoitujen hyödykkeiden osuus kasvaa, kasvaa myös niiden osuus bruttokansantuotteesta ja tämä kasvattaa pääomaosuutta, kun automatisoitujen ja ei-automatisoitujen hyödykkeiden suhde on vakio. Kun näiden hyödykkeiden suhde kasvaa, osuus bruttokansantuotteesta sekä pääomaosuus laskee. Tähän liittyen substituutiojousto on tärkeässä osassa. Jos tämä on alle yhden, toimii dominoivana voimana hintavaikutus, joka sitä kautta vaikuttaa suurelta osin hyödykkeiden hintoihin. Tämän vuoksi Baumolin kustannustauti liittyy vahvasti tuotannon automaatioon. Loppujen lopuksi, kun automaation määrä tuotannossa kasvaa, näiden hyödykkeiden määrä nousee ja niiden hinnat laskevat. Alhainen substituutiojoustavuus saa automatisoitujen hyödykkeiden osuuden kuitenkin laskemaan bruttokansantuotteesta.

Miten sitten automaation ja tekoälyn tuomat vaikutukset talouteen voivat näyttäytyä tulevaisuudessa muilla tavoin kuin tuottavuuden kasvamisena. Kun aikaisemmin keskustelut ovat lähinnä koskeneet talouskasvun jämähtämistä paikalleen, nyt

näköpiirissä on ehkä enemmänkin odotettu tuottavuuden kasvua ja tekoälyn tuomia mahdollisuuksia yhä useamman työn suorittamiseen. Esille nousee taloustieteellinen singulariteetti, jossa teknologinen kehitys olisi niin voimakasta, että taloutemme päätyisi räjähdysmäiseen kasvuun. Tällaisessa tilanteessa tuottavuus kasvaisi käytännössä äärettömästi eikä loppua näkyisi. Nordhausin (2021) tutkimus käsittelee juuri tällaista singulariteettia ja voisiko olla mahdollista, että teknologiamme kehittyisi niin kiivaaseen tahtiin. Singulariteetti kuulostaa kuitenkin lähinnä fiktiolta, kun sen vaikutuksia miettii. Se, että jossain vaiheessa jokin tekoälyllinen kone olisi ihmisen viimeinen keksintö ei ole kuitenkaan lähellä. Mutta on hyvä pohtia millä tavoin kysyntä- ja tarjontapuolella olisi mahdollista päätyä räjähdysmäiseen kasvuun. Kun nyt mietimme menneisyydestä tähän päivään, olemme saaneet aikaiseksi laitteita, jotka voivat lentää, ja tietokoneita, jotka laskevat käsittämättömiä laskutoimituksia. Ei olisi siis ihme, mikäli jokin päivä kehitämme sellaista tekoälyä, joka korvaa ihmisen raa'alta älykkyydeltään. Mutta työn suorittaminen vaatii myös paljon muuta kuin vain älykkyyttä.

Singulariteetin oletetaan olevan käsillä Nordhausin (2021) mukaan, kun vuosittainen talouskasvu ylittää 20 prosenttia vuodessa. Tähän liittyen tutkielmassa käytiin läpi testejä, joista vain kaksi osoittautui heikosti positiivisiksi. Nousevien pääomaosuuksien sekä informaatio pääomaosuuksien oletettaisiin olevan singulariteettia vastaavalla tasolla päälle sadan vuoden päästä, joten huolenaihe ei ole ihan hetkeen odotettavissa. On kuitenkin tärkeä huomata, että singulariteetti on luonteeltaan erilainen kuin esimerkiksi aiemmat innovaatiot. Sen periaate on, että se tulee korvaamaan älykkyydellään ihmisen tekemän työn kokonaan. Innovaatiot eroavat singulariteetista tässä suhteessa, kun innovaatiot vaativat aina ihmisen käyttämään tätä uutta keksittyä asiaa, kuten höyrymoottoria tai sähköä aikoinaan. Voikin olla hyödyllistä tarkastella singulariteetin näkymiä kilpailuna tehtävien automatisoinnin ja tehtävien innovoinnin välillä.

Vaikka jo 1930-luvulla Keynes mainitsi teknologisesta työttömyydestä, ja sitä on ehkä odotettukin tulevaisuudessa, näyttää nykypäivänä syntyvän jopa enemmän uusia työtehtäviä kuin vanhoja tuhoutuu. Tämä viittaa tämän päivän tilanteeseen, jossa teknologinen työttömyys ei näytä toteutuvan. Vaikka osa työtehtävistä tuhoutuukin tekoälyn kehityksen myötä, uusia ja vaativampia tehtäviä syntyy tilalle, joihin

tarvitaan yhä ihmisen tekemään työtä. Singulariteetti ei siis ole ainakaan tämän puolesta vielä nykyajan ongelma. Sen sijaan on syytä pohtia miten tekoäly ylipäättensä vaikuttaa työllisyyteen ja työpaikkoihin. Teknologinen kehitys ennen kaikkea helpottaa ihmisten työtä, mutta myös parantaa laatua pitkässä juoksussa. Ja vaikka teolliset robotit tai uudet teknologiat korvaavatkin työvoimaa osittain, on tähän asti trendi ollut se, että uusia työpaikkoja syntyy enemmän kuin vanhoja tuhoutuu teknologisen kehityksen myötä. Kuten Kauhanen (2016) artikkelissa toteaa, ei tekoäly ole korvaamassa kokonaisia ammatteja, vaan lähinnä yksittäisiä työtehtäviä, jotka taas luovat tilalle uusia työtehtäviä.

Teknologinen kehitys, tekoäly sekä automaatio tulevat mullistamaan työmarkkinoita, mutta myös ammattirakenteita, kun niiden osaamisvaatimukset muuttuvat näiden myötä. Voikin olettaa, että tulevaisuudessa erilaisten työtehtävien luonne painottuu yhä enenevässä määrin luovaan ongelmanratkaisuun, eikä niinkään mekaaniseen suorittamiseen. Työmarkkinoiden kysyntä muuttuu vastaamaan enemmän näitä taitoja ja mekaanista suorittamista vaativat työt tulevat kuihtumaan vuosien saatossa. Työelämässä tapahtuvat muutokset tulevat olemaan vähemmän ennakoitavissa, äkillisempiä ja nopeampia teknologisen kehityksemme myötä.

On hyvä myös huomioida mitä voi tapahtua innovoinnille ja innovaatioille tekoälyn kehittyessä pitkälle. Kuten jo totesin, tulee singulariteetti ja innovaatiot erottaa toisistaan. Tämä voi luoda sellaisen ymmärryksen hamassa tulevaisuudessa, jossa innovoinnille ei ole enää kannustimia. Mutta on myös hyvin odotettavaa, ja itse asiassa jo todellistakin muuan muassa ChatGPT:n kautta, että jossain vaiheessa tietyn tyyppinen tekoäly voi olla niin sanottu yleisluontoinen innovaatio, joka tuo ratkaisuja monelle eri taholle. Tekoälypohjainen oppiminen on esimerkiksi enemmän kuin vain rajoitettu ratkaisu johonkin tiettyyn ongelmaan. Tällainen tulee todennäköisesti auttamaan monien ongelmien ja ratkaisujen löytämisessä laajalla rintamalla. Tämän kaltainen tekoäly voi itsessään innovoida tulevaisuudessa, jolloin se voi auttaa merkittävästi löytämään tiettyjä asioita muun muassa erilaisissa luokittelu- sekä ennustustehtävissä.

Tekoälyn käyttö monien eri organisaatioiden innovointiprosesseissa on yleistynyt merkittävää vauhtia ja tämä sama trendi on näkyvissä myös tieteellisessä työssä

suurelta osin. Yritykset ovatkin oppineet kuinka innovatiiviset teknologiat auttavat niitä saamaan kilpailullista etua markkinoilla. Tekoäly tulee todennäköisesti muuttamaan kokonaan sitä, miten yritykset ylipäättänsä innovoivat ja miten kuluttajat tulevat reagoimaan tekoälyyn perustuviin innovaatioihin. Mutta todellisuudessa meillä ei ole vielä vastausta siihen, miten tekoäly tulee vaikuttamaan innovaatioihin.

Tämän tutkielman tarkoitus ei ole niinkään ollut tuoda lukijalle uusia ratkaisuja ymmärtää tekoälyn vaikutuksia yleiseen talouteemme, vaan ennemminkin esittää uusia näkökulmia tulkita taloutta, tekoälyä ja miten suuriakin vaikutuksia sillä voi olla. Tutkimustiedon laajuus jo itsessään kertoo siitä, että aihe on merkittävä, mutta myös se, että jo 1930 luvulta lähtien Keynes on ottanut huomioon kasvavan tekoälyn määrän. Tekoäly ei ehkä sanana ole vielä ollut käytössä tuossa vaiheessa, mutta sen esihistorialliset termit ovat kuvanneet tilannetta, jota tekoäly nykypäivän maailmassa kuvaa.

Keskustelimme tekoälyn mahdollisista vaikutuksista talouskasvun prosessiin esittelemällä tekoälyn tuotantofunktiossa ja yritimme sovittaa yhteen kehittyvän automaation vakaina pysyneiden pääomaosuuksien ja bruttokansantuotteen per henkilö kasvun kanssa. Aghionin, F. Jonesin ja I. Jonesin (2018), mallissa, jossa he ottivat käyttöön Baumolin kustannustaudin Zeiran automaation malliin, tuotti laajan joukon mahdollisia tuloksia. He johtivat näin riittävät ehdot, joiden täytyessä voidaan saavuttaa tasapainoinen kokonaiskasvu, kun pääomaosuus pysyy vakiona alle 100 prosentissa, vaikka automaatio olisi lähes täydellistä. Loppujen lopuksi Baumolin kustannustauti johtaa teollisuuden ja maatalouden bruttokansantuoteosuuksien pientymiseen, mutta tätä tasapainottaa se, että automatisoidun talouden osuus kasvaa ajan myötä. Työn osuus pysyy merkittävänä Baumolin toteamuksen vuoksi, kun kasvu ei määräydy sen mukaan, missä olemme hyviä, vaan sen mukaan mikä on tärkeää ja vaikeasti parannettavissa.

Olemme käyneet läpi millä tavalla tekoäly vaikuttaa tuottavuuteen ja eri maiden talouksiin sekä missä maissa tekoälyn omaksumiselle ja käyttöönotolle on otolliset olosuhteet. Voiko tekoäly kehittyä tällaisissa olosuhteissa sellaiseksi kokonaisuudeksi, joka jossain vaiheessa siivittäisi ihmiskunnan räjähdysmäiseen taloudelliseen kasvuun, josta paluuta nykyiseen ei enää olisi. Kyseinen tilanne viittaa

singulariteettiin, jossa talouskasvu ylittäisi 20 prosenttia vuodessa. Käsittelimme Nordhausin (2021) tutkimuksien avulla miten singulariteettiin voitaisiin päätyä ja onko tämä lähitulevaisuudessa odottava uhka. Testien lopputulema oli kuitenkin se, että singulariteetti ei ole lähellä. Singulariteettia koskeva keskeinen analyttinen oivallus on se, että jos informaatio ja tavanomaiset asiat ovat joustavia korvikkeita keskenään joko kulutuksessa tai tuotannossa, kasvu kasvaa entisestään, mahdollisesti hyvinkin nopeasti. Rajoittamattoman kasvun suhteen singulariteetti voi syntyä vain, jos tarjontapuolella on joustava substituoitio. Jos informaatio ja tavanomaiset asiat ovat joustamattomia tuotannossa ja kulutuksessa, informaatioteknologian nopeat kehitysskeleettit ovat lopulta merkityksettömiä taloudelle.

Yksi taloustieteen tärkeistä oivalluksista on se, että siinä korostetaan talousjärjestelmän panosten ja tuotosten heterogeenisuutta. On varmasti totta, että teknologinen muutos raa'an laskennan tuotannossa on ollut ilmiömaista viimeisen vuosisadan aikana. Taloudellinen toiminta on kuitenkin myös paljon muuta kuin vain laskentatehoa. Jotta tietokoneiden kasvavat ominaisuudet johtaisivat singulariteettiin, pitäisi niiden pystyä kattamaan kaikki ihmisen suorittamat toiminnot, ei vain laskemaan numeroita, ratkaisemaan yhtälöitä tai tulkitsemaan puhetta. Tämä sisältää myös sairaanhoidon, lastenhoidon tai vaikkapa toiminnan poliisina.

Singulariteetti ei siis vielä ehkä tässä vaiheessa ole todellinen uhkakuva, mutta kyllä tekoäly silti vaikuttaa vahvasti talouteemme. Monet automaation, tekoälyn ja teknologian vaikutuksista kohdistuvat työmarkkinoihin, mutta myös innovaatioihin. Valitettavasti emme vain vielä tiedä millä kaikilla tavoin innovaatiokäyttäytyminen voi muuttua teknologian kehittyessä entisestään.

Ehkä vielä viime vuosikymmenellä ajatuksena on ollut, että teknologinen kehittyminen ja tekoäly tulevat jossain vaiheessa aiheuttamaan massiivista työttömyyttä ja syrjäyttämään ihmistyövoiman ylipäättänsä. Mutta tällainen kuva viittaa ehkä enemmänkin singulariteettiin, joka on äärimmäinen teknologisen kehityksen muoto. Kauhasen (2016) tutkimuksessa todetaan, että robotisoituminen ja tekoäly eivät johda massiiviseen työttömyyteen, vaan teknologinen kehitys luo jopa enemmän uusia työpaikkoja, kuin vanhoja tuhoutuu. Tämä kasvavien ammattitehtävien kirjo on vieläpä todennäköisesti sellaista, jota tietotekniikka tukee, ja jonka ympärille työpaikat

muodostuvat. Kuten jo aiemmin on todettu, ei pelkästään raaka laskentateho takaa työtehtävästä suoriutumista, vaan mukana tulee olla myös inhimillisiä piirteitä. Nämä seikat tulevat muokkaamaan tulevaisuuden työmarkkinoita yhä enemmän luovuutta kohden ja ongelmanratkaisu sekä kognitiiviset kyvykkyydet tulevat olemaan entistä kysytympiä taitoja.

Nämä samat tekijät vaikuttavat ja ovat jo vaikuttaneet merkittävästi myös innovointiin ja innovaatioihin. Yritykset ovat omaksuneet nopeasti tekoälyn osaksi omia innovaatioprosessejaan ja löytäneet tavan käyttää teknologiaa hyväkseen kehittääkseen toimintaansa. Miten yritykset saavat luotua itselleen kilpailuetua markkinoilla innovatiivisilla teknologioilla. Mariani ym. (2022) muun muassa toteavat miten tekoäly todellisuudessa muokkaa yrityksien tapaa innovoida, mutta myös sitä miten kuluttajat loppujen lopuksi suhtautuvat tekoälyyn perustuviin innovaatioihin. Cockburn, Henderson & Stern (2018) muistavat vielä lopuksi muistuttaa meitä siitä, että me emme oikeastaan vielä tiedä mitä kaikkia vaikutuksia tekoälyllä on innovaatioihin ja tämä vaatii lisää tutkimusta niin toimiala kuin organisatorisella tasolla.

LÄHTEET

- Acemoglu, D., & Autor, D. (2011). Skills, tasks and technologies: Implications for employment and earnings. In *Handbook of labor economics* (Vol. 4, pp. 1043-1171). Elsevier.
- Acemoglu, D., Autor, D., Hazell, J., & Restrepo, P. (2020). AI and jobs: Evidence from online vacancies (No. w28257). National Bureau of Economic Research.
- Acemoglu, Daron, and Pascual Restrepo. 2016. "The Race between Man and Machine: Implications of Technology for Growth, Factor Shares and Employment." NBER Working Paper no. 22252, Cambridge, MA
- Acemoglu, Daron, and Pascual Restrepo. 2018. "The Race between Man and Machine: Implications of Technology for Growth, Factor Shares, and Employment." *American Economic Review* 108 (6): 1488–1542.
- Aghion, P., Jones, B. F., & Jones, C. I. (2018). Artificial intelligence and economic growth. In *The economics of artificial intelligence: An agenda* (pp. 237-282). University of Chicago Press.
- Asplund, R., & Kauhanen, A. (2018). Teknologinen kehitys, ammattirakenteiden muutos ja osaaminen. *Ammattikasvatuksen aikakauskirja*, 20(1), 91-98.
- Autor, D. H. (2015): "Why Are There Still So Many Jobs? The History and Future of Workplace Automation," *Journal of Economic Perspectives*, 29, 3–30
- Baumol, William J. 1967. "Macroeconomics of Unbalanced Growth: The Anatomy of Urban Crisis." *American Economic Review* 57:415– 26.
- Bostrom, Nick. 2006. "How Long before Superintelligence?" *Linguistic and Philosophical Investigations* 5 (1): 11–30
- Bresnahan, T. and M. Trajtenberg (1995) "General Purpose Technologies 'Engines of Growth'?" *Journal of Econometrics*, 65 (1995) 83-108.
- Chui, M. (2017). Artificial intelligence the next digital frontier. McKinsey and Company Global Institute, 47(3.6).
- Cockburn, I. M., Henderson, R., & Stern, S. (2018). The impact of artificial intelligence on innovation: An exploratory analysis. In *The economics of artificial intelligence: An agenda* (pp. 115-146). University of Chicago Press.

- Goldfarb, A., Gans, J., & Agrawal, A. (2019). *The Economics of Artificial Intelligence: An Agenda*. University of Chicago Press.
- Good, I. J. 1965. "Speculations Concerning the First Ultraintelligent Machine." *Advances in Computers* 6: 31– 88.
- Griliches, Z. (1957) "Hybrid Corn: An Exploration in the Economics of Technological Change," *Econometrica*, 25(4), 501-522.
- Grossman, Gene M., and Elhanan Helpman, *Innovation and Growth in the World Economy* (Cambridge, MA: MIT Press, 1991)
- Heilbrun, J. (2003). Baumol's cost disease (No. HCE; 11).
- Hemous, David, and Morten Olsen. 2016. "The Rise of the Machines: Automation, Horizontal Innovation and Income Inequality." Unpublished manuscript, University of Zurich.
- Jones, C. I., & Stanford, G. S. B. (2023). *The ai dilemma: Growth versus existential risk*.
- Jovanovic, Boyan, and Saul Lach, "The Diffusion of Technology and Inequality among Nations," NBER Working Paper No. 3732, 1991.
- Kaldor, N. (1961). Capital accumulation and economic growth. In *The Theory of capital: proceedings of a conference held by the International Economic Association* (pp. 177-222). London: Palgrave Macmillan UK.
- Kauhanen, A. (2016). *Uusi työnjako. Robotit töihin*.
- Keynes, J. M. (1930): "Economic Possibilities for Our Grandchildren," in *Essays in Persuasion*, New York: Norton Co.
- Kurzweil, R. (2005). Human life: The next generation. *New Scientist*, 24(09).
- Leduc, S., & Liu, Z. (2019, July). *Robots Or Workers?: A Macro Analysis of Automation and Labor Markets*. Federal Reserve Bank of San Francisco.
- Leung, M.K.K., A. Delong, B. Alipanahi, and B.J. Frey (2016) "Machine Learning in Genomic Medicine: A Review of Computational Problems and Data Sets," *Proceedings of the IEEE*, 104(1): 176-197.

- Lucas, R. E. (1990). VWhy Doesnt Capital Flow from Rich to Poor Countries? V. V American Economic Review, 80(2), 92-96.
- Mariani, M. M., Machado, I., Magrelli, V., & Dwivedi, Y. K. (2022). Artificial intelligence in innovation research: A systematic review, conceptual framework, and future research directions. Technovation, 102623.
- Nordhaus, W. D. (2008). Baumol's diseases: a macroeconomic perspective. The BE Journal of Macroeconomics, 8(1).
- Nordhaus, William D. 2021. "Are We Approaching an Economic Singularity? Information Technology and the Future of Economic Growth." American Economic Journal: Macroeconomics, 13 (1): 299-332.
- Parente, Stephen L., and Edward C. Prescott, "Barrier to Technology Adoption and Development," Journal of Political Economy, CII (1994), 298-321.
- Peretto, Pietro F., and John J. Seater. 2013. "Factor- Eliminating Technical Change."Journal of Monetary Economics 60 (4): 459– 73.
- Romer, P. M. (1986). Increasing returns and long-run growth. Journal of political economy, 94(5), 1002-1037.
- Romer, P. M. (1990). Endogenous technological change. Journal of political Economy, 98(5, Part 2), S71-S102.
- The Economist Newspaper. (2022, December 6). Artificial Intelligence is permeating business at last. The Economist. <https://www.economist.com/business/2022/12/06/artificial-intelligence-is-permeating-business-at-last>
- The Economist Newspaper. (2023, July 16). Your employer is (probably) unprepared for Artificial Intelligence. The Economist. <https://www.economist.com/finance-and-economics/2023/07/16/your-employer-is-probably-unprepared-for-artificial-intelligence>
- Vinge, Vernor. 1993. "The Coming Technological Singularity: How to Survive in the Post- Human Era." In Vision- 21: Interdisciplinary Science and Engineering in the Era of Cyberspace, 11– 22. Proceedings of a Symposium Coauthored by the NASA Lewis Research Center and the Ohio Aerospace Institute Held in Westlake, Ohio, Mar. 30– 31.
- Yrjölä, S., Ahokangas, P., Arslan, A., Matinmikko-Blue, M., Golgeci, I., & Tarba, S. (2021). Artificial intelligence in the telecommunication sector: Exploratory

analysis of 6G's potential for organizational agility. *Entrepreneurial Connectivity: Network, Innovation and Strategy Perspectives*, 63-81.

Zeira, J. (1998). Workers, machines, and economic growth. *The Quarterly Journal of Economics*, 113(4), 1091-1117.