

Radical Technology Inquirer (RTI) -tulosten tulkinta ravinnontuotannon ja ravitsemuksen tulevaisuudesta

Maria Höyssä, erikoistutkija, tulevaisuuden tutkimuskeskus, Turun yliopisto

Lausunto on laadittu RTI-hankkeen tulosraportin (Societal Transformation 2025 – 2045 – 100 Anticipated Radical Technologies, 20 Regimes. The First AI-Assisted Radical Technology Inquiry) pohjalta.

RTI-lähestymistavan menetelmällinen lähtökohta

Radical Technology Inquirer -menetelmä (RTI) ennakoii teknologioiden yhteiskunnallisia vaikutuksia. Menetelmä mallintaa yhteiskunnallisen kehityksen 20:een arvonaluonnin osa-alueeseen, joita ovat muun muassa henkilöliikenne, logistiikka, energiantuotanto, tavaroiden valmistus, terveys ja ravitsemus. Teknologiakehitys puolestaan mallinnetaan tunnistamalla sata sellaista kehittymässä olevaa teknologiaratkaisua, joiden kypsyminen voisi voimallisimmin vaikuttaa arvonaluonnin tapoihin 20 vuoden aikajänteellä. Esimerkiksi vuoden 2018 RTI-ennakoinnissa neuroverkkoihin ja syväoppimiseen liittyvät ratkaisut ennakoitiin selvästi kaikkein voimallisimmin tulevaisuuden arvonaluontiin vaikuttavaksi teknologiaratkaisuksi, ja esimerkiksi niihin pohjautuvat suoratoistopalveluiden suositusjärjestelmät, puheentunnistus, lääketieteellinen kuvadiagnostiikka ja generatiivinen tekoäly ovatkin kahdeksassa vuodessa jo alkaneet muokata yhteiskuntaa.

Kukin arvonaluonnin osa-alue mallinnetaan meneillään olevaksi siirtymäksi nykyisestä arvonaluonnin tavasta (valtaregiimi) uusilla keinoilla tapahtuvaksi arvonaluonniksi (haastajaregiimi). Esimerkiksi henkilöliikenteen siirtymän ennakoidaan tapahtuvan kuljettajallisen henkilöautoilun ja joukkoliikenteen yhdistelmästä (valtaregiimi) kohti palveluna toteutettavaa kuljettajatonta liikennettä (haastajaregiimi).

RTI-mallissa arvonaluontitapojen siirtymät selittyvät ensisijaisesti radikaalien teknologiaratkaisuiden yleistymisellä yhteiskunnassa. RTI-menetelmässä keskeistä on huomioida kaikki 20 arvonaluontialuetta yhtä aikaa, jotta saadaan esiin, missä määrin minkäkin teknologioiden vaikutus on leviämässä useille arvonaluonnin osa-alueille. RTI-menetelmän keskeinen oletus on, että mitä useampaan arvonaluonnin osa-alueeseen teknologian ennakoidaan vaikuttavan, sen nopeammin se kehittyy, koska sitä todennäköisemmin kehitykseen ohjautuu resursseja useilta sektoreilta. Tekoälyratkaisuiden ennakoitu merkitys siis korostuu, koska niiden voidaan olettaa tukevan uusia arvonaluonnin tapoja käytännössä kaikilla sektoreilla. Jokaisella arvonaluonnin osa-alueella on kuitenkin omat teknologiset erityispiirteensä.

On huomattava, että vuoden 2026 RTI-päivitys on tarkoitettu yleiseksi globaalien tason katsaukseksi teknologian vaikutuksiin (kehittyneissä maissa). Tuloksia ei ole erityisesti räätälöity Suomen oloihin tai erityispiirteisiin.

Taustaselityksen lähteet: Societal transformations 2026 – 2045 -raportin yhteenveto-osa, tausta-aineistona myös Societal transformation 2018 – 2027 -raportti sekä metodiartikkeli: Linturi et al. (2022) Radical Technology Inquirer: a methodology for holistic, transparent and participatory technology foresight. European Journal of Futures Research 10:18, <https://doi.org/10.1186/s40309-022-00206-6>

Ravitsemukseen liittyvän arvonluonnin ennakoitu muutos: valtaregiimi ja haastajaregiimi

Tekstikatkelmat on yhdistelty seuraavista lähteistä: Societal transformations 2026 – 2045 - raportin yhteenveto-osa sekä liitteiden 3 ja 5 ravitsemuksen (sustenance) arvonluontia kuvaavat ja ennakoivat osiot. Teknologiaratkaisuiden kypsyyssarviot on haettu liitteestä 1. Tekstit on konekäännetty suomeksi ja editoitu (esim. lyhenteitä korvattu, ilmaisua tiivistetty sekä luettelointia paikoin lisätty ja paikoin poistettu luettavuuden parantamiseksi).

Ravitsemuksen arvonluonnin tarkoitus on turvata ravinnonsaanti ihmisille ja lemmikeille. RTI-viitekehyksessä tähän katsotaan liittyvän seuraavia arvoja: koettu laatu (maku, ruokailuun liittyvä sosiaalinen nautinto), kustannukset (hinta ja vaiva), terveellisyys (ravitsevuus, turvallisuusriskien kontrollointi), huoltovarmuus (ruuan saatavuus jokapäiväisessä elämässä sekä pidemmällä tähtäimellä tuotannon kestävyys), yksilölliset tarpeet (mieltymykset, ruokavaliot, allergiat, kulttuuriset tekijät).

RTI-tutkimuksessa vallitseva ravitsemuksen arvonluonti käsitteellistetään suurten toimijoiden vakiintuneiden toimintaedellytysten, erityisesti mittakaavaetujen, vahvistamiseksi: ravitseminen toteutuu tuottamalla raaka-aineita peltoviljelyllä ja eläinkasvatuksella, varastoimalla ja jatkojalostamalla se teollisesti ja jakelemalla ruoka ruuan päivittäistavara-kauppojen hallitsemien jakeluketjujen ja laitospalveluiden kautta. Sääntely ja valvonta korostavat puhtautta, lisäainesaantelyä ja pakkausmerkintöjä. Ruuantuotannon julkiset tuet kohdistuvat välineisiin ja menetelmiin (eivät tuotokseen).

Haastajaregiimi puolestaan käsitteellistetään pyrkimyksenä kohti uusien teknologioiden mahdollistamia ratkaisuita, jotka tekevät ravitsemuksesta yksilöllistä ja resurssitehokasta, tukevat ihmisten terveyttä ja eläinten hyvinvointia sekä vähentävät ympäristökuormitusta. Haastajaregiimissä ruoantuotanto hyödyntää enenevästi sisäviljelyä ja kaupunkiviljelyä, bioteknologista ruoantuotantoa, hyönteistuotantoa, robotisoitua ruuanvalmistusta ja ruuan säilyvyyden parantumista. Tämä viittaa siihen, että ruokajärjestelmä on alkamassa jakautua: yksi osa jatkaa teollistumistaan, kun taas toinen osa siirtyy lähemmäs kuluttajaa ja yksilöllisiä tarpeita.

Haastajaregiimin rakentumisen kannalta keskeisimmät teknologiat

- **Solumaatalous ja viljelty liha** (ART 09.069, kypsyyssaste 5/7) nähdään haastajaregiimin keskeisimpänä teknologiaratkaisuna, joka irrottaa osan ruokatuotannosta perinteisen maatalouden logiikasta. Ensimmäisen asteen vaikutus on mahdollinen proteiinintuotannon siirtymä eläintuotannosta ja pitkistä maatalouden toimitusketjuista kontrolloituihin bioreaktoreihin lähelle kysyntäkeskuksia. Toisessa asteessa se järjestää uudelleen maankäyttöä, rehukypsyntää, teurastus- ja jalostustyötä, eläinten hyvinvointia koskevaa politiikkaa, sääntelykategorioita ja vähittäiskaupan neuvotteluvoimaa, samalla kun se voi aiheuttaa voimakasta keskittymistä kasvatusväliaineiden, bioreaktorien, immateriaalioikeuksien ja sertifiointikerrosten ympärille. Kolmannessa asteessa kuluttajien hyväksyntä, julkiset hankinnat ja kriisinkestävä paikallinen proteiinikapasiteetti voivat vahvistaa toisiaan
- **Synteettinen biologia ja suunnitellut mikrobit** (ART 09.071, kypsyyssaste 5/7) Synteettinen biologia tukee suoraan täsmäfermentaatiota, vaihtoehtoproteiineja, uusia ainesosia, jätteestä ruuaksi -muunnosta, kehittyneitä säilyvyyden parantamista sekä joitakin kestäviä lannoite- tai panospolkuja. Ensimmäisen asteen vaikutus on

merkittävien ruokatuotannon osien siirtyminen maa- ja eläinintensiivisistä järjestelmistä ohjelmitavaan mikrobiaaliseen tuotantoon. Toisessa asteessa arvo siirtyy pinta-alasta ja karjasta kohti bioreaktoreita, geneettisiä suunnitelmia, syötteitä ja IP-portfolioita, samalla kun bioturvallisuudesta ja legitimitetistä tulee merkittäviä hallintakysymyksiä. Kolmannessa asteessa modulaarisempi ja paikallisempi tuotanto voi vahvistaa toimitusresilienssiä ja tuotevalikoiman moninaisuutta, mutta myös voimistaa alustakeskittymistä hallitsevien mikrobirunkojen ja prosessipinojen ympärille.

- **Globaalit toimitusketjujen jäljitettävyy verkostot** (ART 12.093, kypsyyssaste 5/7). Tämä ratkaisu muuttaa suoraan sitä, miten ruokaturvallisuutta, alkuperää, kestävyyttä, petosten torjuntaa, allergeenien hallintaa ja takaisinvetovastetta käsitellään ravinnonsaannin järjestelmässä. Ensimmäisen asteen vaikutus on hienojakoisempi näkyvyys siihen, mistä tuotteet tulivat, mitä niille tapahtui ja mitkä erät ovat vaikutuksen piirissä, kun jokin menee vikaan. Toisessa asteessa jäljitettävyy siirtää neuvotteluvoimaa: se voi auttaa luotettuja pieniä tuottajia pääsemään premiumkanaviin, mutta se voi myös antaa suurille ostajille mahdollisuuden asettaa kalliita datavelvoitteita ja sulkea ulos toimijoita, jotka eivät pysty noudattamaan niitä. Kolmannessa asteessa ajan tasainen alkuperädata voi muokata kuluttajaluottamusta, hankintastandardeja, vakuutuksia ja valvontaa tavalla, joka muuttaa olennaisesti sitä, miten ruokajärjestelmää hallitaan.
- **Yhteistoiminnallinen moniagenttitekoäly** (ART 03.019, kypsyyssaste 6/7) mahdollistaa koordinoitun toiminnan monien koneiden, ohjelmistojärjestelmien ja toimijoiden välillä. Ravitsemuksen arvonluonnissa ne mahdollistavat suoraan hajautetut robottikeittiöt, itsenäisesti toimivat kasvihuoneet, varastoparvet, kauppojen hyllytystäydennysratkaisut ja aterioiden automaattisen toimittamisen useisiin toimipisteisiin. Ensimmäisen asteen vaikutus on koordinoitun koneellisen toiminnan laajamittainen korvautuminen pirstaleisen ihmisseurannan ja rutiinitoimenpiteiden tilalle. Toisessa asteessa työ siirtyy suorittamisesta valvontaan, ja orkestrointikerroksia hallitsevat toimijat saavat vahvaa rakenteellista valtaa. Kolmannessa asteessa yhteiset ohjelmistopinot voivat luoda sekä vahvaa resilienssiä että korreloituneita häiriöitä useissa ruokakohteissa.
- **Itseohjautuvat ajoneuvot** (ART 05.029, kypsyyssaste 6/7). Autonominen tieliikenne muuttaa suoraan sitä, miten ruoka, päivittäistavarat, ainesosat ja valmiit ateriat liikkuvat maatiloilta ja jakelukeskuksista keittiöihin ja kotitalouksiin. Ensimmäisen asteen vaikutus on pienempi työvoimariippuvuus, laajemmat palveluajat ja ruokajakelun ennakoitavampi reititys. Toisessa asteessa se muokkaa kaluston omistusta, jakelun maantiedettä ja neuvotteluvoimaa, mikä voi suosia suuria kalustoalustoja ja integroituneita vähittäiskauppiaita samalla kun se syrjäyttää ajotyötä. Kolmannessa asteessa kyberhäiriöt, järjestelmäkatkokset tai alustojen keskittyminen voisivat levitä nopeasti ruuan saatavuuteen
- **Tekoälyn ohjaama autonominen tieteellinen löytäminen** (ART 03.021, kypsyyssaste 5/7). Tekoälyn ohjaama autonominen tieteellinen löytäminen nopeuttaa suoraan uusien proteiinien, kasvatusväliaineiden, säilöntäaineiden, kasviominaisuuksien, mikrobiomi-interventioiden ja yksilöllisen ravitsemuksen sääntöjen kehittämistä, mikä sopii läheisesti haastajaregiimiin. Ensimmäisen asteen vaikutus on T&K-syklien voimakas lyheneminen ja laajempi haku ruokasuunnittelun mahdollisuuksien avaruudessa. Toisessa asteessa arvo siirtyy niille, jotka hallitsevat korkealaatuista

dataa, robottilaboratorioita ja IP-portfolioita, samalla kun julkiset tutkimusjärjestelmät voivat tarvita uusia valvonta- ja todentamiskäytäntöjä. Kolmannessa asteessa ruokainnovaatioiden tahti voi kiihdyttää sekä hyödyllisiä läpimurtoja että heikosti hallittua kokeilutoimintaa, muuttaen markkinoille tulon ja sääntelyvasteen rytmiä.

- **Humanoidirobotit ja yleiskäyttöiset robotit** (ART 05.031, kypsyyssaste 5/7). Ihmismäinen robotti liittyy suoraan haastajaregimille ennakoituun robotisoidun ruuanvalmistuksen polkuun ja on tärkeä myös varastoinnissa, myymäläkäsittelyssä, sanitaatioissa ja tuetussa asumisessa. Ensimmäisen asteen vaikutus on toistuvan, hankalan ja työvoimapulasta kärsivän ruokatyön korvaaminen tai täydentäminen ympäristöissä, jotka on jo rakennettu ihmisille. Toisessa asteessa työmarkkinat, keittiösuunnittelu, ylläpitoekosysteemit ja toimittajasuhteet siirtyvät kohti yrityksiä, jotka omistavat tehtäväkirjastoja, huoltokapasiteettia ja integraatioalustoja. Kolmannessa asteessa ruuan saatavuus voi parantua työvoimapulasta kärsivissä ympäristöissä, mutta toimittajalukko, turvallisuushäiriöt ja korreloituneet ohjelmistongelmat voivat luoda uusia systeemisiä riskejä.
- **Seuraavan sukupolven geenimuokkaus** (ART 09.067, kypsyyssaste 5/7). Tarkka geenimuokkaus vaikuttaa suoraan viljelykasvien häiriönkestävyyteen, ravintoprofiileihin, allergeenien vähentämiseen, eläinten terveyteen, lemmikkiruuan raaka-aineisiin sekä optimoituihin solulinjoihin tai mikrobeihin uusia ruokia varten. Ensimmäisen asteen vaikutus on paljon tavanomaista jalostusta tai vanhempia GMO-tekniikoita laajempi suunnitteluavaruus ruokaominaisuuksille ja tuotantotehokkuudelle. Toisessa asteessa se voi siirtää arvoa ja kontrollia IP-oikeuksien haltijoille, hyväksytyille jalostusputkille ja suurille maatalous- ja elintarvikebioteknologian toimijoille, samalla kun se laukaisee uusia legitimizeettiä, bioturvallisuuteen ja kaupan hallintaan liittyviä konflikteja. Kolmannessa asteessa muokatut organismit voivat muuttaa sitä, millaiset ruuat ovat paikallisesti elinkelpoisia, kuinka paljon panoksia ne tarvitsevat ja miten kuluttajat ja sääntelijät erottavat toisistaan “luonnollisen”, “parannetun” ja “muokatun” ruuan.
- **Geeniajuripohjainen tuholaiistorjunta** (ART 09.077, kypsyyssaste 3/7). Geeniajurit voisivat muuttaa suoraan kasviensuojelua siirtämällä tuholaiistorjuntaa toistuvasta kemiallisesta tai manuaalisesta puuttumisesta pysyvään biologiseen tukahduttamiseen tai muokkaamiseen. Ensimmäisen asteen vaikutus on mahdollisesti pienempi tuholaispaine, vähäisempi torjunta-aineiden käyttö ja pienempi toistuvan torjuntatyön tarve kohdennetuilla viljelykasveilla. Toisessa asteessa tämä muuttaisi panosmarkkinoita, maatilataloutta ja ekologista hallintaa sekä nostaisi syvällisiä legitimizeettiä, palautettavuuteen ja rajat ylittävään vastuunalaisuuteen liittyviä kysymyksiä. Kolmannessa asteessa pysyvä biologinen torjunta voi tuottaa suurta myönteistä takaisinkytkentää viljelykasvien elinkelpoisuuteen ja resilienssiin, mutta myös voimakasta kielteistä takaisinkytkentää, jos ekologiset sivuvaikutukset tai resistenssi leviävät aiottujen rajojen ulkopuolelle.

Muutoksen hyödyt, riskit ja estävät tekijät

Hyödyt ja mahdollisuudet

- Kansanterveyden paraneminen (yksilöllisen ravitsemuksen kytkös terveellisempiin ruokavalioihin) sekä jalostettujen ja säilöttyjen elintarvikkeiden kulutuksen väheneminen.

- Ympäristökestävyys (merkittävä vedenkäytön ja lannoitevalumiin väheneminen).
- Elämänlaadun paraneminen (pääsy tuoreeseen, paikallisesti tuotettuun ruokaan, joka vastaa yksilöllisiä mieltymyksiä).
- Kriisikestävyys (paikallinen tuotanto vähentää riippuvuutta pitkistä toimitusketjuista, mikä lieventää globaalien häiriöiden vaikutusta).
- Uusien työpaikkojen synty kaupunkiviljelyyn, bioteknologiaan ja robotiikkaan.
- Mahdolliset vaihtosuhteen parannukset innovatiivisten elintarvikkeiden ansiosta.

Riskit ja haasteet

- Suurille toimijoille suunniteltu nykyinen sääntely voi vaikeuttaa pienten paikallisten tuottajien toimintaa. → Tarve päivittää sääntelykehikkoa niin, että ne huomioivat uudet tuotantomenetelmät.
- Teknologinen epävarmuus (sisäviljely ja robottikokit ovat edelleen kehitysvaiheessa; teknologisen kehityksen ja käyttöönoton nopeuden ennakoimattomuus).
- Kuluttajien epäluulo geneettisesti muunnettuja elintarvikkeita ja laboratorioissa kasvatettuja proteiineja ja/ tai robottien valmistamia aterioiden kohtaan
- Turvallisuusstandardien ja vastuusuhteiden määrittäminen hajautetussa ruokatuotannossa.

Estävät tekijät

- Kuluttajien mieltymys perinteisiin ostokokemuksiin ja tuttuihin ruokiin.
- Riippuvuus nykyisistä päivittäistavarakaupoista ja toimitusketjuista, vaihtoehtoisten yksilöllistettyjen jakelukanavien puute
- Harvojen toimijoiden vahva kontrolli vaikeuttaa rakenteellista muutosta.
- Virtaviivaistetut prosessit suosivat nykyisiä malleja uusien tulokkaiden kustannuksella.
- Nykyiset valvontamekanismit eivät välttämättä sovellu hajautettuun tuotantoon.
- Mahdollinen ylisääntely voi hidastaa innovointia paikallisella tasolla.
- Suuret yritykset, jotka hyötyvät nykytilasta, voivat vastustaa muutoksia.
- Mahdollinen vaikuttamistyö uusia teknologioita ja menetelmiä vastaan.

Yhteenveto

GVN 4 on strategisesti tärkeä, koska se yhdistää biologian, logistiikan, kuluttajakäyttäytymisen ja kriisikestävyuden. Muutos vaikuttaa todennäköiseltä, mutta epätasaiselta. Suurin epävarmuus koskee sitä, kuinka nopeasti hyväksyttävyyttä, sääntelyä ja jakeluverkostot mukautuvat teknologiseen potentiaaliin.

Teknologinen potentiaali etenee todennäköisesti nopeammin kuin tottumukset ja sääntely. Haastajaregiimin ratkaisut voivat kypsyä nopeasti laboratorioissa ja rajatuissa sovelluksissa, mutta laajempi muutos riippuu siitä, hyväksytäänkö uudet proteiinit, geenimuokkaus ja automatisoitu valmistus osaksi arkista ruokaa. Epäselvää on edelleen, kuinka nopeasti suuret jakelijat omaksuvat nämä mallit tai kuinka jyrkästi kuluttajien käsitykset muuttuvat.

Ennakoitu suunta on kohti ruokaa, joka on aiempaa mitattavampaa, räätälöidämpää ja logistisesti joustavampaa. Keskeisiä hyötyjä ovat kansanterveyden paraneminen, pienempi ympäristökuormitus, suurempi kriisikestävyys ja uudet liiketoimintamahdollisuudet. Tämä viittaa siihen, että ruokajärjestelmä voi siirtyä pois puhtaasta volyymilogistiikasta kohti kysyntälähtöistä, osin paikallistettua ja biologisesti ohjelmoitavaa tuotantoa.

Arvioitu muutostahti

- 2018–2026: hidas mutta vahvistuva. Monet ratkaisut ovat viime vuosina siirtyneet kokeiluista näkyviksi vaihtoehdoiksi, mutta järjestelmän perusrakenne nojaa edelleen vahvasti perinteiseen maatalouteen ja vähittäiskauppaan.
- 2026–2045: kohtalainen mutta kiihtyvä. Vuoteen 2045 mennessä muutos voi vahvistua selvästi, jos terveyteen, kestävyteen ja huoltovarmuuteen liittyvät hyödyt alkavat painaa enemmän kuin perinteisten ruokamallien kulttuurinen inertia.