

# GEENITEKNOLOGIA



# GEENITEKNOLOGIA

Eduskunnan tulevaisuusvaliokunnan julkaisu 2/2018

Kannen kuva: Misucell

Takakannen kuva: osa teoksesta Tulevaisuus, Wäinö Aaltonen (1932),  
eduskunnan taidekokoelma. Kuvaaja: Vesa Lindqvist.

Tulevaisuusvaliokunta

00102 Eduskunta

[www.eduskunta.fi](http://www.eduskunta.fi)

Helsinki 2018

ISBN 978-951-53-3675-0 (nid.)

ISBN 978-951-53-53-3676-7 (PDF)

ISSN 2342-6594 (painettu)

ISSN 2342-6608 (verkkojulkaisu)

# Sisällys

Esipuhe.....	5
1. Kasvinjalostuksen uudet menetelmät (Anneli Ritala, Teemu Teeri).....	9
Mistä on kyse? .....	9
Teknologian edut ja mahdolliset riskit.....	10
Nykytila .....	12
Toimenpide-ehdotukset .....	13
2. Synteettinen biologia ja mikro-organismien suunnittelu - Elävät solutehtaat kiertotalouden mahdollistajana (Jussi Jäntti).....	14
Mistä on kyse? .....	14
Teknologian edut ja mahdolliset riskit.....	14
Nykytila .....	16
Toimenpide-ehdotukset .....	17
3. Synteettinen biologia ja materiaalit (Markus Linder) .....	19
Mistä on kyse? .....	19
Teknologian edut ja riskit.....	20
Nykytila .....	21
Tulevaisuus .....	21
4. Lääketieteellinen geenitekniikka -pohdintoja eduskunnan tulevaisuusvaliokunnalle (Kirmo Wartiovaara) .....	22
Mistä on kyse? .....	22
Riskejä ja haasteita .....	23
Toimenpide-ehdotukset .....	24

5. Geeniteknikka ja solumaatalous (Lauri Reuter) .....	26
Mistä on kyse? .....	26
Nykytila .....	26
Mahdollisuudet.....	27
Riskit.....	28
Toimenpide-ehdotukset .....	28
6. Solar Foods Oy:n kehittämä elintarvikeraaka-aineen tuotantoteknologia (Juha-Pekka Pitkänen).....	30
Teknologia lyhyesti .....	30
Nykytila .....	31
Teknologian riskit.....	31
Toimenpide-ehdotukset .....	31
7. Bioetiikan näkökulma: Geeniteknologiavaltuutettu varmistaisi kansalaisten edun (Heikki Saxén) .....	33
Mistä on kyse? .....	33
Nykytila .....	33
Teknologian arviointia .....	34
Islannin tien välttäminen .....	35
Toimenpide-ehdotukset .....	36

## Esipuhe

Viime vaalikaudella tulevaisuusvaliokunta seurasi metsäteollisuuden kehittymistä biotaloudeksi. Olemme siirtymässä biokauteen, jossa uusiutuvien raaka-aineiden merkitys kasvaa, ja jossa puusta voi valmistaa lähes mitä tahansa. Biotalous ei kuitenkaan rajoitu pelkästään puuhun. Voimme tuottaa ja kasvattaa myös pelloilla sen, minkä saamme metsästäkin. Myös meressä ja ilmakehässä voidaan tuottaa energiaa, ruokaa ja materiaaleja. Synteettisen biologian ja geeniteknologian avulla voi tuottaa myös paljon sellaista, mitä luonnossa ei esiinny. Kaiken tämän ansiosta bioteknologialla on tulevaisuudessa vähintään yhtä suuri vaikutus yhteiskuntaamme ja elämäntapoihimme kuin digitalisaatiolla.

Teknologioiden ja niiden vaikutusten ennakointi on tärkeää, sillä jos ryhdymme toimimaan vasta silloin, kun uudet teknologiat ovat jo kypsiä ja varmoja, niin olemme auttamatta myöhässä. Globalissa kilpailussa menestyminen edellyttää rohkeutta ja visionäärisyyttä.

Vaikka teknologiat etenevät globaalilla tasolla riippumatta siitä, haluammeko sitä vai emme, niin säätelyllä voidaan kuitenkin vaikuttaa muutoksen vauhtiin, suuntaan ja seurauksiin. Eettiset kysymykset on siksi pidettävä aina mukana, kun pohdimme teknologian kehitystä. Esimerkiksi geeniteknologian avulla voidaan tuottaa ihmiskunnalle hyviä asioita. Se tarjoaa meille suuria mahdollisuuksia helpottaa ihmisen elinoloja ja parantaa luonnon tilaa. Samalla meidän on kuitenkin kysyttävä myös, että onko geeniteknologian käyttämiselle asetettava rajoja, jotta teknologian käytön haitat eivät muodostuisi hyötyjä suuremmiksi. Tulevaisuusvaliokunnan tehtäviin kuuluu myös teknologian vaikutusten arviointi ja tämä raportti on osa tätä arvokeskustelua.

Raportti sisältää viisi erilaista näkökulmaa synteettiseen biologiaan ja geeniteknologiaan: kasvinjalostus (Anneli Ritala ja Teemu Teeri), solutehtaat ja uudet materiaalit (Jussi Jäntti ja Markus Linder), lääketieteellinen geeniteknikka (Kirmo Wartiovaara), solumaatalous ja ruoan valmistaminen sähköstä (Lauri Reuter ja Juha-Pekka Pitkänen) sekä bioetiikka (Heikki Saxén). Asiantuntijoita pyydettiin kertomaan mistä näissä geeniteknologian erilaisissa sovelluksissa on kyse, mitkä ovat kyseisen teknologian edut ja mahdolliset riskit, mikä on kehityksen nykyvaihe ja millaisia toimenpide-ehdotuksia asiantuntijoilla on tulevaisuuden suhteen? Raportin materiaali perustuu tulevaisuusvaliokunnan keväällä 2018 järjestämiin avoimiin kuulemisiin, joiden tavoitteena oli selvittää geeniteknologian nykytilanne ja tulevaisuuden mahdollisuudet sekä tärkeimmät politiikkahaasteet.

Ihminen on aina halunnut ymmärtää luontoa ja vaikuttaa siihen. Geeniteknologia on kuitenkin siinä mielessä aikaisemmasta poikkeava luontoon vaikuttamisen tapa, että nyt ensimmäisen kerran historiassa ihminen on geeniteknologian avulla oppinut kehittämään organismeja, jollaisia luonnonvalinta ei koskaan tuottaisi: geenisiirroilla voidaan siis ylittää lajien rajat ja muokata myös ihmisen perimää. Tämä haastaa aiemmat ajattelutavat, ja jopa ihmiskäsityksemme.

Synteettiseen biologiaan liittyy suuria mahdollisuuksia ja samalla myös suuria kysymyksiä. Voimme tuottaa geeniteknologian avulla paljon sellaista, mikä ei ole mahdollista metsissä ja pelloilla: esimerkiksi biohajoavia tai jopa eläviä materiaaleja ja koneita. Kestävän kehityksen kannalta on tärkeää, ettei ruoantuotantoon kelpaavaa raaka-ainetta käytetä materiaalityöntuotantoon, samalla kun ruoantuotannossa syötäväksi kelpaamaton jäte voi olla raaka-aineena uusille biopohjaisille materiaaleille. Myös teollisuusjätteiden käyttö uusien biopohjaisten materiaalien tuottamiseen on täysin mahdollista ja tarjoaa uuden näkökulman kiertotalouteen.

Lääketieteellinen geenitekniikka pyrkii vastaamaan siihen, miten saisimme ihmisen solut toimimaan paremmin geenien (DNA:n) avulla. Geenimuokkaus mahdollistaa hoidon lukuisiin sairauksiin, joihin sitä ei aiemmin ole ollut. Esimerkkejä jo saavutetuista kokeellisista läpimurroista ovat muun muassa HIV:n parantaminen ihmisellä, malarian poistaminen hyttysiltä, syöpää tuhoavien immuunisolujen luominen ja tautibakteereja tappavien virusten valmistaminen antibioottiresistenssin voittamiseksi.

Teknologian ja osaamisen nopean kehittymisen vuoksi geenitutkimuksen tietosuojakysymykset ovat parhaillaan entistäkin ajankohtaisempia, kun suomalaisilta kerätään biopankkeihin mittavia näytekokoelmia geenitutkimuksen tekemiseksi. Yksilöllinen geenitieto paljastaa yhä tarkemmin esimerkiksi henkilön riskejä sairastua vakaviin sairauksiin, mikä voi muodostaa intressin hankkia tätä tietoa työnantajien ja vakuutusyhtiöiden kaltaisille taholle ja harjoittaa syrjintää. Keskeinen kysymys on, että saako kerättyä tietoa käyttää muuhunkin kuin sen alkuperäiseen käyttötarkoitukseen.

Geenitekniikan lääketieteelliseen käyttöön liittyy myös monia muita yhteiskunnallisia kysymyksiä. Hoitojen tulisi olla mahdollisimman turvallisia ja tehokkaita sekä eettisesti että taloudellisesti perusteltuja. On myös vaikea sanoa, minkälaisia muutoksia on eettisesti hyväksyttävää tehdä. Vakavien tautien parantaminen voi olla hyväksyttävämpää kuin esimerkiksi periytyvien muutosten tekeminen ihmiselle.

Tässä raportissa tuodaan esille myös perinteisen geenisiirron ja uudenlaisen geenieditoinnin eli geenimuokkauksen ero, joista ensimmäisessä soluun tuodaan kokonaan uusi geeni, jälkimmäisessä muutetaan solussa olevan geenin koodin yhtä kohtaa tai kohtia samaan tapaan kuin luonnollisissa mutaatioissa tapahtuu. Tämän eron ymmärtäminen tukee informoitunutta keskustelua geenitekniikan mahdollisuuksista ja riskeistä.

Jos haluamme olla kansankuntana edelläkävijä geeniteknologian hyödyntämisessä ja myös sääntelyn ajantasaistamisessa meidän on oltava aktiivisia nyt. Osa asioista on sellaisia, jotka täytyisi huomioida jo seuraavassa hallitusohjelmassa. Geenitekniikan lainsäädännön uudistamista EU:n tasolla on esitetty tarpeellisena, mutta samaan aikaan uudistamisen on todettu olevan kallis ja monimutkainen prosessi.

Eduskunnassa geeniteknologia koskee tulevaisuusvaliokunnan lisäksi ainakin talousvaliokuntaa, sosiaali- ja terveysvaliokuntaa, ympäristövaliokuntaa sekä maa- ja metsätalousvaliokuntaa. Valmiita vastauksia ei ole, mutta vain avoimen keskustelun avulla saadaan selville, mitä pidämme tärkeänä ja millaisiin päämääriin pyrimme. Tämä raportti toivottavasti antaa lisää tietoa, mutta myös rohkaisee keskustelemaan tästä tärkeästä aiheesta.

Lainsäätäjien on pikaisesti havahduttava siihen, että nykyinen lainsäädäntö on vanhentunut ja sitä on vaikea soveltaa uusimpiin innovaatioihin. Alan kehitys on niin nopeaa ja mahdollisuudet ovat niin suuria, että tarvitsemme kenties jonkinlaisen ”biokartan” (liikenne- ja tietoyhteiskuntakaarien tapaan). Samalla geeniteknologia tuo myös esille yhteiskunnallisen keskustelun tarpeen: riskit ja eettiset kysymykset on tunnistettava ja ratkaistava, mutta ratkaisujen tulisi samalla perustua mahdollisimman hyvään tietoon ja harkintaan - ei ennakkoluuloihin, uskomuksiin, huhuihin, väärään tietoon tai tietämättömyyteen.

Keskustelua geeniteknologian hyödyntämisestä onkin jatkettava ja syvennettävä. Asiallista keskustelua aiheesta on hankala käydä, ellei ole riittävästi tietoa. Hyvä esimerkki tästä on keskustelu geenimuunnellusta ruoasta. Monelle geenimuunneltu ruoka tarkoittaa jotain ”luonnotonta” ja pelottavaa. Voidaan kuitenkin myös kysyä, onko meillä varaa jättää käyttämättä geenimuuntelun hyötyjä, jos sen avulla voidaan esimerkiksi muokata kasveja siemämään paremmin tuholaisia, ja vähentää torjunta-aineiden käyttöä. Torjunta-aineiden terveysriskit ovat hyvin tunnetut. Toisaalta riskinä voi olla, että geenimuunnellut lajikkeet edistävätkin tehoviljelyä.

Raportin kirjoittajat esittävät useita toimenpide-ehdotuksia, joihin päättäjien tulisi tarttua. Alle on nostettu (hieman mukaillen) huomioita muutamista eduskuntaa koskevista ehdotuksista, mutta lukijan kannattaa tutustua ehdotusten koko laajaan kirjoon myös kirjoittajien omista teksteistä.

Geenimuokkaus- eli geenieditointitekniikoiden nousu perinteisten geeninsiirtotekniikoiden rinnalle asettaa haasteen lainsäädännölle. Suomen tulee olla edelläkävijä ja tukea EU:ssa modernin bio- ja geenitekniikan hyödyntämistä mahdollistavaa geenitekniikkalain tulkintaa ja uudistamista. Tällä hetkellä geenieditointiin sovelletaan 1990-luvun alun määritelmiä. Kasvinjalostuksessa tämä merkitsee, ettei lainsäädäntö suhtaudu samalla tavalla lajikkeisiin, jotka ovat ominaisuuksiltaan samanlaisia, mutta aikaansaatu erilaisilla menetelmillä. Myös ruuantuotannossa käytettyjä geenieditoituja mikrobeja ja soluja tulisi lainsäädännön tulkinnassa käsitellä kuten perinteisin menetelmin jalostettuja, ei GMO:na.

Kun harkitaan, minkälaista kehitystä tulevaisuudelta halutaan, riskinarviointien rinnalla tapahtuvat riski-hyötyarviointit voisivat selkeyttää geenitekniikan asemaa.

Läpinäkyvä ja avoin dialogi on oleellisen tärkeä osa uusien teknologioiden onnistunut jalkauttamista yhteiskuntaan. Eduskunnan on syytä muodostaa selvä tutkituun tietoon perustuva näkemys geenitekniikan hyödyntämisestä, ja viestiä sitä.

Eettiseen hyödyntämiseen liittyy myös geeniteknologioilla tuotetun tiedon tietosuojakysymyksistä huolehtiminen. Tätä varten tulisikin perustaa uusi toimielin, geeniteknologiavaltuutettu tai jokin muu vastaava riippumaton taho, joka ajaisi eteenpäin kansalaisten edun ja äänen näkökulmaa tällä saralla selkeästi erillisenä rakenteena.

*Merja Mäkisalo-Ropponen*  
Tulevaisuusvaliokunnan varapuheenjohtaja





# 1. Kasvinjalostuksen uudet menetelmät

---

Anneli Ritala, VTT  
Teemu Teeri, Helsingin yliopisto

## Mistä on kyse?

Kasvinjalostus on yhtä vanhaa kuin maanviljely. Jääkauden jälkeen eri puolilla maapalloa tietoinen kasvien kasvattaminen ruuaksi alkoi kehittyä. Kasvien domestikaatio ("kesyttäminen") sai aikaan periytyviä muutoksia kasveihin, mm. siemenet eivät viljellyissä kasveissa varise herkästi vaan ne voidaan korjata sadoksi. Yksi dramaattisimmista muutoksista näkyy viljellyn maissin kohdalla, jonka villimuoto teosintti kasvaa edelleen Väli-Amerikassa. Kuinka on mahdollista, että kasvien ilmiäisy voi tällä tavalla taipua ihmisen tarpeisiin? Muutos tapahtuu luontoon sopeutumisen kustannuksella ja sen seurauksena viljelykasvit ovat riippuvaisia viljelijästä. Samalla tavalla, valinta on muuttanut luonnonvaraisen suden kesyksi kaikkien tuntemaksi koiraksi, kaikkine variaatioineen.

Kasvinjalostus tieteenä alkoi noin sata vuotta sitten, kun perinnöllisyyden lainalaisuudet opittiin tuntemaan ja tilastotieteen menetelmät kehittyivät (tilastotieteen yksi tärkeimmistä motivaattoreista liittyi kasvinjalostuksen hallintaan). Vain osa yksilöiden välisistä eroista perustuu eroihin geeneissä (termi "periytyvyys" kuvaa tätä osaa). Niin kauan kuin geneettisiä eroja on jalostusaineistossa, voidaan valinnalla edetä. Esimerkiksi viimeisen sadan vuoden aikana on kasvinjalostuksen ansiosta Pohjoismaissa kehitettyjen vehnälajikkeiden hehtaarisato kasvanut prosentin vuodessa, samoissa olosuhteissa mitattuna. Kaiken kaikkiaan sadot kasvoivat kuitenkin yli 2 % vuosivauhtia, joten kasvinjalostus on tärkeä mutta ei ainoa tekijä maanviljelyn tuottavuuden kehittämiseksi (lannoitus, koneet, kasvinsojelu ym. muodostavat toisen osan). Valintajalostus (tarkemmin risteytys-valinta) on menetelmänä geenejä karsiva. Uutta geeniaainesta syntyy hitaasti mutaatioiden vaikutuksesta tai sitä voidaan tuoda saman lajin maatiaislinjoista, villimuodoista tai muista risteytettävissä olevista lajeista.

1980-luvulla kehitetty ja 1990-luvulla lajikejalostukseen edennyt geeninsiirtotekniikka toi suuren muutoksen tähän periaatteeseen. Geenejä opittiin siirtämään eliöstä toiseen ja geneettisen kielen ollessa kaikilla eliöillä sama, oli mahdollista siirtää kasveihin jopa eläinten tai mikrobien geenejä. Tällä hetkellä eniten viljellyissä siirtogeenisissä viljelykasveissa on nimenomaan bakteeriperäisiä geenejä, joiden tuomat uudet ominaisuudet ovat tuhohyönteisten ja rikkakasvihävitteiden kestävyys. Geeninsiirto oli mullistava keksintö. Tiedeyhteisön aloitteesta sen ihmisten terveyteen ja ympäristöön liittyviä riskejä haluttiin tutkia ennen laajamittaista soveltamista. Tämän perusteella EU:ssa säädettiin 1990-luvun kuluessa geenitekniikkalaki (Suomessa 1995), jonka tarkoitus on edistää geenitekniikan turvallista ja eettisesti hyväksyttävää käyttöä. Geenitekniikkalain terminologiassa siirtogeenisiä eliöitä kutsutaan geneettisesti muunnelluiksi organismeiksi, lyhyesti GMO. Vuonna 2004 lakiin 377/1995, lain tarkoitusta määrittävään osaan, liitettiin termi "ennaltavarautumisen periaate". Tällä haluttiin korostaa riskinarvioinnin tärkeyttä GM-lajikkeiden kehittämisessä.

Geenitekniikkalaki määrittelee GMO:n eliöksi, jonka geneettistä ainesta on muutettu tavalla, jota luonnossa ei voi tapahtua ja tyypillisesti siirtämällä eliöön geeniaimesta (nukleihinappoa, esim. DNA:ta). Erityisesti mutaatioiden aiheuttaminen kemikaaleilla tai säteilyllä suljettiin pois määrittelystä. Tämä onkin järkevää, sillä aiheutetut mutaatiot ovat samanlaisia kuin mitä luonnossakin syntyy.

Kasvinjalostuksen uusista menetelmistä eniten keskustelua aiheuttaa geenieditointi, jossa mutaatiot suunnitellaan etukäteen laboratoriossa. Teknisesti geenieditointi tapahtuu siten, että solussa oleva kohdegeeni katkaistaan entsyymillä, joka on suunniteltu tähän nimenomaiseen tarkoitukseen. Katkaisijaentsyymejä (nukleaaseja) on osattu ohjelmoida haluttuun kohteeseen jo parin vuosikymmenen ajan. Vasta noin viisi vuotta sitten keksitty CRISPR/Cas teknologia teki sen kuitenkin erityisen helpoksi ja menetelmäkehitys on sen jälkeen ollut erittäin nopeaa.

Aivan kuin toimivan laitteen särkeminen on helpompaa kuin korjaaminen, geenin editointi toimimattomaksi on sovelluksista yksinkertaisin. Tällä toimintaperiaatteella on tärkeitä sovelluksia kasvinjalostuksessa ja osa perinteisen jalostuksen saavutuksista liittyy juuri geenien toiminnan estämiseen. Oliiviöljyn kanssa terveellisyydestä kilpaileva rapsi- ja rypsiöljyn jalostus perustuu haitallisten aineosien (erukahappo ja glukosinolaatit) poistamiseen valitsemalla kasveja, jotka eivät näitä aineita osaa tehdä. Nyt tämä voidaan tehdä CRISPR/Cas teknologian avulla suoraan parhaisiin viljelyssä oleviin lajikkeisiin. Geenieditoinnin menetelmällä voidaan tehdä myös kohdennettu muutos eli geenin korjaus tai jopa siirtää kokonaan uusi geeni tarkasti haluttuun kohtaan genomia, missä se esimerkiksi toimii hyvin.

Kohdennettu geeninsiirto kuuluu selkeästi geenitekniikkalain piiriin eikä ole erimielisyyksiä näin aikaansaadun kasvilajikkeen sääntelystä. Geenieditointi sen sijaan aiheuttaa tulkinnassa pulmia. Modernia geenitekniologiaa on toki käytetty muutoksen aikaansaamiseksi, mutta lopputulos muistuttaa luonnollista geenimutaatiota siinä määrin, ettei sitä voida millään tekniikalla erottaa luonnollisesta. Syntyneet mutaatiot eivät myöskään ole luonnolle uusia. Voidaan helposti laskea, että esimerkiksi keskikoisella suomalaisella ohra- tai vehnäpellolla on jokainen genomien emäs muuttunut toiseksi jossain pellon jyvistä, joita on yhdellä pellolla n. miljardi.

## **Teknologian edut ja mahdolliset riskit**

Mihin kasvinjalostaja tarvitsee geeninsiirtoa tai geenieditointia? Vastaus on sama molempiin kysymyksiin: saadakseen lisää perinnöllistä muuntelua, jonka perusteella valintajalostus voi edetä. Geeninsiirron kohdalla kyse on muuntelusta, jota viljellyn kasvin lajissa ei yksinkertaisesti ole. Hyönteisiä ilman kemikaaleja torjuviin Bt-lajikkeisiin (maissi, soija, puuvilla, rapsi – yhteinen viljelyala tällä hetkellä globaalisti n. 100 miljoonaa hehtaaria) on siirretty *Bacillus thuringiensis* bakteerin geeni, joka tuottaa tuholaishyönteisten toukkien suolessa vaikuttavaa proteiinia. Kyseistä bakteeria voidaan myös sellaisenaan käyttää torjunta-aineena esim. luomuviljelyssä, jolloin proteiinin tuottaa bakteeri itse viljelykasvin siijaan.

Geenieditoinnissa kyse on luonnollisen kaltaisesta geenimuuntelusta, useimmissa tapauksissa luonnosta periaatteessa löydettävistä geenimuodoista. Vaikka nykytekniikoilla näitä geenimuotoja voidaan myös seuloa laajasta olemassa olevasta aineistosta (vrt. yllä), on seulonta menetelmänä työläs ja kallis. Kasvinjalostuksen tärkein rajoittava tekijä onkin yksinkertaisesti resursointi. Tämä näkyy maissin- ja vehnänjalostuksen saavutuksissa, verrattuna vaikka kotoisen rukiin jalostukseen. Luonnosta tai muille viljelyalueille sopeutuneista lajikkeista löydettyjen geenimuotojen siirtäminen risteyttämällä paikallisiin lajikkeisiin on aina työlästä (ajan ja rahan suhteen) tai joskus kokonaan mahdotonta. Esimerkiksi peruna lisätään kasvullisesti ja takaisinristeytysohjelmassa ei periaatteessakaan voida päätyä samaan lajikkeeseen uudella ominaisuudella tehostettuna, vaikka kokonaan uusi lajike voidaan toki saada aikaan.

Geenieditoinnin riskit ovat siis helposti käsitettävällä tavalla samoja kuin perinteisen jalostuksen riskit. Lääketieteen kohdalla kiinnitetään paljon huomiota väärin editointikohteisiin, ns. off-target -muutoksiin. Kasvinjalostuksessa ne eivät muodosta ongelmaa. Samoin kuin perinteisessä kasvinjalostuksessa, jalostaja yksinkertaisesti karsii yksilöt, joiden geenissä on ei-toivottuja muutoksia.

GM-jalostuksen ollessa uusi menetelmä, oli ihmisen terveydelle tai ympäristölle haitallisten ominaisuuksien syntyminen hyvin perusteltu kysymys. Yli 25 vuoden kokemuksen jälkeen voidaan kuitenkin jo vankalta pohjalta sanoa, että GM-jalostuksessa ei itse teknologiaan liity sen suurempia riskejä kuin perinteiseenkin jalostukseen. Viime kädessä kysymys on siitä, mitä jalostetaan. Perinteiseenkin jalostus ei ole riskitöntä. Esimerkiksi perunan ja sellerin kohdalla on jouduttu poistamaan lajikkeita markkinoilta niiden sisältäessä liian suuria määriä haitallisia kemiallisia komponentteja.

Suurimmat kasvinjalostuksen uusiin tekniikkoihin, GM-tekniikka mukaan luettuna, liittyvät riskit lienevät taloudellisia ja sosiaalisia. EU pitää tiukasti kiinni geenitekniikan sääntelystä, siitä huolimatta, että vaikutusten tieteellinen analyysi pikemminkin ohjaisi sääntelyn ja siten myös kasvinjalostuksen helpottamiseen. Tähän lienee erilaisia syitä. Disruptiivisten innovaatioiden käyttöönoton jäädyttämisellä pyritään tukemaan perinteisten eurooppalaisten tuotteiden taloudellista asemaa ja säilyttämään eurooppalaista tavanomaista maanviljelykulttuuria. Kyse on myös mielipiteistä ja mielikuvista. On tunnettua, että niin tärkeään asiaan kuin ruokaan liittyy hyvin henkilökohtaisia käsityksiä. Kasvinjalostuksen historiaa tuntien on mielenkiintoista huomata miten ”luonnolliselta” perinteinen jalostus ihmisten mielissä tuntuu. Usein GM-vapaus nähdään harhaanjohtavasti takeena tuotteen ”luonnollisuudesta”.

EU:n päättämättömyys geenieditoinnin sijoittumisesta lainsäädännössä hankaloittaa tilannetta. Niin kauan kuin on olemassa mahdollisuus, että geenieditoiduille kasvilajikkeille tulee tehdä samanlainen riskianalyysi kuin GM-lajikkeille, kasvinjalostajat eivät voi vakavissaan panostaa tähän mullistavaan mutta luonnolliseen kaltaiseen menetelmään. Euroopassa ollaan ns. on hold -tilanteessa, jolloin auttamattomasti jäämme myös kehityksessä jälkeen. Pysyykö nykytilanteen vallitessa eurooppalainen kasvinjalostus, maanviljely ja tuotanto kilpailukykyisenä?

## Nykytila

Geeninsiirtoon perustuva soveltava GM-tutkimus on ollut pysähdyksissä koko geeniteknikkalain soveltamisen ajan. Akateeminen maailma etenee perustutkimuksen suhteen hyvin, mutta 1990-luvun vaihteen soveltavia hankkeita on erittäin vähän, koska pieniä ja keskisuuria GM-jalostusta soveltavia yrityksiä ei ole. Myös perustutkimuksen yhteydessä syntyy valtavasti ideoita, jotka voisivat johtaa hyödyllisiin sovelluksiin. Näitä voidaan harvoin nykytilanteessa viedä eteenpäin. Geenitekniikan sääntely on johtanut siihen, että vain agrobisneksen jättiyritykset pystyvät hyödyntämään GM-tekniikkaa, ja nekin vain tiettyjen viljelykasvien kohdalla. On laskettu, että lain määräämä riskinarviointi on kustannuksiltaan 10-20 miljoonaa euroa lajiketta kohden.

Geenieditointi on nopeasti yleistymässä perustutkimuksen puolella. Tutkimuksen kannalta on valtava hyöty siitä, että kohdekasviin voidaan tehdä luonnollisen kaltaisia mutta suunniteltuja mutaatioita. CRISPR/Cas teknologia on teknisesti yksinkertaista laboratoriossa, jossa kasvibioteknikan menetelmät ovat hyvin hallinnassa ja toimitaan suljetussa ympäristössä. Vaikka Suomen jalostusyhteisöissä, yliopistoissa ja tutkimuslaitoksissa on kiinnostusta geenieditointitekniikoiden käyttöön, laajamittainen hyödyntäminen puuttuu kokonaan ja siihen valmistautuminenkin tapahtuu vain pienimuotoisesti. Tärkein, jos ei jopa ainoa, syy tähän on epävarmuus sääntelystä.

Tärkkelysjalostus perunan kohdalla kuvaa hyvin nykyistä tilannetta. Kasvien tärkkelys koostuu kahdenlaisista molekyyleistä, jotka ovat molemmat glukoosin polymeerejä. Amyloosi on lineaarinen polymeeri ja amylopektiini haaroittunut polymeeri. Näillä on erilaisia ominaisuuksia ja erilaisia sovelluksia. Niin sanotut vahalajikkeet tuottavat lähes yksinomaan amylopektiiniä. Niissä yksi tärkkelyssyntaasientsyymin muodoista ei ole toimiva. Vahamaissi on tärkein vahatärkkelyksen lähde, mutta myös perunan kohdalla tätä ominaisuutta on jalostettu. BASFin kehittämä perunalajike Amflora on GM-lajike, jossa kyseinen geeni on hiljennetty geeninsiirron avulla. BASF sai yli kymmenen vuotta kestäneen prosessin jälkeen viljelyluvan Amfloraperunalle Euroopassa, mutta lopulta vetäytyi hankkeesta poliittisen vastustuksen takia. Ruotsalainen tutkimusryhmä on osoittanut, että vahaperunan voi saada aikaan myös geenieditoinnilla, jossa tärkkelyssyntaasin geenistä puuttuu pieni jakso, mutta mitään uutta ei ole lisätty genomiin. Geenieditoitua lajiketta ei olla kaupallistamassa niin kauan kuin ei tiedetä miten sitä säännellään. Sen sijaan markkinoilla on röntgensäteilyllä aikaansaatu vahaperunalajike Elaine. Röntgensäteily tyypillisesti aiheuttaa kromosomikatkoksia ja siten särkee genejä. Elaine on siis perinteisen mutaatiojalostuksen tuote, jota ei säännellä geenitekniikkalain perusteella. Kaikissa kolmessa tapauksessa on siis saatu perunaan sama biokemiallinen muutos, yksi GM-tekniikalla, yksi geenieditoinnilla ja yksi mutaatiojalostuksella. Vaikka lopputulos on kaikilla tekniikoilla sama, on ainoastaan mutaatiojalostuksella tuotettu lajike markkinoilla.

## Toimenpide-ehdotukset

Geenitekniikkalain tarkoitusperät ovat hyvät ja nykyaikaisen ajattelutavan mukaiset. Lain soveltamista ei kuitenkaan säätele kertyvä kokemus ja tieto, vaan päinvastaiseen suuntaan vievät erilaiset tavoitteet. Riskinarviointiin ei kuulu hyödyn analyysi. Riskinarvioinnin rinnalla tapahtuva riski-hyötyarviointi voisi osaltaan selkeyttää geenitekniikan asemaa kasvinjalostuksessa ja ihmisten mielissä.

Geenitekniikan lainsäädäntö ei sisällä mekanismeista uusien tekniikoiden hallintaan. Tällä hetkellä 1990-luvun alun määritelmiä yritetään soveltaa geenieditointiin, mikä johtaa välillä huvittavaankin saivarteluun ja asioiden kiertelyyn sekä puoltavien että vastustavien osapuolten toimesta. Selvää on, että lainsäädäntö ei suhtaudu samalla tavalla lajikkeisiin, jotka ovat ominaisuuksiltaan samanlaisia, mutta aikaansaatu erilaisilla menetelmillä. Geenitekniikan lainsäädännön uudistamista EU:n tasolla on esitetty tarpeellisena, mutta samaan aikaan on myös todettu uudistamisen olevan kallis ja monimutkainen prosessi. Viime kädessä kyse on siitä, miten lakia sovelletaan ja siitä, miten eurooppalaiset kansalaiset suhtautuvat kasvinjalostukseen ja sen tekniikoihin.

Kasvinjalostus on uusillakin tekniikoilla hidasta ja valmiin lajikkeen pakollinen testaus, rekisteröinti ja markkinoille saattaminen kestää vuosia. Kasvinjalostus voi olla yritysvetoista vain ollessaan taloudellisesti kannattavaa lyhyellä aikavälillä. Äärimmäinen esimerkki on metsänjalostus, jossa hyödyt ovat selkeitä, mutta realisoituvat vasta vuosikymmenten kuluessa. Niin Suomessa kuin muuallakin maailmassa kaupallisen kasvinjalostuksen rinnalla tarvitaan julkisesti rahoitettua kasvinjalostusta. Valtiovallan tehtävänä on varmistaa ja resursoida kasvinjalostuksen tarvittava tutkimus ja sen soveltaminen. Hyödyt ovat pitkällä ja keskipitkällä aikavälillä merkittäviä ja panostus kääntyy voitoksi.

## 2. Synteettinen biologia ja mikro-organismien suunnittelu - Elävät solutehtaat kiertotalouden mahdollistajana

---

Jussi Jäntti, Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

### Mistä on kyse?

Luontoon on evoluution saatossa kehittynyt suuri määrä monimuotoisia ratkaisuja biologisen materiaalin kierrättämiseen. Kaikki elollinen materiaali hajotetaan luonnossa pieneliöiden ja mikrobien toimesta niin että tästä hajotuksesta saatavat molekyylit voidaan käyttää uusien kasvien ja muiden eliöiden ravintona ja rakennusaineina. Arvioiden mukaan maapallolla on yli 100 miljardia eliölajia, joista suurin osa on mikrobeja (bakteereja, hiivoja, homeita ja leviä). Näistä yli 99 % on vielä löytämättä. Näin ollen luonto tarjoaa uskomattoman rikkaan lähteen eri organismien DNA-sekvensseistä ja niiden koodaamista proteiineista, kuten esimerkiksi bioteknologisiin sovelluksiin sopivista entsyymeistä. Yksistään mikrobeista on identifioitu yli 22 000 biologisesti aktiivista yhdistettä. Mikrobit tarjoavat näin huikean monimuotoisen kirjon erilaisia entsyymaattisia aktiivisuuksia ja ratkaisuja erilaisten kemiallisten yhdisteiden biologiseen tuottamiseen. NykYTEknologiat ovat mahdollistaneet maapallolla elävien eliöiden DNA-sekvenssien ja niiden sisältämän tiedon hyödyntämisen vain vähäisessä määrin. Kuitenkin jo nykyisetkin saavutukset ovat erittäin lupaavia ja ovat jo mahdollistaneet kestäväen kehityksen mukaista teollista tuotantoa ja laajamittaista kaupallista toimintaa.

Synteettinen biologia on nopeasti kasvava, biologiaa ja insinööritieteitä yhdistävä tutkimuskenttä, joka kehittää menetelmiä biologian ymmärtämiseen ja muokkaamiseen. Synteettisen biologian keskeisiä menetelmiä ovat kykymme lukea (sekvensoida eliöiden perimä), mallintaa ja suunnitella (laskennallinen biologia) ja kirjoittaa (DNA-syntetisointi) biologisten komponenttien DNA:han perustuvia rakennusohjeita ja yhdistellä olemassa olevia, sekä saada aikaan uuden tyyppisiä ominaisuuksia. Nämä teknologiat mahdollistavat tehokkaan oppimisen luonnon biologisesta rikkaudesta. Tätä tietoa hyväksi käyttäen voidaan kehittää uudentyyppisiä biologisia ratkaisuja maapalloomme uhkaaviin luonnon raaka-aineiden resursseihin ja ilmaston muutokseen liittyviin ongelmiin. Synteettisen biologian menetelmien avulla mikrobien perimää voidaan suunnitella ja muokata tehokkaasti niin että ne kykenevät käyttämään metaboliaansa erilaisten hiilyhdisteiden valmistamiseen korvattaessa esimerkiksi öljypohjaisia yhdisteitä. Näin toimittaessa mikrobeista saadaan ”solutehtaita” erilaisten raaka-aineiden muuntamiseksi hyödyllisiksi lopputuotteiksi. Monimuotoisuutensa ansiosta mikrobit mahdollistavat erilaisten teollisuuden ja yhteiskunnan raaka-aine- ja jätevirtojen tehokkaan kierrättämisen.

### Teknologian edut ja mahdolliset riskit

Tähän asti on kyetty muokkaamaan ja käyttämään hyväksi vain hyvin rajallista määrää mikrobeja. Synteettinen biologia tarjoaa kuitenkin nyt ennen näkemättömät mahdollisuudet

hyödyntää nykyistä huomattavasti laajemmassa mittakaavassa evoluution miljoonien vuosien saatossa kehittämiä biologisia ominaisuuksia. Synteettisen biologian mahdollistama perimän nopea DNA-sekvenssin lukeminen, uudentyypisten molekyylien valmistuksen mahdollistavien geenien synteesi ja niitä ilmentävien organismien perimän muokkaus, esimerkiksi käyttäen CRISPR/Cas9 geenisaksia, tekevät nyt realistiseksi saada aikaan suuria määriä uudenlaisia organismeja, joita voidaan käyttää biotekniikassa tehokkaan ja monimuotoisen bio- ja kiertotalouden aikaansaamiseksi. Uusilla synteettisen biologian menetelmillä saamme käyttöömmme luonnossa elävien eliöiden DNA-molekyylien sisältämän tiedon koko kirjon. Synteettisen biologian menetelmien aikaansaama teknologinen hyppäys lyhentää tutkimukseen ja kehitystyöhön tarvittavaa aikaa. Yrityksille tästä seuraa pienentyneet uusien tuotantoprosessien ja tuotteiden kehittämiseen liittyvä taloudellinen riski. Tämä taloudellisen riskin pienentyminen mahdollistaa lisääntyneen bioteknisten ratkaisujen käyttöönoton ja arvoketjujen muodostumisen erilaisista raaka-aineista kaupallisesti kannattaviin lopputuotteisiin.

Synteettisen biologian avulla muokattujen mikrobien tutkimus- ja teollisuuskäyttö tapahtuvat suljetuissa systeemeissä, joissa geneettisesti muokatut mikrobit tuhotaan käytön jälkeen. Geenimuokattujen mikrobien käytöstä laboratorioissa ja teollisuuden tuotantoprosesseissa on jo vuosikymmenien käyttökokemus ja tällä hetkellä yleisesti geenitekniikan parissa käytössä olevat menetelmät mahdollistavat muokattujen organismien pitämisen erillään luonnosta. Nämä menetelmät soveltuvat myös tällä hetkellä tehtävään molekyylibiologiaan perustuvaan synteettisen biologian tutkimukseen ja hyödyntämiseen. On kuitenkin tärkeää, että synteettisen biologian mahdollistavien uudentyypisten geenimuokaustekniikoiden ja niiden avulla aikaansaattujen menetelmien ja sovellusten turvallisuutta seurataan tarkasti. Epävarmuustekijät, jotka liittyvät eliöiden uusiin ominaisuuksiin ja niiden vaikutuksiin olemassa oleviin biologisiin järjestelmiin, edellyttävät turvallisten ja tehokkaiden menetelmien suunnittelua epäsuotuisten vaikutusten tunnistamiseksi ja minimoimiseksi.

Synteettisen biologian yhteydessä on keskusteltu mahdollisesta tietoisesta väärinkäytöstä. On esitetty, että pahantahtoiset tahot voisivat pyrkiä rakentamaan taudinaiheuttajia tai luomaan synteettisiä organismeja, jotka tuottavat haitallisia yhdisteitä. Synteettisiä geenejä valmistavat ja myyvät yritykset selvittävät sekä asiakkaidensa taustan, että vertaavat tilattuja DNA-palasia sekvenssikirjastoihin estääkseen mahdollisesti haitallisten DNA-palojen tilaamisen. Mikäli joko tilaaja tai tilattu sekvenssi ei läpäise tarkastusta, ei tuotetta toimiteta tilaajalle. Useimmat synteettisen biologian menetelmät vaativat huomattavia tutkimusresursseja, eivätkä ole helposti toteutettavissa. Yhdessä nämä tekijät vähentävät, mutta eivät täysin poista mahdollisuutta synteettisen biologian menetelmien väärinkäytölle.

Synteettinen biologia herättää myös eettisiä kysymyksiä ja haasteita liittyen mm. omistusoikeuksiin ja patentointiin. Näitä kysymyksiä on pohdittu laajasti myös perinteisen geenitekniikan yhteydessä, eivätkä synteettisen biologian kohdalla esiin nousseet eettiset ja omistusoikeudelliset kysymykset eroa olennaisesti aiemmin esiinnousseista. Osa haasteista nousee yleisestä huolesta liittyen uusien teknologioiden käyttöönottoon. Yleensä vaikeimmat eettiset haasteet koskevat teknologian käytön mahdollisia haitallisia vaikutuksia ihmisten terveydelle sekä ympäristölle. Riskien hallinnassa on otettava huomioon sekä tahattomasta että arvaamattomista seurauksista aiheutuvat ongelmat. Nämä liittyvät ennen kaikkea muokattujen organismien ympäristöön leviämiseen. Luontoon leviämisen mahdollisuuden on jo kehitetty ja ollaan edelleen kehittämässä menetelmiä, jotka huomattavasti



vähentävät muokattujen organismien ja luonnon vuorovaikutusta ja mahdollisuutta lisääntymiskykyisten jälkeläisten muodostumiselle. Keskeistä on tekniikan todennäköisten hyötyjen ja siihen liittyvien mahdollisten riskien määrittäminen ja näiden arvottaminen suhteessa todennäköisesti aiheutuvaan haittaan tai hyötyyn.

Yhdysvaltain presidentin bioeettinen tutkimuskomissio on 2010 esittänyt synteettiseen biologiaan ja sen käytön etujen ja haittojen arvioinnin pohjaksi viittä eettistä periaatetta: (1) Tekniikan hyödyt yhteiskunnalle tulee maksimoida ja riskit minimoida. (2) Päätöksenteossa tulee ottaa huomioon tai olla edustettuina myös ne, joilla muuten ei ole äänioikeutta, esimerkiksi lapset ja tulevat sukupolvet. (3) Älyllinen vapaus tulee turvata, mutta luovuutta pitää käyttää vastuullisesti. (4) Demokraattinen päätöksenteko perustuu konsensushakuihin keskusteluihin, jossa kansalaisilla on aktiivinen rooli ja jossa eri näkemysten edustajia kunnioitetaan. (5) Tekniikkaa tulee kehittää niin, että sen hyödyt ja haitat jakaantuvat yhteiskunnassa oikeudenmukaisesti ja reilusti. Nämä periaatteet luovat pohjan laajasti eri näkökantoja huomioonottavalle jatkokeskustelulle ja päätöksenteolle.

## Nykytila

Olemassa olevaan potentiaaliin nähden vain hyvin pientä joukkoa mikrobeja käytetään tällä hetkellä tuottaessa mm. kemikaaleja ja polttoaineita biologista prosessia hyväksikäyttäen. Nopeasti lisääntyvän DNA-sekvenssidatan avulla saadaan nyt jatkuvasti kasvava määrä uutta tietoa eliöistä ja biologisista prosesseista. Tämän ovat mahdollistaneet sekä erittäin tehokkaat DNA-sekvensointimenetelmät, että niiden halpeneminen ja nopeutuminen. Uusia synteettisen biologian työkaluja hyödyntäen on nyt mahdollista rakentaa DNA-koodista uusia biologisia järjestelmiä, joiden perimän koko on miljoonia emäspareja. Uusien DNA-koodin lukumenetelmien kehittymisen rinnalla myös tietokoneiden laskentateho ja laskennalliset menetelmät kuten keinoäly, erilaiset algoritmit sekä tietokannat, ovat kehittyneet nopeasti. Tämä laskennallisen biologian kehitys mahdollistaa nyt ja enenevässä määrin tulevaisuudessa merkityksellisen tiedon suodattamisen nopeasti kasvavasta DNA-sekvenssidatasta. Suomessa VTT:n, Aalto yliopiston ja Turun yliopiston muodostama Tekesin 2014-2016 rahoittama Living factories-tutkimuskonsortio kehitti laajasti käyttökelpoisia menetelmiä mikrobien geneettiseen muokkaukseen. Projektin ohjaust ryhmässä toimineet yrityksen näkevät synteettisen biologian keskeisenä mahdollistavana teknologiana teollisen biotekniikan tulevaisuudelle. Hankkeessa tehtiin Synteettinen biologia kestävän biotalouden mahdollistajana - Tiekartta Suomelle. Tiekartta listaa toimenpiteitä, joiden avulla synteettisen biologian ratkaisuja voidaan ottaa käyttöön tuettaessa suomalaisen yritysmaailman kilpailukykyä ja menestystä.

Keskeinen teknologinen haaste on kehittää menetelmiä, jotka mahdollistavat kasvavasta DNA-sekvenssitetomäärästä saadun tiedon siirtämisen prosesseihin, joissa ratkotaan globaaleja ongelmia, kuten ilmaston muutosta ja tulevaisuudessa uhkaavaa resurssiniukkuutta. Tämä edellyttää nykyistä huomattavasti laajempaa automaation ja robotiikan käyttöönottoa muokattaessa mikrobien genomeja uusien, teollisiin sovelluksiin sopivien ominaisuuksien aikaansaamiseksi. Automaation lisääntynyt käyttö mikrobien muokkauksessa on ilmiö, joka tulee voimistumaan maailmanlaajuisesti. Se saattaa nopeallakin aikataululla

mahdollistaa erilaisten raaka-aineiden tehokkaan käytön mikrobeihin pohjautuvissa prosesseissa teollisessa biotekniikassa. Ensimmäiset mikrobien automatisoituun geenimuokkaukseen liiketoimintaideansa pohjaavat yritykset ovat jo toiminnassa Yhdysvalloissa ja ne ovat keränneet sijoittajilta satojen miljoonien dollareiden rahoituksen. VTT on mukana eurooppalaisessa IBISBA infrastruktuurihankkeessa (2017-2021), jossa kehitetään menetelmiä automaatioon ja robotiikkaan muokattaessa mikrobeja synteettistä biologialla käyttäen teollisen biotekniikan käyttöön. Tämä hanke tarjoaa tärkeän mahdollisuuden verkottumiseen eurooppalaisten toimijoiden kanssa ja käytäntöjen kehittämisen olemassa olevien synteettisen biologian infrastruktuurien tehokkaaseen ja toisiaan täydentävään käyttöön. On tärkeää, että Suomi, jolla on paljon teolliseen bioteknologiaan soveltuva biomassa ja synteettiseen biologian ratkaisuja mahdollistavaa korkeaa teknologiaa ja osaamista, pysyy yllä mainitun kehityksen eturintamassa. Biomassan bioteknologiseen hyödyntämiseen tähtäävät ratkaisut ovat globaaleja ja niille on laajat vientimarkkinat. Riittävästi investoinneilla Suomella on mahdollisuus kehittää uudenlaisia globaalisti kiinnostavia ratkaisuja ja korkeamman arvon vientituotteita.

## Toimenpide-ehdotukset

Kamppailussa kasvihuoneilmiötä ja uhkaavaa resurssiniukkuutta vastaan tulee nopeasti kehittää teknologisia ratkaisuja, jotka mahdollistavat siirtymisen pois fossiilista raaka-aineista valmistetuista kestävästä kehityksen mukaisiin tuotteisiin, joiden valmistuksessa hyödynnetään esimerkiksi teollisuuden ja maatalouden jätevirtoja. Tähän synteettinen biologia tarjoaa täysin uusia mahdollisuuksia. Jotta synteettisen biologian potentiaalista saadaan toivottu hyöty, tulee tutkimukseen ja tutkimuksen infrastruktuuriin ohjata enemmän resursseja. Suomen tulee pyrkiä keskeiseksi toimijaksi Euroopan tasolla ja luoda kansainvälisen tason verkottunutta liiketoimintaa maahamme.

On tärkeää turvata opetuksen riittävä volyymi ja ajanmukaisuus aloilla, jotka tukevat synteettisen biologian käyttöönottoa (laskennallinen biologia mukaan lukien keinoaly ja biologinen design, automaatio, robotiikka, bioprosessiteknologia, biologia, biokemia, molekyyli-biologia). Tulee taata, että Suomi pysyy mukana kansainvälisessä kilpailussa ja samalla houkuttelevana paikkana ulkomaisille huipuille tulla opiskelemaan, tutkimaan ja/tai toimimaan opettajina. Tämä mahdollistaa osaltaan kilpailukykyämme turvaamisen nopeasti kehittyvällä synteettisen biologian alalla.

Suomen biologisen monimuotoisuuden kartoittaminen ja hyvin organisoidun tietopankin luominen lisää mahdollisuutta käyttää nykyistä huomattavasti paremmin hyväksi maamme biologista monimuotoisuutta.

Suomen päättäjiltä toivotaan pitkän tähtäimen näkökulmaa ja rohkeaa päätöstä synteettisen biologian valitsemiseksi kansalliseksi teknologiseksi panostusalueeksi. Synteettinen biologia mahdollistaa teollisen tuotannon mullistamisen.

**Viitteet:**

Bioteekniikan neuvottelukunta, Synteettinen biologia, 2013, Helsinki  
([http://www.btnk.fi/files/pdf/Julkaisu/Synteettinen\\_biologia.pdf](http://www.btnk.fi/files/pdf/Julkaisu/Synteettinen_biologia.pdf))

Synteettinen biologia kestävä biotalouden mahdollistajana - Tiekartta Suomelle. 2017.  
Merja Penttilä ym. <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2017/syntheticbiologyroadmap.pdf>

New Directions: The Ethics of Synthetic Biology and Emerging Technologies. 2010.

[https://bioethicsarchive.georgetown.edu/pcsbi/sites/default/files/PCSBI-Synthetic-Biology-Report-12.16.10\\_0.pdf](https://bioethicsarchive.georgetown.edu/pcsbi/sites/default/files/PCSBI-Synthetic-Biology-Report-12.16.10_0.pdf)

### 3. Synteettinen biologia ja materiaalit

---

Markus Linder, Aalto-yliopisto

#### Mistä on kyse?

*Synteettinen biologia ja biopohjaiset materiaalit tarjoavat uusia mahdollisuuksia vihreämpään kemianteollisuuteen ja biopohjaisiin ja biohajoaviin materiaaleihin korvaamaan perinteisiä öljypohjaisia muoveja, joiden ympäristöhaitat ovat jo laajasti tunnetut.*

Yhteiskunnan materiaaliteknologia määrää laajasti meidän jokapäiväistä elämäämme. Jopa niin, että eri ajanjaksot nimetään materiaalien mukaan, kuten pronssikausi, rautakausi, jne. Voimme ehkä sanoa, että nykyään eletään muovikaudessa. On vaikeaa ajatella, miten tulimme aiemmin toimeen ilman muoveja ja synteettisiä tekstiilejä. Joka tapauksessa, materiaalien massatuotanto ja kulutus vaikuttavat laajasti ympäristöömme. Muovit ja tekstiilit valmistetaan pääosin petrokemikaaleista, ja monet näistä materiaaleista hajoavat huonosti, jos ne päätyvät luontoon. Hälyttäviä esimerkkejä hajoamattomien jätteiden kertymästä luonnossa ovat esimerkiksi jättimäiset muovilautat valtamerissä. Jätteiden kierrättäminen on tietysti järjestettävä paremmin, mutta myös tahattomasti pelkästään kuluttamisen kautta vapautuu merkittäviä määriä materiaalia, esimerkkinä mikromuovit. Petrokemikaalien käytön ongelma on myös raaka-aineen uusiutumattomuus. Nämä ja vastaavat pohdinnat johtavat kysymään, miten materiaaleja voitaisiin tuottaa kestävästi kehityksen mukaisesti. Biologiset molekyylit, kuten hiilihydraatit ja proteiinit, ovat periaatteessa erittäin sopivia myös teknisten ja kulutusmateriaalien valmistamiseen, esimerkkeinä vaikkapa silkki tai hämähäkin seitti. Nämä luonnonmateriaalit koostuvat lähes kokonaan proteiinista ja ovat mekaanisilta ominaisuuksiltaan erinomaisia materiaaleja. Ne ovat erittäin sitkeitä, eli niiden hajottamiseen vaadittava energia on hyvin korkea, jopa niin korkea että synteettisillä materiaaleilla on haastavaa saavuttaa samoja arvoja. Toinen esimerkki biologisesta materiaalista on helmiäinen, joka koostuu suurelta osin kalsiumkarbonaatista. Tämä on sama aines kuin marmori, mutta helmiäisen materiaaliominaisuudet ovat useita kertaluokkia parempia. Tämä johtuu siitä, miten kalsiumkarbonaatin kiteet ovat liimaantuneet silkkimäisen proteiinin avulla toisiinsa.

Tästä seuraa kysymys: Miten voisimme käyttää biologisia tuotantomekanismeja uusien materiaalien tuotantoon? Voisimmeko tuottaa silkkiproteiinia laboratorio-olosuhteissa ja tehdä siitä muovinkaltaisia materiaaleja? Voisiko helmiäistyyppisillä materiaaleilla korvata metalleja? Tai voisimmeko tehdä aivan uudenlaisia materiaaleja, joissa helmiäisen kaltaisella silkkiliimalla saadaan selluloosakuituja liimattua kiinni toisiinsa, tuloksena uudenlainen selluloosa-silkki -tekstiili? Tai miten puu- ja kasvipohjaisesta selluloosasta tehdään muovin korvike ja jopa huipputeknisiä materiaaleja? Tällaisia biosynteettisiä materiaaleja ollaan itse asiassa kehittämässä monessa tutkimuslaboratoriossa. Paitsi uudenlaiset biopohjaiset materiaalit, myös materiaalien prosessoiminen biologisesti on toinen kestävä materiaalitieteen perusongelma. Eli voidaanko perinteistä energiaintensiivistä kemianteollisuutta korvata biologisilla prosesseilla? Ongelmana on se, miten biologisia tuotanto-organismeja voidaan kehittää molekyylikomponenttien tuottamiseen. Tässä tulevat kyseeseen lähinnä mikrobit, eli haasteena on mikro-organismien kuten hiivojen tai bakteerien

geneettinen muokkaus niin, että ne tuottavat oikeanlaisia komponentteja. Tässä haasteessa synteettinen biologia tarjoaa mahdollisuuksia tehokkaisiin ratkaisuihin. Mikrobin sisäisiä synteesi- ja aineenvaihduntareittejä voidaan muokata ja rakentaa sopiviksi materiaalien tuottamiseen. Tämä on kuitenkin käytännössä usein haastavaa, koska tällaisten komponenttien tuottamiseen muokkauksen kohteena olevalta mikrobilta usein puuttuu aineenvaihduntaan tarvittavia osia, joita täytyy tuoda sen geneettiseen järjestelmään eli genomiin synteettisen biologian keinoin muilta organismeilta. Toisaalta materiaalityönteon ongelmana on, että biologiset materiaalikomponentit kuten silkki käyttäytyvät hyvin eri tavalla kuin nykyiset materiaalit, kuten muovit tai metallit, joita jo osataan tehokkaasti prosessoida teknisesti. Kun muovia useimmiten voidaan muokata lämmittämällä tai käyttämällä liuotimia, niin esimerkiksi silkkimateriaalille näitä prosesseja ei voida käyttää. Biologiset materiaalit muodostuvat vesiympäristössä, molekyylien itsejärjestäytymisen kautta tarkasti kontrolloiduissa olosuhteissa, ja usein solujen sisällä tietyssä järjestyksessä. Biologisten molekyylinen prosessointi materiaaleiksi on siis edelleen hyvin haastavaa, emmekä tarkasti tiedä, miten erilaiset materiaaliominaisuudet saavutetaan molekyyli-tason vuorovaikutuksista. Haasteena on siis kehittää uudenlainen materiaalityönteknologia, joka yhdistää biologisen ymmärryksen molekulaarisen materiaalityönteon kanssa. Tässä yhteydessä myös nanoteknologialla on merkittävä rooli.

## **Teknologian edut ja riskit**

Teknologian visiona on tuottaa korkeatasoisia materiaaleja laajamittaiseen käyttöön käyttäen teknologiaa, joka perustuu uusiutuviin ja biologisiin raaka-aineisiin. Materiaalit itse eivät kerääntyisi luontoon vaan olisivat biohajotuvia. Vaikka joidenkin materiaalien hajoaminen olisi hidasta kuten helmiäiselläkin, niin niistä ei erottuisi luonnolle vieraita ja haitallisia yhdisteitä. On melko selvää, että yhteiskunta on menossa kohti tämän tyyppistä teknologiaa, koska edut ovat hyvin selkeitä. Itse teknologiassa on kuitenkin se riski, että sen ymmärtäminen ja käyttö ovat haastavia, kehitys vie kauan ja voi kestää vuosikymmeniä ennen kuin teknologia on sovellettavissa käytännössä. Tuotteiden on oltava vähintään yhtä hyviä ja kustannustehokkaita kuin niiden, joita ne korvaavat, ja kilpailu tulee tässä mielessä olemaan erittäin haastavaa. Tällaisten biosynteettisten materiaalien tuotanto tulee myös edustamaan erittäin korkean teknologian osaamista. Yhtenä vaarana on, että osaaminen keskittyy vain tiettyihin yrityksiin tai maihin, kun taas kehittyvät alueet eivät pysty hyödyntämään uutta teknologiaa vaan jäävät vanhan teknologian varaan.

Kun materiaalityöntuotantoon suunnataan orgaanista materiaalia, niin tämä materiaalityöntuotanto kilpailee muun käytön kanssa. Tässä on keskeistä, että ruoantuotantoon kelpaavaa raaka-ainetta ei käytetä materiaalityöntuotantoon. Sen sijaan ruoantuotannossa syötäväksi kelpaamaton jäte voi olla raaka-ainetta biopohjaisille materiaaleille, jolloin kustannustehokkuus saavutetaan sillä, että jätevirta, jonka hävittämisestä on jouduttu maksamaan, muodostuu raaka-aineeksi ja tulonlähteeksi. Tämä, samoin kuin muiden teollisuusjätteiden käyttö uusien biopohjaisten huippumateriaalien tuottamiseen, on täysin mahdollista ja tarjoaa jännittävän mahdollisuuden kiertotalouteen.

Geeniteknologiaan liittyy tiettyjä riskejä. Materiaalituotannon yhteydessä ne eivät poikkea siitä riskistä, mitä mikrobien geenimuokkauksessa yleensäkin on. Näitä riskejä on kartoitettu kattavasti tutkimusyhteisöissä ja teollisuudessa, ja niiden perusteella on kehitetty lainsäädäntöä ja toimintamalleja, jotka ovat osoittautuneet riittäviksi eikä tästä teknologiasta ole koitunut haittaa ympäristölle tai ihmisille. Yleinen ymmärrys on, että tämänhetkinen toimintatapa on turvallinen.

## **Nykytila**

Sekä yrityksissä että julkisessa tutkimuksessa biologinen materiaalituotanto on herättänyt paljon mielenkiintoa. Aihe tarjoaa tieteellisesti merkittäviä tutkimuksenasetteluja ja potentiaalinen yhteiskunnallinen hyöty on tutkimusyhteisölle erittäin motivoiva. Suomessa on muutama tutkimusryhmä, jotka ovat suunnanneet tutkimuksensa tähän. Ymmärretään, että tutkimuksellisesti haasteet ovat erittäin suuria, ja ne tulevat vaatimaan paljon resursseja. On jo olemassa start-up -yrityksiä, jotka tähtäävät näille markkinoille. Näiden yritysten innovaatioissa ja toimintamalleissa nähdään erittäin paljon kasvupotentiaalia.

## **Tulevaisuus**

Biosynteettisten materiaalien tuotanto voi vaikuttaa hyvinkin paljon yhteiskuntaan tulevaisuudessa. Lainsäädäntö vaikuttaa mahdollisesti nykyisten materiaalien käyttöön, jos esimerkiksi mikromuovien kertyminen luontoon jatkuu ja selviä ympäristöhaittoja ilmenee. Tällöin nykymateriaalin rajoituksia koskeva lainsäädäntö vauhdittaa vaihtoehtojen kehittämistä kuten on nähty esimerkiksi freonien ja monien muiden kemikaalien kohdalla. Kun uutta lainsäädäntöä suunnitellaan, tällöin vaaditaan tietysti myös ymmärrystä vaihtoehtoisista mahdollisuuksista.

On selvää, että teknologinen osaaminen tulevaisuudessa on taloudellinen ja yhteiskunnallinen kilpailuetu. Teknologian kehitys riippuu tietysti siihen suunnattavista resursseista. Koska tulevaisuuden teknologia tulee olemaan poikkitieteellistä, sen toimintaedellytykset ovat parempia suurissa tutkimuskeskitymissä, joissa tieteenalojen ylittävää tutkimusta syntyy luontevimmin. Esimerkiksi tekoäly (artificial intelligence, AI) ja laskennallista simulaatiota voidaan yhdistää biosynteettiseen materiaalitutkimukseen.

Suomessa on hyvät edellytykset biosynteettisten materiaalien kehitystyöhön ja tuotantoon, koska jo nyt olemme maailman kärkipäässä esimerkiksi lignoselluloosan monipuolisessa käytössä täysin uusiin materiaaleihin. Tähän teolliseen osaamiseen on luontevaa liittää myös muilla tavoilla tuotettuja biologisia komponentteja. Tällöin niin tutkimuksessa, materiaaleissa itsessään, materiaalivirroissa kuin kaupallisessa osaamisessakin voi syntyä useita synergiaetuja. Näiden visioiden toteutumiseksi tulisi varmistaa, että eri toimijoita tuotaisiin yhteen riittävän avarakatseisesti ja samalla luotaisiin mahdollisuuksia pitkäjänteiseen kehitykseen. Uudet teknologiat antavat myös uusia mahdollisuuksia kiertotaloudelle, jossa teollisuus- ja elintarvikejätteistä voidaan prosessoida jopa korkean teknologian tuotteita.

## 4. Lääketieteellinen geenitekniikka -pohdintoja eduskunnan tulevaisuusvaliokunnalle

---

Kirmo Wartiovaara, HY ja HYKS

Geenitekniikan käyttömahdollisuudet lääketieteessä ja terveyden edistämässä ovat suuruusluokaltaan valtavat. Varovaisestikin arvioiden kaupallisiin sovelluksiin käytetään globaalisti vuosittain kymmeniä miljardeja euroja ja ala kasvaa 7-8% vauhdilla joka vuosi. Suomella on ollut ja on edelleen mahdollisuus olla mukana tekniikan kehityksen kärkijoukoissa. Geenitekniikka yhdistyy lääketieteessä usein kantasolujen käyttöön. Molempiin aloihin liittyy teknisiä, yhteiskunnallisia ja eettisiä kysymyksiä sekä haasteita, joihin tulisi vastata, mikäli tekniikoiden mahdollisuuksista halutaan hyötyä yhteiskunnalle.

### Mistä on kyse?

Lääketieteellinen geenitekniikka on käsitteenä hyvin laaja, mutta pelkistettynä sitä voisi kuvata vastauksena kysymykseen: Miten saisimme ihmisen solut toimimaan paremmin geenien (DNA:n) avulla? Koska solujemme kaikki toiminnot perustuvat niiden sisällä oleviin geeneihin, lähes jokainen tautimme olisi jollain tapaa hoidettavissa geenitekniikalla, jos vain tietäisimme miten. Perustava lähtökohta geenitekniikan käytölle onkin, että pystyäksemme ja parantamaan soluja, meidän täytyy ymmärtää niitä hyvin. Tämä tarkoittaa ihmisen (solu)biologian ja tautien syntymekanismien tuntemista. Ei voi siis kylliksi painottaa, kuinka tärkeää perustutkimus on kaiken sovellusten kehittämisen ja hyödyntämisen mahdollistamisessa.

Lääketieteellinen geenitekniikka pohjautuu ihmisen DNA:n toiminnan ymmärtämiseen, lähtien DNA:n rakenteen ja emäsjärjestyksen selvittämisestä ja siinä olevan tiedon yhdistämisestä henkilön ominaisuuksiin, terveyteen ja rekisteritietoihin. Tämä ei kuitenkaan ole varsinaista geeniteknologiaa, vaan erinomainen vahvuus suomalaisessa toimintaympäristössä, joskin se sisältää runsaasti mm. tietoturvaan liittyviä kysymyksiä.

DNA-tekniikan mahdollisuuksista ihmisen terveyden parantamiseen lienee perusteltua keskittyä ”klassiseen” geeniterapiaan ja geenimuokkaukseen. Molempien tavoitteena on saada hoidettava solu tuottamaan haluttua, tietyn geenin koodaamaa proteiinia. Menetelmiä voidaan käyttää kantasoluissa tai niillä voidaan hoitaa ihmisen muita kuin kantasoluja. Molempia menetelmiä voidaan myös käyttää sekä suoraan elävässä ihmisessä että ottamalla viljelyyn soluja, jotka korjataan ja palautetaan hoidossa. Traditionaalinen geeniterapia tarkoittaa sitä, että soluun siirretään kokonainen geeni, yleensä sattumanvaraisesti, kun taas geenimuokkauksessa editoidaan solun omaa geeniä halutulla tavalla. Kansanomainen vertaus tekniikoiden erosta voisi olla keittokirjan editoiminen joko liittämällä siihen lisälehti (geeniterapia) tai muokkaamalla tekstiä tietokoneen tekstinkäsittelyohjelmalla (geenimuokkaus).

**Perinteisen geeniterapian** tuotteita on länsimaissa tällä hetkellä markkinoilla yhteensä viisi. Muutamassa tuotteessa käytetään potilaalta otettuja soluja, joihin lisätään puuttuva geeni ja palautetaan solut elimistöön. Esimerkkituote tästä on harvinaista ADA- immuunipuutosta hoitava Strimvelis-lääke, joka hyväksyttiin käyttöön Euroopassa v. 2016. Osa lääkkeistä taas tuottaa solulle haitallisia tekijöitä, jolloin voidaan hoitaa liiallista ja käsistä karannutta solukasvua eli syöpää. Tällaisia ovat mm onkolyttiset virusoidot, joissa syöpäsolut saadaan tuottamaan itselleen tuhoisia viruksia. Potilaskokeita listaavalla [www.clinicaltrials.gov](http://www.clinicaltrials.gov) -sivustolla on käynnissä olevia geeniterapiatutkimuksia tällä hetkellä 207 kappaletta. Valtaosassa lähiaikoina valmistuvista tutkimuksista hoidetaan veri- ja silmänsairauksia. Suomessa on menossa muutama geeniterapian hoitokoe ja muutama geeniterapiaa kehittävä yritys.

**Geenimuokkauksessa** solujen sisällä olevaa DNA:ta manipuloidaan halutulla tavalla tarkasti. Tämä voi tapahtua muuttamalla DNA:n emäsjärjestystä tai sen ilmentämistä. Keskeinen ero ”perinteiseen” geeniterapiaan on se, että muokkaus tapahtuu lukemalla DNA-koodia ja kohdentamalla toimenpiteet juuri haluttuun osaan geeniä, jopa yhden DNA-emäksen tarkkuudella. Geenimuokkaus toimii kaikissa tutkituissa eliöissä, joten se on käytökelpoinen bakteereista kasveihin ja ihmisiin. Sillä voidaan muokata myös virusten DNA:ta (tai RNA:ta). Geenimuokkausta tehdään mm. meganukleaasi-, ZFN- ja TALEN- proteiineilla sekä uusimmalla CRISPR-Cas9 tekniikalla, joka on nopeutensa ja edullisuutensa vuoksi lyönyt itsensä läpi uskomattomalla vauhdilla. Aiemmat tekniikat ovat ehtineet potilaskokeisiin muutamia vuosia sitten, CRISPR-Cas9 -menetelmää kokeillaan paraikaa ihmisillä ensimmäistä kertaa Kiinassa, mutta ei vielä länsimaissa.

Geenimuokkauksen mahdollisuudet lääketieteessä ovat niin suuret, että on vaikea kuvitella mitä sillä ei voisi tehdä. Esimerkkejä jo saavutetuista kokeellisista läpimurroista ovat HIV:n parantaminen ihmisellä, malarian poistaminen hyttysiltä, syöpää tuhoavien immuunisolujen luominen, tautibakteereja tappavien virusten valmistaminen antibioottiresistenssin voittamiseksi ja perinnöllisen geenivirheen korjaaminen ihmisalkiossa. Geenimuokkaus ihmiselle tauteja aiheuttavissa eliöissä on suuri osa lääketieteellistä geenitekniikkaa.

## Riskejä ja haasteita

Geenitekniikan lääketieteelliseen käyttöön liittyy teknisen osaamisen lisäksi monia yhteiskunnallisia kysymyksiä. Hoitojen tulisi olla mahdollisimman turvallisia ja tehokkaita sekä eettisesti ja taloudellisesti perusteltuja. Ohjeistus ja lainsäädäntö ovat usein selvästi jäljessä tekniikan kehitystä. Yhteiskunnalliset mielipiteet eri asioista eivät ole useimmiten tiedossa ja suuri osa kysymyksistäkin on kansalaisille uusia. Osa hyvin toimivistakin hoidoista on kalliita ja niiden käyttöä rajoittavana tekijänä voi olla julkisesti rahoitettavien hoitojen kustannusten kasvu eikä siis enää se, osaammeko hoitaa jonkin vaivan tai taudin. Suomessa ja muissa korkean teknologian maissa olemme hyvin eri asemassa verrattuna muualla asuviin ihmisiin ja tulisi pohtia onko tällä merkitystä. Osa kysymyksistä on ekologisia, sillä muiden lajien muokkaaminen muuttaa luontoa.



Suuria kysymyksiä on paljon. On hankala sanoa, minkälaisia muutoksia on eettisesti hyväksyttävää tehdä. Vakavien tautien parantaminen on yleisesti hyväksytympää, mutta rajanveto on vaikeaa. Mikäli tautiin ei ole olemassa hoitoa, geenimuokkaus on helpompi perustella, mutta kuka on oikea henkilö päättämään mitä saa tehdä ja mitä ei? Saako ihmisille tehdä periytyviä muutoksia? Esimerkiksi influenssan vastustuskyky voisi olla yhteiskunnan kannalta hyvinkin toivottava. Entä saako hyvin kallista hoitoa antaa, mikäli potilas itse maksaa? Emme vielä osaa vaikuttaa esimerkiksi ikääntymiseen, älykkyyteen tai kauneuteen, mutta tulevaisuudessa tämä saattaa olla mahdollista, luultavasti ensin yksilössä itsessään, mutta tämän jälkeen mahdollisesti myös hänen jälkeläisissään. En pidä vielä ajankohtaisena näiden ei-lääketieteellisten ongelmien ratkaisemista, mutta uudet vakavienkin tautien geeniteknikkaan perustuvat lääkkeet ovat jo nyt hyvin kalliita. Tulevaisuudessa sama koskee luultavasti myös muunlaista geenimuokkausta.

Ihmisen geenimuokkauksen turvallisuuskysymykset ovat useimmiten keskittyneet ns. off-target -muutoksiin, eli muokkaustapahtumiin muualla kuin halutussa geenissä. Tämä on mahdollinen riski, joka tosin on pienenemässä hyvän teknisen kehityksen ansiosta. Hyväksyttävissä oleva riski riippunee korjattavan vaivan suuruudesta. Toinen, käytännön haaste on, että koko geeninmuokkaushoito on aivan uusi mahdollinen terveydenhuollon tai sairaanhoidon alue, eikä millään maalla ole olemassa infrastruktuuria hoitojen toteuttamiseen. Geenimuokkauksen käytännön toteutus vaatii uusia terveydenhuollon erikoisalojen yksiköitä tai ainakin osaavaa henkilökuntaa, eri alojen yhteistyötä ja koulutusta, joiden järjestämisestä kellään ei vielä ole kokemusta. En näe tätä ylitsepääsemättömänä ongelmana, mutta sen ratkaisemiseen tarvitaan resursseja ja aikaa.

## Toimenpide-ehdotukset

1. **Julkisen tutkimuksen rahoituksen lisääminen.** Tutkimukseen satsaaminen on aivan keskeinen edellytys sille, että uusia tekniikoita tai sovelluksia saadaan käyttöön, saati päästään luomaan uutta arvonalisää. Täytyy muistaa, että myös muualla tehtyjen keksintöjen tehokas käyttö vaatii sitä, että meillä on ihmisiä, joille niiden käyttö ja ajattelumallit ovat tuttuja.
2. **Koulutus** on toinen edellytys nimenomaan geeniteknikan mahdollistamiseksi. Tämä tarkoittaa sekä osaajien että yleisön koulutusta, sillä uuteen tekniikkaan liittyy niin paljon yhteiskunnallisia kysymyksiä, että on todella haasteellista saada tekniikoita käyttöön, mikäli ihmiset vastustavat niitä, koska eivät ymmärrä mistä on kysymys.
3. **Lainsäädännöllisen pattitilanteen selvittäminen.** Geeniteknikan kohdalla lainsäädäntö ja ohjeistus ovat puutteellisia. Menetämme tutkijoita, yrityksiä ja Suomea/Eurooppaa hyödyttävää osaamista ja mahdollisuuksia mm. siksi että geenimuokkauksesta ei ole saatu ohjeistusta aikaiseksi.
4. **Lääketieteen tutkimusmahdollisuuksien parantaminen.** Lääkärit ovat keskeisiä toimijoita perustutkimuksesta nousevien sovellusten luomisessa. Kliinikoilla ei kuitenkaan ole juurikaan mahdollisuuksia käyttää aikaa tutkimukseen.

Jokainen kehittyvä yritys tietää, että budjetista tulisi laittaa esimerkiksi 5-10% tutkimukseen ja tuotekehitykseen, mutta poliittisesti ohjatulla terveyden- ja sairaanhoidon toimialalla ei tällaiseen kannusteta läheskään näin paljoa.

5. **Yritysten tukeminen ja yrittäjyyteen kannustaminen.** Lääketieteellinen kehitys tutkimuksesta sovelluksiin vaatii toimivaa biotekniikan yritys kenttää. Suomessa on monia hyviä ideoita ja tutkimustuloksia, mutta osaaminen ja apu sekä rahoitusmahdollisuudet lääketieteellisten yritysten luomisessa ovat puutteellisia.
6. **Ulkomaisten osaajien rekrytointi.** Suomessa on hyviä tutkimusmahdollisuuksia, mutta hyvien tulijoiden rekrytointi on vaikeaa, sillä järjestelmällisiä keinoja rakentaa houkuttelevia paketteja ei ole olemassa. Tämä koskee niin suomalaisia, post-doc vaiheen ulkomailla tehneitä mahdollisia paluumuuttajia, kuin muunmaalaisiakin huippuasiantuntijoita.

Yhteenvedonä totean, että lääketieteellinen geenitekniikka sisältää erittäin suuria mahdollisuuksia, joiden taloudellinen merkitys tulee globaalisti olemaan satojen miljardien arvoisen. Geenimuokkaus mahdollistaa hoidon lukuisiin sairauksiin, joihin sitä ei aiemmin ole ollut. Perinnöllisten muutosten tekeminen on mahdollista, mutta sisältää eettisesti vaikeita kysymyksiä. Geenimuokkauksen kehitystä ja käyttöönottoa varten tarvitaan tutkimusta, koulutusta, julkista keskustelua ja näihin pohjautuvaa uutta säätelyä sekä tekijöitä houkutteleva ympäristö. Mahdollisuuksia on valtavasti, mutta uhkana on sekä päätöksenteon että hyötyjen valuminen muualle, mikäli asiassa ei edetä Suomessa ja Euroopassa.

## 5. Geeniteknikka ja solumaatalous

---

Lauri Reuter, Teknologian tutkimuskeskus VTT

### Mistä on kyse?

Tässä yhteydessä keskitymme geeniteknikkaan välineenä, joka mahdollistaa erilaisten ravintona käytettävien yhdisteiden tuottamisen mikrobien ja solujen avulla suljetuissa säiliöissä. Solumaatalous (engl. Cellular Agriculture) viittaa ajatukseen perinteisten menetelmien rinnalle tulevasta solutehtaiden käytöstä elintarvikkeiden komponenttien tuottamisessa. Tuotteita voivat olla joko eliöt tai solut kokonaan tai niistä eristetyt yhdisteet.

Bio- ja geeniteknikkaa on käytetty jo 1980-luvulta lähtien esimerkiksi lääkeaineiden ja elintarviketeollisuuden apuaineiden tuottamisessa. Apuaineita ovat esimerkiksi pieninä määrinä käytettävät entsyymit, kuten juuston valmistuksessa käytettävä juoksute. Alun perin juoksute eroteltiin vasikoiden vatsoista. Apuaineilla ei ole ravitsemuksellista merkitystä ja niiden aktiivisuus häviää tuotteen valmistusprosessin aikana. Mikrobien käyttö näiden proteiinien tuottamisessa tekee saatavuudesta varmaa ja tuotteesta tasalaatuista ja turvallista.

Synteettisen biologian kehittyminen mahdollistaa nyt mikrobien aivan toisenlaisen muokkaamisen erittäin tehokkaiksi eläviksi tehtaiksi. Samalla tuotantoprosessien hallinta on kehittynyt merkittävästi. Kehittyvät teknologiat mahdollistavat proteiinien ja kokonaisten solujen ja mikrobien tuottamisen mittakaavassa, jossa niitä voidaan käyttää elintarvikkeiden ainesosina.

Eläinperäisten proteiinien ominaisuudet, kuten vahtoutuminen ja geeliytyminen, tekevät niistä oleellisia elintarvikkeiden komponentteja. Globaalisti lisääntyneet eläintuotannon ongelmat lisäävät paineita löytää vaihtoehtoisia tuotantotapoja esimerkiksi maidon ja kananunien funktionaalisille proteiineille. Synä ovat sekä ympäristö että talous. Eläinperäisistä tuotteista luopuminen eettisistä syistä on myös kasvava kuluttajatrendi.

Kasvit tuottavat valtavia määriä monimutkaisia yhdisteitä, kuten antioksidantteja ja vitamiineja, jotka ovat tärkeä osa terveellistä ruokavaliota. Kasvit tuottavat myös kiinnostavia aromiaineita. Säiliöissä kasvatettuja kasvien soluviljelmiä käytetään jonkin verran lääkeaineiden sekä kosmetiikan komponenttien tuotannossa.

### Nykytila

Mikrobeista valmistettuja tuotteita on jo markkinoilla. Esimerkiksi erilaisia ravintohiivoja on käytetty jo kauan. Suomessakin myytävä Quorn on valmistettu säiliössä kasvatetusta proteiinirikkaasta mikrobimassasta. Sekä hiivojen että Quornin raaka-aineeksi kasvatettavan sienen ravinnoksi käytetään sokeria. Kehittyvät teknologiat mahdollistavat kuitenkin

myös esimerkiksi hiilidioksidin tai metaanin käyttämisen ravinnon lähteenä. Suomalainen Solar Foods -yritys kehittää hiilidioksidin ja sähkön avulla kasvatettavaa mikrobimassaa ihmisravinnoksi ja tähtää markkinoille vuonna 2021. Tuote on laadultaan verrattavissa soijaproteiiniin, mutta tuotanto ei ole riippuvainen pelloista tai sääolosuhteista.

Eläinsoluista kasvatettavan keinolihan tuotanto on saanut paljon huomiota medioissa ja kerännyt valtavia investointeja maailmanlaajuisesti. Prosessi on kuitenkin vielä erittäin kallis ja tuotteita saataneen odottaa vielä verrattain kauan.

Soluviljeltyjä kokonaisia kasvisoluja ei käytetä tällä hetkellä elintarvikkeissa, mutta kasvisoluviljelmistä valmistettuja uutteita markkinoidaan elintarvikkeiden komponenteiksi. VTT:llä tehdään aktiivisesti tutkimusta, joka tähtää kasvisoluviljelmien laajempaan käyttöön elintarvikkeina.

Edellä mainittujen tuotteiden valmistuksessa käytettäviä soluja tai mikrobeita ei ole geneettisesti muokattu. Geeniteknikka avaa kuitenkin mahdollisuuksia tuotannon tehostamiseen ja tuotteiden laadun parantamiseen. Tuotantoeliöiden muokkaamisen voi rinnastaa kasvinjalostukseen.

Geeniteknikka mahdollistaa solujen valjastamisen erilaisten proteiinien tuotantoon. Mikrobien avulla tuotettuja proteiineja on markkinoilla paljon: esimerkiksi elintarvikeprosesseissa käytettävät apuaineet (entsyymit) tuotetaan nykyisin pääosin mikrobeissa. Useat yritykset, kuten Perfect Day Foods ja Clara Foods, ovat keränneet mittavia investointeja mikrobien avulla valmistettujen muna- ja maitoproteiinien tuomiseksi markkinoille. Tuotantotehokkuuden ja -mittakaavan kasvaessa ensimmäiset tuotteet voivat olla käsillä jo aivan lähivuosina. VTT:llä munavalkuaisen proteiineja on tuotettu *Trichoderma reesei*-sienen avulla. Erittäin tehokas prosessi tuottaa jo jopa 5 grammaa proteiinia litran tilavuutta kohti. Tämä taso on lähellä kaupallisesti kannattavaa tehokkuutta.

Impossible Foods käyttää jo nyt tuotteissaan mikrobien avulla tuotettua proteiinia, jolla kasvipohjainen pihvi on saatu muistuttamaan erittäin läheisesti naudanlihaa. Valmiita tuotteita myydään yli tuhannessa ravintolassa Yhdysvalloissa.

## **Mahdollisuudet**

Elintarvikkeiden komponenttien tuottaminen hyvin hallituissa ja suljetuissa systeemeissä on erittäin tehokasta ravinteiden, veden ja maankäytön suhteen. Tarkoin hallittu tuotantoprosessi parantaa hintojen ennakoitavuutta ja tekee tuotteesta äärimmäisen tasalaatuista. Nämä ovat tärkeitä tekijöitä elintarviketeollisuudelle. Lisäksi eläinperäisistä tuotteista luopuminen näyttäisi muodostuvan merkittäväksi kilpailueduksi. Yhdessä nämä tekijät ajavat solumaataloutta hyvin nopeaan kehitykseen.

Uuden teknologian mahdollisuudet ulottuvat kuitenkin paljon tuttujen komponenttien kestävä tuotantoa pidemmälle. Kehittyvä mallinnuskyky mahdollistaa myös proteiinien aivan uudenlaisen muokkaamisen paremmin käyttötarkoituksiinsa sopiviksi. Maitoproteiineja

voidaan mahdollisesti muokata niin, että ne eivät allergisoi ja kanamunan valkuaisen proteiineja niin, että niiden vahtoutumisominaisuudet ovat paremmat. Uudet tuotantomenetelmät eivät siis vain korvaa vanhaa, vaan mahdollistavat aivan uudenlaisten tuotteiden kehittämisen.

Kasvien kohdalla soluviljelyteknologia mahdollistaa myös hankalasti saavutettavien resurssien saamisen käyttöön. Lillukan, mesimarjan, pihlajan, koivun ja variksenmarjan soluviljelmät saattavat mahdollistaa suomalaisten luonnonvarojen aivan uudenlaisen hyödyntämisen myös elintarviketeollisuudessa.

Suomi on erittäin haastava ympäristö ruoantuotannolle. Samalla täällä on korkeaa osaamista ja vahvat perinteet niin elintarviketeknologian kuin teollisen biotekniikankin aloilta. Ilmastonmuutos, ympäristön pilaantuminen ja lisääntyvä ruoan tarve aiheuttavat valtavia paineita globaalille ruoantuotannolle. Suomessa on ainutlaatuiset mahdollisuudet kehittää uusia solutehtaisiin pohjautuvia teknologioita globaaleille markkinoille.

## Riskit

Uusiin tuotantotapoihin liittyy toki myös riskejä, jotka on hallittava huolellisesti. Oletettavasti suurimmat mahdolliset riskit liittyvät uusien tuotteiden allergeenisyyteen. Vaikka solutehtaissa valmistetut eläinproteiinit ovat periaatteessa identtisiä alkuperäisten proteiinien kanssa, on niiden turvallisuudessa otettava huomioon uuden tuotantoisännän mahdollisesti tuottamat allergeenit. Muokatut proteiinit voivat ainakin teoriassa olla allergeenisia. Mahdollisen allergeenisyyden testaaminen on oleellinen askel ennen uusien elintarvikkeiden hyväksymistä markkinoille.

Euroopan elintarviketurvallisuusvirasto (EFSA) on uudistanut uuselintarvikkeita koskevaa lainsäädäntöä vuoden 2018 alusta. Lainsäädännön uuselintarvikkeilta vaatimat testit ovat kattavat ja pitävät huolen, että uudet tuotteet ovat turvallisia. Lainsäädännön olemassaolo poistaa myös epätietoisuutta uusien tuotteiden hyväksyttävyydeltä.

Toisaalta riskinä on nähtävä myös kuluttajien näkemykset. Jos biotekniikan käyttö elintarvikkeiden tuotannossa saa huonon sävyn, ei markkinoita synny ja hyvätkin teknologiat saattavat jäädä hyllyyn. Tässä aivan keskeistä on läpinäkyvä ja avoin dialogi kuluttajien, viranomaisten, teollisuuden ja tutkimusmaailman välillä.

## Toimenpide-ehdotukset

1. **Lainsäädännön tuki:** Suomen tulee olla edelläkävijä ja tukea EU:ssa modernin bio- ja geenitekniikan hyödyntämistä mahdollistavaa geenitekniikkalain tulkin-taa ja uudistamista. Samoin kuin kasvinjalostuksen kohdalla, geenieditoituja mikrobeja ja soluja tulee käsitellä kuten perinteisin menetelmin jalostettuja, ei GMO:na.

2. **Koulutus:** Bio- ja geenitekniikalla on merkittävä rooli ruoantuotannossa jo nyt. Alojen ymmärtämisen tulee olla vahvasti osa jo peruskoulun opetussuunnitelmaa. Teknologioiden ymmärtäminen auttaa uhkien ja mahdollisuuksien käsittelemisessä järjen eikä vain tunteen tasolla ja estää väärinymmärrysten syntymistä. Bio- ja geenitekniikka tulevat myös työllistämään yhä enemmän osaajia.
3. **Viestintä:** Eduskunnan on syytä muodostaa selvä tutkittuun tietoon perustuva näkemys geenitekniikan hyödyntämisestä, ja viestiä sitä. Läpinäkyvä ja avoin dialogi on oleellisen tärkeä osa uusien teknologioiden onnistunutta jalkauttamista yhteiskuntaan.
4. **Tutkimus ja innovaatiot:** Tutkimusresursseja tarvitaan erityisesti geenitekniikan mahdollisuuksien osoittamiseen sekä suomalaisissa olosuhteissa että globaaleilla markkinoilla. Erityisesti huolellisten riskiarvioiden tekeminen ja innovaatioiden maaliin saattaminen vaativat varoja. Korkean teknologiaosaamisen maana Suomessa on erinomaiset mahdollisuudet olla edelläkävijä ja synnyttää uutta liiketoimintaa sekä teknologiavientiä kestävästä ruoantuotannosta.

## 6. Solar Foods Oy:n kehittämä elintarvikeraaka-aineen tuotantoteknologia

---

Juha-Pekka Pitkänen, Solar Foods Oy

### Teknologia lyhyesti

Solar Foods Oy kehittää uutta proteiinintuotantoa raaka-aineina hiilidioksidi, uusiutuva sähkö, vesi ja kivennäisaineet. Tuotantoprosessi on samankaltainen fermentaatioprosessi kuin hiivan tai maitohappobakteerien tuottaminen, mutta sokerien sijaan tärkeimmät ainesosat ovat hiilidioksidi ja sähkö. Prosessissa käytetty mikro-organismi luo kaikki aminohapot, proteiinit, hiilihydraatit, lipidit ja vitamiinit hiilidioksidista käyttäen sähköä energiälähteenä. Typen lähteenä on ammoniumsuolet ja lisäksi kivennäisaineista saadaan noin 18 muuta tarvittavaa alkuainetta. Tavoitteena on, että valmistettua yksisoluproteiinia voidaan käyttää proteiinipitoisena elintarvikkeiden ainesosana erilaisissa elintarviketuotteissa. Sellaisenaan materiaali näyttää ja maistuu vehnäjauholta, mutta silti se sisältää 50% proteiinia. Aminohappokoostumus on verrattavissa soijaan ja sisältää kaikki ihmisravinnon vaatimat aminohapot.

Solar Foods pohjautuu Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:ssä (VTT) ja Lappeenrannan Teknisessä Yliopistossa (LUT) tehtyyn tutkimukseen, jota ovat rahoittaneet Suomen Akatemia, Teknologiateollisuuden 100-vuotissäätiö ja Jane ja Aatos Erkon säätiö. VTT:llä tutkimusta on johtanut Juha-Pekka Pitkänen ja LUT:ssa professori Jero Ahola. Solar Foods Oy on saanut Business Finlandilta tuotekehityslainan ja yrityksen sijoittajina ovat Lifeline Ventures, VTT Ventures ja Green Campus Innovations. Solar Foods Oy on perustettu loppuvuonna 2017.

### Teknologian edut

Solar Foods Oy:n kehittämä tuotanto mahdollistaa elintarviketuotannon riippumatta ympäristöllisistä rajoitteista, kuten ilmastosta, säästä ja viljelykelpoisesta maaperästä. Aurinkosähköön kytkettynä tuotanto hyödyntää auringonvalon tehokkaammin kuin fotosynteesi, mikä mahdollistaa tehokkaamman maankäytön verrattuna esim. soijan tuotantoon. Tuholaisten torjunta-aineita tai maan kastelua ei tarvita, jolloin vältytään ympäristövaikutuksilta, kuten kasvihuonekaasupäästöiltä ilmakehään ja veden saastumiselta, rehevöitymiseltä tai loppumiselta. Tuotanto voi tapahtua kaikkialla maailmassa ja voi siten hyödyttää sekä kehittyviä että kehittyneitä maita. Kaiken kaikkiaan ruoan tuottaminen sähkön ja hiilidioksidin avulla vastaa kahteen merkittävään globaaliin kysymykseen: kuinka estää hiilidioksidipitoisuuden nousu ilmakehässä ja kuinka tuottaa ruokaa kasvavalle ihmisväestölle.

Suomessa on paljon sellutehtaita, jotka tuottavat sivutuotteena biopohjaista hiilidioksidia. Jos otetaan Suomen 3. pienin sellutehdas, joka tuottaa noin 250 miljoonaa kiloa hiilidioksidia vuosittain ja muutetaan se proteiiniksi, saadaan noin 55 miljoonaa kiloa proteiinia. Suomen vuosittainen ruoka- ja rehuproteiinien proteiinialijäämä on noin 100 miljoonaa kiloa

eli yhden sellutehtaan hiilidioksideilla voitaisiin kattaa yli puolet proteiinalijäämästä. Energiaa tämä vaatisi noin yhden prosentin Suomen nykyisestä energiantuotannosta.

## **Nykytila**

Tällä hetkellä prosessi on laboratoriomittakaavassa, mutta tavoitteena on ensimmäinen kaupallisen mittakaavan tuotantolaitos Suomessa kolmen vuoden päästä. Kehittämiseen kuuluu myös Euroopan elintarviketurvallisuusviraston (EFSA) vaatima testaus sen osoittamiseksi, että tuotettu yksisoluproteiini on ihmisravinnoksi turvallista. Toteutuessaan ensimmäinen kaupallinen tuotantolaitos pystyy tuottamaan vuosittain proteiinia 50 miljoonaa ateriaa varten. Sitä ennen, vuoden 2018 lopulla, pilot-laitoksen on tavoitteena tuottaa materiaalia 1 kg/päivä testaustarkoituksiin.

## **Teknologian riskit**

Solar Foods Oy:n tuote on uuselintarvike eli sitä ei ole käytetty elintarvikkeena aiemmin, joten sen vaikutuksista ihmiselimestössä ei ole kokemusta. Euroopan elintarviketurvallisuusvirasto (EFSA) on uudistanut uuselintarvikkeita koskevaa lainsäädäntöä vuoden 2018 alusta. Lainsäädännön uuselintarvikkeilta vaatimat testit ovat kattavat ja pitävät huolen, että uudet tuotteet ovat turvallisia ennen niiden kaupallista hyväksyntää. Lainsäädännön olemassaolo poistaa myös epätietoisuutta uusien tuotteiden hyväksyttävyydeltä ja on siten yrityksen ja sijoittajien näkökulmasta hyvä asia.

## **Toimenpide-ehdotukset**

Solar Foods Oy:n näkökulmasta lainsäädäntö on kunnossa. Tärkein on eurooppalainen uuselintarvikelainsäädäntö. Tämän osalta muutostarpeita ei ole. Tosin on oletettavaa, että kyseinen lainsäädäntö vielä elää ja tarkentuu, nyt kun uusia tuotteita menee läpi testausprosessin.

Solar Foods Oy:n käyttämä organismi ei ole geneettisesti muokattu, mutta vaikka olisikin, elintarviketurvallisuuden kannalta asialla ei ole merkitystä, sillä sekä muokatut että muokkaamattomat uuselintarvikkeet on testattava ennen kaupallista hyväksyntää. Solar Foods Oy:n tuotantoprosessi on suljettu eikä tuotteessa ole eläviä organismeja.

Julkisen mielipiteen kannalta asia on toinen. Geneettisesti muokattujen organismien kohdalla elintarvikkeissa on edelleen hyvin avoin ja vallalla on paljon tunteisiin perustuvia mielipiteitä testatun ja tutkitun tiedon sijaan. Toivoisin, että geneettisesti muokattujen organismien käyttö elintarvikkeissa tulee helpommaksi uuselintarvikelainsäädännön vaatimien testauksen kautta. Paras keino on testata turvallisuus ja perustaa päätökset elintarvikkeeksi hyväksymisestä testituloksiin. Euroopassa EFSA:n rooli tässä on tietysti keskeisin, ja sitä pitää myös korostaa.



Mitä tulee start-up-yritystoimintaan, niin tukisin edelleen vahvasti sitä, että tutkimustuloksia sekä yliopistoista että tutkimuslaitoksista saataisiin kaupallistettua mahdollisimman voimallisesti. Nyt vallalla oleva suuntaus on tietysti hyvä, mutta ehkä sitä pitäisi edelleen vahvistaa. Huomattavaa on myös eri tutkimusorganisaatioiden erilaiset linjaukset siitä, miten tutkimustuloksia pyritään kaupallistamaan. Esimerkkinä vaikkapa tehdyn tutkimustyön arvon määrittely: pyritäänkö saamaan heti takaisin vuosien aikana työhön sijoitettu rahoitus jolloin hinta voi olla miljoonia uudelle yritykselle vai määritelläänkö hinta ennemmin perustuen siihen, mikä arvo markkinoilla voisi olla. Ensin mainitussa tilanteessa yritykset jäävät usein perustamatta. Ratkaisuna olisi houkutellessa sijoitusmaailman ammattilaisia tutkimusorganisaatioiden tutkimustuloksia kaupallistaviin yksiköihin, vaikka tulospalkkauksella.

## 7. Bioetiikan näkökulma: Geeniteknologiavaltuutettu varmistaisi kansalaisten edun

---

Heikki Saxén, TaY ja Lapin yliopisto

### Mistä on kyse?

Geeniteknologia harppoo parhaillaan voimakkaasti eteenpäin muodostaen haasteen soveltaa uutta tiedettä ja teknologiaa inhimillisesti ja yhteiskunnallisesti kestäväällä tavalla. Tämä aihepiiri on tämän artikkelin yleisenä teemana.

Geeniteknologia jakautuu moneen eri sarkaan ja on tärkeää erottaa eri osa-alueet toisistaan. Usein haasteena asiakokonaisuuden käsittelyssä on se, että geeniteknologian eri ala-teemoja käsitellään kaikkia kerralla ja ne sekoitetaan toisiinsa. Esimerkiksi geenimuokkauksen teemat ovat radikaalisti erilaisia kuin vaikkapa geenitutkimukseen näytteiden antaneiden henkilöiden tietosuojan haasteet. On yhä tärkeää erottaa eri teemoja koskeva ajankohtaisuus: geenimuokkaus on vasta lapsenkengissä ja siihen liittyvät inhimilliset ja yhteiskunnalliset haasteet siintävät vasta pidemmällä tulevaisuudessa. Geenitutkimuksen tietosuojan kysymykset ovat puolestaan polttavia jo nyt, kun parhaillaan suomalaisilta kerätään ja modernisoidaan biopankkeihin mittavia näytekokoelmia geenitutkimuksen tekemiseksi. Tähän työhön liittyen säädetään myös parhaillaan ajankohtaista lainsäädäntöä sekä rakennetaan merkittävää tuki-infrastruktuuria.

Keskityn tässä artikkelissa nimenomaan geenitutkimuksen tietosuojaan ja sitä lähellä oleviin kysymyksiin aiheen ajankohtaisuuden vuoksi. Suomessa tehdään juuri nyt tällä saralla merkittäviä yhteiskunnallisia päätöksiä ja linjauksia, jotka vaikuttavat pitkälle tulevaisuuteen. Toisin sanoen nyt on korkea aika tiedostaa aihepiiri ja siinä tehtyjen valintojen kauaskantoiset seuraukset. Toistaiseksi tilanne on nähdäkseni ollut teemassa tehtyjen julkisten päätösten ja linjausten sekä niiden valmistelun ja niistä käydyn julkisen keskustelun osalta selkeästi puutteellinen kansalaisten ja yhteiskunnan edun näkökulmasta katsottuna. Ratkaisuna tämän puutteen korjaamiseksi ehdotan lopuksi geeniteknologiavaltuutetun tai jonkin muun vastaavan toimielimen perustamista.

### Nykytila

Geenitutkimuksen tietosuojan haasteiden ymmärtämiseksi on käännettävä katse hetkeksi siihen, millaisia geenitutkimuksen tukirakenteita, niin lainsäädännössä kuin muuten, on

Suomeen viime vuosina rakennettu (seuraava kuvaus ja sitä seuraava arviointi ovat osittain mukaelma Lääkärilehdessä 9.2.2018 ilmestyneestä pääkirjoituksestani<sup>1</sup>):

Virstanpylväs oli vuonna 2013 voimaan tullut biopankkilaki, jonka myötä toimintansa ovat käynnistäneet lukuisat suomalaiset biopankit (biopankkilain suhteen on valmisteilla parhaillaan kokonaisuudistus). Biopankkien tarkoitus on ollut edistää lääketieteellistä tutkimusta yhdistämällä vanhat näytekokoelmat, keräämällä uusia näytteitä sekä tarjoamalla keskitettyä ja modernia kokoelmien hallintaa.

Tukirakenteet eivät rajoitu ainoastaan biopankkeihin, sillä parhaillaan valmisteilla on muun muassa genomilaki, joka tähtää erityisesti geenitiedon ja arjen terveydenhuollon yhteyden vahvistamiseen. Lisäksi valmisteilla ovat koordinaatiotyötä tekevä genomikeskus sekä aktiivisesti etenevä lainsäädännöllinen hanke: sotetiedon toissijaisen käytön lakialoite, joka tarjoaisi mahdollisuuden geenitiedon hyödyntämiseen muussakin kuin sen keruun alkuperäisessä käyttötarkoituksessa, esimerkiksi geenitiedon myymiseen yritysten tutkimus- ja innovaatiotoimintaan (1).

Asioissa edetään vauhdikkaasti. Eetoksena on ollut suomalaisten tietokantojen ja henkilötietojen laadukkuus ja toisaalta omalaatuinen kansallinen geeniperimä, jotka yhdessä tarjoavat kiinnostavia mahdollisuuksia erityisesti kansainvälisille tahoille, kuten lääkeyhtiöille, tutkimus- ja kehitystoimintaan. Toiveena on voittaa kansainvälisessä kilpajuoksussa muut maat ja tehdä toiminnasta suomalainen lippulaiva (2).

## **Teknologian arviointia**

Ilmassa on siis paljon lupaavia mahdollisuuksia. Kuitenkin ongelma vallitsevassa tilanteessa on se, että on vaikea nähdä, että juhlapuheista ja vakuutteluista huolimatta uuden aikakauden arkkitehdit olisivat suunnittelemassa asioita välttämättä kansalaisten etu ensisijaisesti mielessään. Jo biopankkilain säätämisen aikaan kritiikkiä kansalaisen näkökulmasta katsottuna herätti erityisesti vanhojen näytekokoelmien yhdistäminen biopankkeihin varsin kevyen menettelyn kautta (3). Käytännössä monet eivät ole edes tietoisia näytteidensä siirtymisestä biopankkeihin. Kritiikkiä esittivät aikanaan esimerkiksi bioetiikan tutkijat, jotka sivuutettiin valmistelusta lähes johdonmukaisesti.

Mainittakoon myös, että parhaillaan biopankkilakiin kaavaillaan muutosta, jonka myötä ”hoidon yhteydessä otetut näytteet olisivat lakiehdotuksen mukaan tutkimuskäytössä hyödynnettäviä näytteitä suoraan lain nojalla” (4). Toteutuessaan tämä muutos ymmärrettävästi yhä vahvistaisi tilannetta, jossa kansalaisten tietoisuus siitä, että heidän näytteensä ovat biopankissa, on suhteellisen vähäistä – asian merkityksellisyysnähtävien riittämättömyyden (5).

---

<sup>1</sup> <https://www.laakarilehti.fi/ajassa/paakirjoitukset-tiede/geenitutkimuksen-tukirakenteita-rakennetaan-lainsaadannossa/>.

Aiempi valmistelun linja on yleisesti ottaen jatkunut samana ja kriittiset äänet geenitietoon liittyvissä valmisteluhankkeissa ovat usein loistaneet poissaolollaan. Esimerkkinä mainittakoon sotetiedon toissijaisen käytön lakialoite, jonka myötä geenitietoa olisi mahdollista myydä eteenpäin vaikkapa yrityksille. Sosiaali- ja terveysministeriön valmisteluun on ulkopuolelta kohdistunut kritiikkiä ensinnäkin siihen, että tietojen myyminen eteenpäin ei ole usein lähellekään niiden alkuperäisen keruutarkoituksen henkistä. Kritiikkiä on herättänyt myös se, että kun geenitiedot luovutetaan eteenpäin anonymisoituna (ilman yksilöllisiä tunnistetietoja), on toisaalta ollut paikoin jopa helppoa liittää ne uudelleen luovuttajiinsa eri tietokantoja yhdistelemällä. Eräänä ilmeisenä esimerkkinä mainittakoon anonymiteetin säilyttämisen haaste silloin, kun kyseessä ovat harvinaissairaudet, joita löytyy vain harvalukuiselta joukolta kansalaisia (6).

Ymmärrettävästi väärissä käsissä herkäät geenitiedot ovat selvästi haitallista tietoa kansalaisten kannalta. Yksilöllinen geenitieto paljastaa yhä tarkemmin esimerkiksi henkilön ja hänen sukulaistensa riskejä sairastua vakaviin sairauksiin, mikä muodostaa merkittävän intressin työnantajien ja vakuutusyhtiöiden kaltaisille tahoille, niin Suomessa kuin ulkomaillakin, harjoittaa syrjintää (mitä voi pitää selkeästi haitallisena asiana riippumatta siitä, onko tämä syrjintä laitonta tai ei, eri tapauksissa ja ympäristöissä). Kritiikkiin on vastattu vakuuttelemalla, että kaikki on kunnossa ja että esimerkiksi tietosuoja geenitiedon anonymisoinnin suhteen on korkealuokkaista sen kummemmin kertomatta, miten ihmeessä tämä pystytään varmistamaan tiedon kanssa, joka jo luonteensa puolesta pitää sisällään selvän mahdollisuuden uudelleentunnistamiseen.

Summa summarum: niin loistavia mahdollisuuksia kuin geenitutkimus Suomelle tarjoaakin, on kansalaisten edun takaaminen – heidän suojaamisensa – oltava ensisijainen päämäärä, ainakin lainsäädännössä ja muussa julkisessa toiminnassa.

## **Islannin tien välttäminen**

Riskinä on yhä syytä tuoda esille, että asioissa seurataan yleisesti ottaen niin sanotusti Islannin tietä: toimitaan tässä uudessa ja yhä paljolti tuntemattomassa tematiikassa liian nopeasti ja liian sinisilmäisesti suurten lupauksen sokaisemana niin, että lopulta isot hankkeet päätyvät katastrofiin, kuten voidaan ajatella käyneen Islannissa (Seuraava kuvaus on muokattu viitteestä 3 eli Mediuutisten artikkelista):

Islannissa perustettiin suurella innostuksella vuonna 1998 biopankki yksityisen deCODE geneticsin toimesta ja maassa päätettiin antaa kansalaisten terveystiedot ja -näytteet tämän biopankin käyttöön. Kansalaiset saivat erikseen oikeuden kieltää tietojensa käytön ja säädettiin myös laki, että tiedot pysyvät Islannissa. Biopankki saavutti merkittävän kattavuuden väestötasolla.

Vuonna 2009 biopankki teki konkurssin ja sen aineistoista, periaatteessa edellä mainituin varauksin, tuli kansainvälistä kauppatavaraa. Biopankin omaisuus on sittemmin vaihtanut useaan kertaan omistajaa: tammikuussa 2010 se päättyi Saga Investmentsille, joulukuussa 2012 Amgenille ja lokakuussa 2013 NextCODE Healthille. Viime vuodet islantilaisien biopankkitiedot ovat olleet kiinalaisen WuXi Pharma Technin omaisuutta.

On ymmärrettävästi perusteltua kysyä, onko tällaisessa tilanteessa mahdollista taata islantilaisten tietosuojaa.

Todettakoon, että Suomessa ei todennäköisesti ole riskinä juuri samantyyppinen skenaario, mutta edellä kuvaamani valmistelun nopeus, yksipuolisuus ja vakuuttelu siitä, että riskit ovat käytännössä hyvin pieniä, tuovat silti mieleen Islannissa aikanaan käydyn keskustelun. Nykyisin Islannissa eletään kriisin jälkeistä uuden kriittisyyden aikakautta ja tilanne on poikkinut myös oikeusjuttuja. On toivottavaa, että Suomen ei tarvitse oppia tätä kautta geenitutkimuksen tietosuojan merkitystä ja asettaa alttiiksi samalla arvokasta kansalaisten suhteellisen korkeaa luottamusta tiedettä ja sen tekijöitä sekä näitä koskevaa lainsäädäntöä ja valvontaa kohtaan.

## Toimenpide-ehdotukset

Tässä aihepiirissä on kestävästi inhimillisen ja yhteiskunnallisen toiminnan vaalimisessa paljon tehtävää eri saroilla, mutta ottaen huomioon tulevaisuusvaliokunnan roolin ja nähdäkseni kaikista polttavimman haasteen, käänän katseeni geenitutkimuksen tukirakenteita koskevaan lainsäädäntö- ja muuhun julkiseen valmistelutyöhön. Laajasti ottaen valmistelutyön piiriin luen myös aiheita koskevan yleisen tietoisuuden herätteleminen kansalaisten parissa sekä laajasti eri yhteiskunnan tahojen osallistamisen.

Nähdäkseni tässä tematiikassa ministeriön ja muiden virallisten toimielinten työ jättää toislaiseksi selkeästi toivomisen varaa, siis sen suhteen, miten kansalaisten ääni ja etu on otettu huomioon. Toisaalta voi kysyä, onko tätä sarkaa edes mahdollista ottaa huomioon riittävästi nyt vallitsevassa tai edes suunnitellussa julkisessa toiminnan rakenteessa (esimerkiksi perusteilla olevassa genomikeskuksessa, joka on käytännössä pikemmin aiempien toimien jatke kuin aidosti uusi avaus). Mielestäni luontevin ratkaisumalli olisikin perustaa uusi toimielin, **geeniteknologiavaltuutettu** tai jokin muu vastaava riippumaton taho, joka ajaisi eteenpäin kansalaisten edun ja äänen näkökulmaa tällä saralla selkeästi erillisenä rakenteena.

Vertaisin tilannetta siihen, että esimerkiksi laajasta lasten oikeuksia ja asemaa koskevasta lainsäädännöstä ja valvonnasta huolimatta Suomessa on erillinen ja itsenäinen lapsiasiavaltuutettu, joka seuraa ja valvoo aihepiiriä ihmisoikeusnäkökulmasta sekä nostaa esille siinä nousevia keskeisiä teemoja yhteiskunnalliseen keskusteluun. Yhtä lailla Suomessa on muitakin valtuutettuja, kuten tietosuojavaltuutettu, joka lienee ennalta ajatellen nyt käsillä olevassa pyrkimyksessä luontevin ja jo olemassa oleva taho. Kuitenkin tietosuojavaltuutetun työnsä on jo nyt niin laaja ja kuormitettu sekä myös geenitutkimuksen tietosuojan, ylipäänsä geeniteknologian, teemat niin erityisiä ja laaja-alaisia, että ei ole nähdäkseni realistista odottaa, että tietosuojavaltuutettu voisi vastata myös tästä tematiikasta riittävällä tasolla.

Ehdotan siis, että perustetaan uusi, **selkeästi aiemmista toimijoista riippumaton** geeniteknologiavaltuutettu tai jokin muu vastaava toimielin, joka varmistaisi, että kansalaisten tietosuoja ja ylipäänsä etu toteutuvat ensisijaisesti geeniteknologiaan liittyvässä julkisessa

toiminnassa ja sääntelyssä. Yhä, kuten lausuntoni alussa totesin, ovat nimenomaan tietosuojan kysymykset geeniteknologian inhimillisesti ja yhteiskunnallisesti kestävästi soveltamisen keskiössä juuri nyt, mutta mentäessä pidemmälle tulevaisuuteen tulevat monet muutkin vastaavat kysymykset, esimerkiksi geenimuokkauksen suhteen, olemaan polttavia. Tämä seikka, tieteen nopea kehittyminen, tukee osaltaan argumenttia geeniteknologia-valtuutetun tai jonkin muun vastaavan toimielimen perustamiseksi.

## Lähteet

1: [http://stm.fi/artikkeli/-/asset\\_publisher/uusi-lupaviranomainen-sujuvoittaa-sosiaali-ja-terveystietojen-tietoturvallista-kayttoa](http://stm.fi/artikkeli/-/asset_publisher/uusi-lupaviranomainen-sujuvoittaa-sosiaali-ja-terveystietojen-tietoturvallista-kayttoa)

2: <https://www.rapport.fi/journalistit/jani-kaaro/biopankin-turvassa>

3: Aihe herättää yhä keskustelua, ks. esim. <https://www.medi uutiset.fi/uutiset/biopankkilaki-ei-ena-kelpaa/64123b9d-a547-3ac5-aeae-3c91b25e82e2>

4: [http://stm.fi/artikkeli/-/asset\\_publisher/esitys-biopankkilain-kokonaisuudistukseksi-lausunnoille](http://stm.fi/artikkeli/-/asset_publisher/esitys-biopankkilain-kokonaisuudistukseksi-lausunnoille)

5: <http://www.tietosuoja.fi/fi/index/ratkaisut/tietosuojavaaltuutetunlausuntojajaaloitteita/lausunto-biopankkilainkokonaisuudistuksesta.html>

6: Ks. esim. <https://www.laakarilehti.fi/ajassa/paakirjoitukset/toissijaisen-tiedon-arvo-saattaa-yllattaa/> ; <https://www.innokyla.fi/documents/1598478/cc55e9a1-e7be-44d0-9cb9-ed54fc4a52d2> ; <https://www.hs.fi/mielipide/art-2000005451829.html?share=4e1ef8042822315591fc6fcb790363ba> ;

<https://suomenkuvalehti.fi/jutut/tiede/tekoaly-hahmotti-geenien-pohjalta-kasvonpiirteita-tunnisti-henkiloita-anonymista-genomiaineistosta/?shared=984775-f45ecf38-999>



# EDUSKUNTA RIKSDAGEN

ISBN 978-951-53-3675-0 (NID.) • ISBN 978-951-53-3676-7 (PDF)  
ISSN 2342-6594 (PAINETTU) • ISSN 2342-6608 (VERKKOJULKAISU)