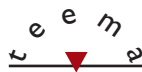


Jouni Mikola

Bio- ja geenitekniikan mahdollisuuksista metsäpuiden jalostuksessa



Johdanto

Metsäpuiden jalostus on varsin uutta toimintaa maa- ja puutarhatalouden kasvinjalostukseen ja kotieläinten jalostukseen verrattuna. Metsänjalostuksessa käytettävät menetelmät ja periaatteet ovat kuitenkin pääpiirtein samoja kuin muussakin perinteisessä jalostuksessa. Metsänjalostuksen tärkein erityispiirre ja suurin ongelma kaikkeen muuhun kasvin- ja eläinjalostukseen verrattuna on puiden pitkäikäisyys. Se ei rajoita jalostuksen etenemistä vain pitkän sukupolven välin muodossa, vaan enemmänkin puiden taloudellisesti tärkeiden ominaisuuksien esiin saamiseen tarvittavien pitkien testausaikojen takia. Lisäksi jalostuksen todennettujen tulosten käytäntöön siirtäminen on hidasta. Se perustuu kaikkialla maailmassa edelleen pääosin perinteiseen siemenviljelytekniikkaan, johon liittyy aina väistämätön ”jalostusviive” viljelysten perustamisesta kaupallisesti merkittävän siementuotannon alkamiseen. Lopulta puiden pitkistä kiertoajoista johtuen metsänjalostuksen tuloksia päästään käytännössä hyödyntämään vasta vuosikymmenien kuluttua uuden ”jalosteen” siemen- ja taimituotannon alkamisesta.

Biotieteiden räjähdysmäinen kehitys 1950-luvulla tapahtuneesta geenin molekyyliarakenteen keksimisestä ja sitä seuranneesta geneettisen koodin selvittämisestä lähtien on luonut valtavan uuden keinovalikoiman kasvin- ja eläintuotannon sekä monien teollisten prosessien tehostamiselle. Esimerkik-

si geeninsiirrot ovat tulleet jo laajaan käyttöön maatalous- ja puutarhakasvien jalostuksessa ja viljelyssä, vaikka yleinen epävarmuus uusilla teknologioilla nopeasti aikaansaatuja uudenlaisten eliöiden mahdollisista haittavaikutuksista ihmiselle ja muulle luonnolle on monella tavoin hillinnyt tätä kehitystä.

Moderni bio- ja geenitekniikka tarjoaa erittäin suuria lupauksia metsänjalostuksen nopeuttamiseen ja täsmentämiseen. Metsäpuut ovat kuitenkin laahanneet selvästi jäljessä muiden tuotantokasvien tutkimuksesta ja sovelluksista. Tärkein syy lienee metsätaloustuotannon pitkä aikajänne, vaikka juuri sitä uusilla tekniikoilla pyrittäisiinkin lyhentämään. Hyötyjen realisoituminen vasta kaukaisessa tulevaisuudessa on rajoittanut varsinkin yksityisen sektorin mahdollisuuksia ja kiinnostusta investoida resursseja puiden tuotanto-ominaisuuksien parantamiseen. Lisäksi puuvartisten kasvit tunnetaan kaikenlaisen bio- ja geenitekniikan käsittelyn kannalta yleensä vaikeammiksi kohteiksi kuin ruohovartisten vilja- ja vihanneskasvit. Havupuut ovat tässä suhteessa erityisen hankalia, ehkä vaikein ja vähiten tunnettu ryhmä ihmisen hyödyntämistä eliöistä.

Metsäpuilla viljelyaineiston geneettisen kokoonpanon muokkaamista rajoittaa edelleen se, että ihminen ei koskaan voi muuttaa ja säädellä niiden elinympäristöä samassa mitassa kuin pelto- ja puutarhakasveilla tai kotieläimillä. Metsäpuut ovat viljelykasveinakin vielä paljolti luonnonkasveja ja erittäin monimutkaisten, lukemattomien vuorovaikutuksiltaan heikosti tunnettujen kasvi-, eläin- ja pieneliö-

lajien muodostamien ekosysteemien jäseniä. On täysi syy pelätä, että suuret ja äkilliset muutokset puiden elintoiminnoissa voivat järkyttää metsäekosysteemien herkkää luontaista tasapainoa arvaamattomin seurauksin.

Kaikesta huolimatta metsäpuiden bio- ja geenitekniinen tutkimus on ollut viime aikoina erittäin viereä niin Suomessa kuin muuallakin maailmassa. Käytännön sovelluksiin asti uudet tekniikat eivät kuitenkaan ole vielä juuri missään johtaneet – ehkä jalostus- ja viljelytaimiaineiston mikrolisäystä lukuun ottamatta.

Moderneista biotieteistä ei ilmeisesti kannata odottaa mitään nopeaa ja käänteentekevää ratkaisua metsätalouden ja metsänjalostuksen ongelmiin. Vaikka lupaavia uusia teknologioita jalostuksen nopeuttamiseksi ja täsmentämiseksi näyttäisi jo olevan metsänjalostajan käden ulottuvilla, niiden hyväksikäytön tiellä on vielä monia vakavia esteitä. Geenitekniikan ympärille rakennettu turvajärjestelmä on erityisen raskas metsäpuilla, ja se rajoittaa suuresti soveltavan tutkimuksen mahdollisuuksia. Mm. suuri osa metsäteollisuudesta on, ainakin toistaiseksi, sanoutunut irti kaikesta siirtogeneisten puiden hyödyntämisestä omassa metsätaloustoiminnassaan.

Bio- ja geenitekniikan hyväksikäytön mahdollisuudet metsänjalostuksessa

Seuraavassa tarkastellaan lähemmin bio- ja geenitekniikan tutkimuksen ja sovellusten nykytilannetta ja kehitysnäkymiä käytännön metsänjalostuksen näkökulmasta: mitä sovelluksia on jo käytettävissä, mistä tekniikoista voidaan odottaa sovellusmahdollisuuksien parannuksia tai aivan uusia sovelluksia lähivuosikymmeninä (10–20 vuoden kuluessa) ja mitä voidaan odottaa ja toivoa kaukaisemmassa tulevaisuudessa? Varsinkin kaukaisemman tulevaisuuden toiveet perustuvat luonnollisesti sille olettamukselle, että metsäpuiden bio- ja geenitekniinen tutkimus jatkuu tulevina vuosikymmeninä vähintään yhtä intensiivisenä ja tuloksellisenä kuin 1980- ja 90-luvuilla.

Uusien tekniikoiden metsätaloudellista hyödyntämistä ajatellen niiden *sovellettavuus käytännön metsänjalostuksessa* on kaiken A ja O. (Tässä kirjoituksessa ei puututa metsäteollisuuden prosessitekniik-

kaan, missä bioteknisillä menetelmillä on jo laajaja sovelluksia ja suuri taloudellinen merkitys.) Jalostussovelluksissa taloudelliset syyt nousevat yleensä ensimmäiseksi esteeksi: paineet metsänviljelyn ja puuntuotannon kustannusten alentamiseksi ovat viime aikoina voimistuneet, ja uudet tekniikat saattavat osoittautua liian kalliiksi metsänviljelyaineiston kehittämisessä ja tuottamisessa. Myös tutkimukseen kohdistuvat hallinnolliset rajoitukset saattavat hidastaa alan kehitystä ja viivästyttää käytännön sovelluksia. Toistaiseksi esim. geenitekniikan käyttö jalostussovelluksiin on täysin mahdotonta, siirtogeneisten puiden kenttäkoetoimintaan liittyvien ankarien rajoitusten takia. Uusien tekniikoiden tehokas hyödyntäminen saattaakin olla paljon kauempana tulevaisuudessa kuin mitä tutkimuksen mahdollisuudet taloudellisesti ja ekologisesti hyödyllisten ja riskittömien sovellusten kehittämiseen edellyttäisivät.

Välittömät sovellukset

Tutkimuksen nykytilanteen pohjalta monet bio- ja geenitekniikan menetelmät olisivat jo valmiita laajamittaisiin käytännön sovelluksiin. Monet sovellukset ovat kuitenkin pysähtyneet uusien tekniikoiden kustannuksiin, ja yleensä siirtyminen tutkimusmittakaavasta käytännön toimintaan edellyttäisi teknisten menetelmien huomattavaa tehostamista.

Tekniikoiden kehittäminen kaupallista tuotantoa ajatellen ei useinkaan kiinnosta alan perustutkimusta tekeviä laitoksia ja laboratorioita. Niille riittää yleensä menetelmien tarkka ja varma hallinta hyvin pienessä mittakaavassa. Laajempien, taloudellisesti kannattavien sovellusten kehittäminen edellyttää kaupallisten toimijoiden osallistumista. Kynnys tutkimukseen ja tuotantotoimintaan soveltuvien bioteknisten menetelmien välillä on kuitenkin usein hyvin korkea. Viime aikoina onkin ollut selvästi havaittavissa, että metsäpuiden bio- ja geenitekniisen tutkimuksen ja käytännön sovellusten välinen kuilu on kasvamassa.

Seuraavassa tarkastellaan lupaavimpien uusien menetelmien nykyisiä käyttömahdollisuuksia metsänjalostuksen apukeinoina sekä niihin edelleen liittyviä puutteita ja kehittämistarpeita.

Biotekniikan sovellukset

Biotekninen solukkoviljelyyn perustuva mikrolisäys on kasvullisena monistusmenetelmänä avannut uusia näköaloja erityisesti koivun ja haavan jalostuksessa. Menetelmä soveltuu hyvin näiden puulajien (ja muidenkin lehtipuiden) jalostusaineistojen monistamiseen, ts. testausmateriaalin ja siemenviljelys- sekä säilytysaineistojen tuottamiseen. Koivuilla tosin testausaineistot pystytään tuottamaan nopeasti ja helposti myös suvullista tietä, joten mikrolisäyksen tarjoama etu on suhteellisen pieni. Sama koskee myös siemenviljelys- ja kokoelmapuiden tuottamista; perinteinen varttamismenetelmä on jalostuksen tarpeisiin täysin riittävä.

Mikrolisäystä on kokeiltu myös koivun ja haavan jalostetun aineiston taimituotantomenetelmänä, mutta toiminta on hiipunut kolme–nelinkertaisiin tuotantokustannuksiin perinteiseen sementaituotantoon verrattuna. Haavalla perinteisempi juurenkappaleista lähtevä pistokastaimituotanto on osoittautunut edullisemmaksi. Koivulla taas siemenen massatuotannon helppous ja kontrolloitavuus vähentää tarvetta mikrolisäyksen käyttöönottoon. Solukkoviljelyyn perustuvan mikrolisäyksen laboratoriovaihe on väistämättä hyvin käsityövaltainen, ja sen jälkeen taimituotanto jatkuu kasvatusvaiheella, joka vastaa läheisesti perinteisen sementaimikasvatuksen koko tuotantoketjua. Menetelmän huomattava kehittäminen olisi siten tarpeen kaupallista taimituotantoa ajatellen, mutta näköpiirissä ei ole mitään selviä ratkaisuja mikrolisäyksen tehostamiseksi nykyisestäään.

Havupuillakin solukkoviljelyyn perustuva mikrolisäys on teknisesti mahdollista, mutta vain hyvin nuorta lähtömateriaalia käytettäessä. Lisäksi monistusteho on niin heikko, että sille on vaikeaa nähdä mitään käytännöllisiä sovelluksia. Männyllä on mikrolisäyksen yhteydessä aikaansaatu hyvin suurta kukinnan aikaistumista, mutta tälle on vaikeaa hahmottaa mitään välittömiä sovelluksia käytännön jalostusohjelmissa.

Kasvullinen monistus niin kuusella kuin männylläkin onnistuu toistaiseksi paljon paremmin perinteisin varttamis- ja pistokaslisäysmenetelmin kuin bioteknisen mikrolisäyksen avulla. Männyllä versopistokkaiden juurtumista on saatu jonkin verran parannettua bioteknisiin menetelmin (Agrobakteerinfektion tai sienijuuriympäysten avulla), mutta

kasvullinen lisäys on edelleen niin vaikeaa ja epävarmaa, että edes testausta ei voida suunnitella sen varaan. Kuusella sensijaan nuoren siementaimiaineiston pistokaslisäys onnistuu suhteellisen helposti ja luotettavasti. Ongelmana on lähinnä vain kloonien fysiologinen vanheneminen; tähän biotekniikka ei ole toistaiseksi voinut havupuilla tarjota mitään merkittävää apua (toisin kuin monilla lehtipuilla).

Somaattisten, kasvullisten alkioiden tuotantotekniikan kehittämisessä on tutkimuslaitoksissa edistytty nopeasti, varsinkin kuusella ja viime aikoina myös männyllä. Sovellusmahdollisuudet näyttävät pitkällä aikavälillä suurilta, mutta toistaiseksi niitä rajoittavat aikaansaatuun alkioiden regeneroinnin epävarmuus sekä se, että alkioita tuottavia solukoita saadaan vain hyvin nuoresta lähtöaineistosta.

Kryopreservatio (tuotettavan materiaalin syväjäädytys) yhdessä somaattisen alkioituotannon kanssa saattaisi jo nykyisellään olla sovellettavissa kuusen kloonijalostukseen. Sen avulla voitaisiin kiertää kuusikloonien fysiologisen vanhenemisen ongelmat testausvaiheessa, ts. testattuja ja hyviksi todettuja klooneja voitaisiin ryhtyä massamonistamaan syväjäädytyksessä nuorina pidetyistä solulinjoista perinteistä pistokaslisäystekniikkaa käyttäen. Kryopreservatio saattaisi ainakin koivuilla sopia myös jalostusaineistojen pitkäaikaisen säilytyksen menetelmäksi. Sellaisena se voisi vähentää merkittävästi työlää ja kalliin perinteisen kloonikokoelmatoiminnan tarvetta (toistaiseksi lähinnä vain lehtipuilla).

Geenitekniikan sovellukset

Merkkigeenitekniikat tarjoavat metsäpuiden jalostukselle ja jalostetun aineiston tuotannolle tehokkaita keinoja puuyksilöiden tunnistamiseen, ts. jalostuksessa ja tuotannossa käytettävien yksilöaineistojen oikeellisuuden ja puhtauden kontrollointiin. Jalostuksen etenemisen kannalta on tärkeää, että esimerkiksi risteytyksiin käytettävien puiden ja myös niiden jälkeläisten identiteetti tarkastetaan, niin että emot ja isät ovat varmasti juuri niitä klooneja jotka jatko-toimenpiteisiin on testaustulosten perusteella valittu. Samoin tuotantotoiminnan valvonnassa tarvitaan menetelmiä, joilla voidaan kontrolloida mistä geeniteisestä aineistosta taimet ovat peräisin.

Merkkigeeniteknikat ovat olleet Suomessakin käytössä jalostustoiminnassa ja osin myös taimituotannon ja -kaupan valvonnassa 1980-luvulta lähtien. Aluksi käytettiin lähinnä ns. isoentsyymitekniikkaa, mutta sittemmin ollaan siirrytty suoraan perintöaineuksen erilaisuuksista todettavien DNA-merkkien käyttöön.

Geenikartoitus yhdessä merkkigeeniteknikoiden kehityksen kanssa on avannut erittäin suuria toiveita metsäpuiden valintajalostuksen tehostamiselle. Riittävän tiheän geenikartoituksen avulla voidaan etsiä vaikeasti jalostettavia kvantitatiivisia ominaisuuksia sääteleviin geenilokuksiin ja -alleeleihin kytkeytyneitä merkkigenejä, ja kohdistamalla valinta näihin 'markkereihin' voidaan itse ominaisuuden valintaa nopeuttaa ja tehostaa.

'*Markkeriavusteista*' valintaa ei liene vielä sovellettu missään käytännön jalostusohjelmassa, mutta menetelmän toimivuus on osoitettu monissa tutkimuksissa. Sen ottaminen laajaan käyttöön valintatyössä edellyttää vielä paljon geenikartoituksen tarkentumista sekä merkkigeenien ja kvantitatiivisten ominaisuuksien välisten kytkentöjen etsimistä. Varsinkin geenikartoitus etenee kuitenkin nopeasti kaikilla pääpuulajeillamme, ja siinä voidaan käyttää hyväksi myös lähisukuisilla lajeilla maailmanlaajuisesti tehtävää intensiivistä tutkimustyötä.

Geeniteknikoiden laajimpina tähänastisina soveluksina käytännön metsänjalostukseen voitaneen pitää Stora Enson Portugalissa ja Brasiliassa toteuttamaa Eucalyptusten "markkeriavusteista" diversityjalostusta. Merkkigeeniteknikoiden avulla jalostusaineistoista on etsitty mahdollisimman paljon toisistaan geneettisesti poikkeavia, mahdollisimman vähän keskenään sukua olevia puuyksilöitä. Näitä risteyttämällä on jonkinlaisena "heteroosiefektinä" saatu aikaan voimakas kasvun lisäys, ja jälkeläistöistä on edelleen voitu perinteisin testausmenetelmän valita parhaat kloonit tuotannolliseen massamoonistukseen. Samaa menettelyä kannattaisi varmaan kokeilla meilläkin, lähinnä puulajeilla joiden risteytystuloksia voidaan parhaiten monistaa käytännön viljelyyn (koivu, haapa, kuusi). Tämä menetelmä on mielenkiintoinen esimerkki modernin geeniteknikan "ristiriidattomasta" sovelluksesta, jossa itse lopputulokseen ei sisälly minkäänlaista keinotekoisia geneettistä manipulaatiota. Geeniteknikkaa käytetään vain jalostusaineiston valintaan, mutta itse ja-

lostus tapahtuu täysin perinteisin menetelmin.

Geeninsiirtotekniikat ovat kehittyneet metsäpuilla lähes samaan tahtiin kasvien geeniteknikan tutkimuksen eturintaman kanssa. Tutkimuksen työvälineinä geeninsiirrot hallitaan jo varsin hyvin kaikilla pääpuulajeillamme. Tämä merkitsee kuitenkin vain sitä, että vieraita genejä pystytään, jopa usein eri menetelmin, siirtämään toimintakykyisinä puiden elävien solujen sisään. Käytännön sovellukset ovat aivan eri asia, ja mitään sellaisia ei vielä pitkään aikaan ole jalostajien saatavilla. Sovellusten tämän hetken esteistä todettakoon vain, että geeniteknikan turvamääräysten takia geeninsiirtojen onnistumisen, pysyvyyden ja vaikutusten pitkäaikainen seuranta ei ole toistaiseksi mahdollista edes perustutkimuksen tasolla.

Vaikka geenitekniinen tutkimus metsäpuilla rajoittuu toistaiseksi laboratorioiden suljettuihin tiloihin ja hyvin lyhytaikaisiin tarkoin valvottuihin kenttäkokeisiin ja kohdistuu paljolti metsätalouden ja -jalostuksen kannalta merkityksellisiin geeneihin ja ominaisuuksiin, sen myötä saatavalla, jatkuvasti tarkentuvalla tiedolla yksittäisten geenien toiminnasta ja säätelystä voi olla monenlaista hyötyä perinteisen metsänjalostuksen tulevassa kehittämisessä. Geenitekniikan tärkein anti jalostukselle tähän mennessä ja ehkä tulevaisuudessaakin on perustiedon lisääntymisessä puissa molekyyllitasolla tapahtuvista biokemiallisista prosesseista ja niiden geneettisestä ohjauksesta.

Bio- ja geenitekniikan potentiaaliset lähiaikojen sovellukset metsänjalostuksessa – metsänjalostuksen tärkeimmät toiveet ja odotukset

Jos metsäpuiden bio- ja geenitekniinen tutkimus jatkuu lähivuosikymmeninä yhtä voimakkaana kuin viimeisten 10–15 vuoden aikana, siltä voidaan lähimpien 10–20 vuoden aikana odottaa monia arvokkaita sovelluksia metsänjalostukseen. Monista tekniikoista, joita tutkimuslaboratorioissa jo rutiininomaisesti käytetään, voidaan suhteellisen vähäisellä kehittämisellä saada tehokkaita uusia työkaluja käytännön jalostukselle. Seuraavassa tarkastellaan näitä jalostuksen kannalta tärkeitä ja lupaavia, lähes "käden ulottuvilla" olevia sovelluksia ja niihin vielä kaivattavia parannuksia.

Biotekniikan mahdollisuudet

Kasvullisen lisäyksen alalla tärkeimmät toiveet liittyvät havupuiden kasvullisten alkioiden tuottamiseen. Siitä voidaan odottaa kuusen tehokkaan kloonijalostuksen mahdollistavaa rutiinimenetelmää yhdessä kryopreservaation kanssa ja päänavausta myös männyn kloonitestaukselle ja risteytysiemenerien kasvulliselle massamonistukselle. Menetelmään liittyvä mahdollisuus ”tekosiemenen” tuottamiseen avaa lupaavia näkymiä kasvullisen monistuksen automatisointiin ja tehostamiseen organogeneesiin perustuvaan mikrolisäykseen verrattuna. Tältä kannalta sen kehittämismahdollisuuksien tutkiminen olisi tärkeää myös lehtipuilla. Kaikilla puulajeilla kasvullisen lisäyksen kehittämisen tavoitteeksi tulisi asettaa testattujen kloonien tai risteytysperheiden kaupallisen massamonistuksen mahdollistavat menetelmät.

Havupuiden somaattisen embryogeneesin tutkimuksessa olisi tärkeää varmistaa menetelmän toimivuutta lisäävän solukon genotyypistä riippumatta, kehittää varmat keinot somaattisten alkioiden regeneroimiseksi uusiksi taimyksilöiksi ja kapseloimiseksi ”tekosiemeniksi” siten että niiden jatkokasvatus voisi tapahtua pääpiirtein normaalin siementaimikasvatuksen tapaan, ja lopuksi löytää keinoja alkiota tuottavien solukkoviljelmien aikaansaamiseksi varttuneista (testatuista) puuyksilöistä. Varsinkin viimeksimainittu tavoite saattaa jäädä toiveajatteluksi vielä lähimpien 10–20 aikana. Muilta osin esitetyt toiveet ovat todellisia haasteita lähiaikojen biotekniselle tutkimukselle, sillä niiden toteutuminen on ilmeisesti ehdoton edellytys kaikelle geeninsiirtojen hyväksikäytölle havupuiden jalostuksessa.

Geeninsiirtojen tehokas soveltaminen jalostukseen ja eräät biotekniikan sovellukset (solufuusio t. -hybridisaatio) edellyttäisivät solutasolta lähtevien *in vitro*-lisäysmenetelmien hallintaa. Somaattisen embryogeneesin ohella tulisi ainakin lehtipuilla tutkia ja kehittää myös protoplasti- ja haploidiviljelytekniikoita.

Geenitekniikan mahdollisuudet

Geenikartoituksen ja muun genomitutkimuksen edistymisen myötä voidaan odottaa, että markkeriavusteista valintaa voidaan ryhtyä soveltamaan käytännön metsänjalostuksessa kenttätestausta keventävänä apukeinona. Menetelmän ensimmäiset sovellusalueet olisivat ehkä männyn ilmastokestävyyden sekä eri puulajien puuaineen ominaisuuksien (ligninien pitoisuus ja rakenne, lahonkestävyys) valinnassa. Markkeriavusteinen valinta ei suinkaan poistaisi nykyisenlaisen kenttäkoetestauksen tarvetta, mutta se saattaisi aineistojen esikarsintamenetelmänä suuresti vähentää kenttätestauksen työmääriä ja pintaaloja, tai vaihtoehtoisesti kasvattaa valinta-aineiston määrää ja valinnan intensiteettiä.

Geenikartoituksen edistymisen myötä tieto puulajien geneeistä lisääntyy nopeasti. Tehokkaita tekniikoita puiden omien geenien tunnistamiseksi, eristämiseksi, kloonamiseksi ja muokkaamiseksi geeninsiirtoihin sopiviksi on jo käytettävissä. Geeninsiirtotekniikan käytännön sovelluksia ajatellen kaivattaisiin kuitenkin vielä paljon lisää tietoa puiden genomeista sekä tarkempia ja tehokkaampia geenien tunnistamis- ja siirtotekniikoita. Lähimpänä toiveena siirtogeenisten puiden jalostuskäyttöä ajatellen olisi ehkä geenikartoitusten ja genomitutkimusten jatkaminen sekä geenitekniikan kaikkien menetelmien kehittäminen sille tasolle, että puulajien omien geenien tarkka ja monipuolinen tunnistaminen ja siirtäminen tulee mahdolliseksi.

Geeninsiirtojen lähiaikojen hyödyntämismahdollisuudet metsänjalostuksessa näyttävät vähäisiltä. Toistaiseksi geeninsiirtokokeiluihin on käytetty aivan muista eliöistä, lähinnä bakteereista eristettyjä, rakenteeltaan ja toiminnaltaan varsin tarkoin tunnettuja geenejä, jotka eivät kuitenkaan metsänjalostuksen kannalta ole mitenkään erityisen hyödyllisiä. Metsänjalostuksella ei ainakaan Suomessa ole myöskään mitään akuutteja ongelmia, joihin geeninsiirtotekniikasta toivottaisiin pikaista apua. Pitemmän päälle olisi tietenkin toivottavaa, että metsänjalostukseen saataisiin tehokkaita keinoja yksittäisten uusien ominaisuuksien nopeaan mukaanottamiseen ja lisäämiseen jalostusaineistoissa. Toisin sanoen kaivataan keinoja, jotka tehokkaasti korvaisivat kasvin- ja eläinjalostuksen perinteisen takaisinristeytysmenetelmän, jonka soveltaminen pitkäikäi-

siin metsäpuihin on käytännössä ollut lähes mahdollonta.

Geeniinsiirtotekniikat hallitaan jo kaikilla puulajeilla siinä määrin, että siirtogeenisiä puita voitaisiin periaatteessa tuottaa metsänjalostuksessa hyödynnettäviksi. Suurimmat ongelmat näyttävät keskittyvän siirtogeenisten solukoiden regenerointiin sekä siihen, millaisia geenejä siirtoihin voitaisiin käyttää. Varsinkin bakteeriperäisiin ”vieraisiin” siirtogeeneihin liittyvät epäilykset niiden toimintatavoista ja sivuvaikutuksista korkeampien kasvien genomien yhteydessä ovat johtaneet tiukkojen turvamääräysten luomiseen kaikelle geenitekniikalle. Vieraiden geenien luontoon leviämisen estämiseksi esim. siirtogeenisten metsäpuiden kenttätestaus on yleisesti rajoitettu hyvin lyhytaikaiseksi, jotta puut eivät ehtisi kukkia ja tuottaa siementä. Tämä rajoitus yksinäänkin estää toistaiseksi kaiken geeniteknisesti muunnellun aineiston kokeilun ja käytön muualla kuin tutkimuslaitosten suljetuissa laboratorioissa ja tarkoin valvotuissa lyhytaikaisissa kenttäkokeissa. Testausrajoitusten voidaan luonnollisesti odottaa lievenevän ja sovellusmahdollisuuksien laajenevan ajan myötä, sitä mukaa kun tieto siirtogeenien toiminnasta ja vaikutuksista sekä luontoon leviämisen riskeistä varmistuu. Tähän voi kuitenkin mennä vuosikymmeniä. Vapaampien testausmahdollisuuksien avauduttua tarvittaisiin metsäpuilla monissa tapauksissa vielä hyvin pitkäaikaisia kenttäkokeita siirtogeenien toimivuuden ja vaikutusten pysyvyyden varmistamiseksi, ennen kuin geeni-muunneltuja puita voitaisiin ryhtyä hyödyntämään edelleenjalostuksessa ja taimituotannossa.

Toistaiseksi geenitekniikkaa arvostellaan ja vastustetaan paljon lähinnä sen epätasällisyyteen ja mahdollisiin arvaamattomiin sivuvaikutuksiin vedoten. Onkin totta, että monien siirtogeenien vaikutus on tähänastisissa kokeiluissa vaihdellut eri puulajeilla ja yksilöissä, ilmeisesti paljolti sen mukaan miten siirtogeeni on sijoittunut isäntäyksilön genomiin tai millaiseen geneettiseen ympäristöön se on joutunut. Varsinkin kokeilujen alkuaikoina tieto siirtogeenien rakenteesta on saattanut olla puutteellista ja niiden mukana isäntäeliöön on saattanut siirtyä muuta, vaikutuksiltaan tuntematonta luovuttajaorganismien DNA:ta. Näissä suhteissa menetelmät ovat kuitenkin jatkuvasti tarkentumassa. Geenitekniikan tulevaisuuden sovelluksia sekä toiminnan yleistä hyväk-

syttävyyttä ajatellen olisi ehdottoman välttämätöntä kehittää geenitekniikoita edelleen tarkemmin kontrolloitavaan suuntaan.

Geenitekniikan tutkimusta kohtaan on toisaalta esiintynyt paljon jonkinlaista yli-innostusta, liiallisia lupauksia ja kohtuuttomia odotuksia. Tämä on saattanut vaikuttaa tutkimuksen suuntaamiseen ja rahoitukseen mm. perinteisen metsänjalostuksen ja jalostustutkimuksen kustannuksella. Soveltavan tutkimuksen voimavaroja on siirtynyt perustutkimukseen, jonka hyödyntämismahdollisuudet näyttävät hyvin kaukaisilta. Totuus metsätalouden osalta lieinee se, että geeniteknisesti muunneltua aineistoa ei tule ainakaan jalostus- ja viljelykäyttöön lähimpien kahden vuosikymmenen aikana.

Metsänjalostuksen kaukaisemmat toiveet ja haasteet bio- ja geenitekniikan tutkimukselle

Seuraavaan on koottu joitakin kasvibioteekniikan ja -geenitekniikan kaukaisempia lupauksia ja haasteita. Osasta bioteknisiä innovaatioita voisi helpostikin löytyä hyödyllisiä sovelluksia metsäpuiden jalostukselle, osa taas on pitemmän päälle lähes välttämättömiä edellytyksiä, jotta geenitekniikkaa koskaan voitaisiin tehokkaasti integroida käytännön metsänjalostukseen.

Biotekniikan haasteet

Kasvullisen monistuksen kehittäminen käytännön taimituotantoon sopivaksi edellyttää ilmeisesti menetelmiä, joissa in vitro -laboratoriovaihe on pitkälle automatisoitu. Ratkaisuja voidaan hakea erityisesti *somaattisen embryogeneesin ja tekosiemen-tekniikan* kehittämisestä.

Solutason protoplasti- tms. viljelytekniikat voisivat avata uusia mahdollisuuksia kasvullisen masamonistuksen automatisointiin sekä muiden bio- ja geenitekniikoiden sovelluksiin. Esim. haploidisolujen viljely ja solujen fuusiointi (somaattinen hybridisaatio) tarjoaisi periaatteessa nopean ja tehokkaan vaihtoehdon risteyttämiselle. Solutasolla in vitro -viljelmissä tapahtuva ohjattu mutaatioiden aiheuttaminen ja geneettinen valinta saattaisivat

osoittautua tehokkaiksi jalostusmenetelmiksi joillakin metsäpuilla, esim. pyrittäessä lisäämään niiden kestävyyttä patogeenejä kohtaan tai ympäristömyrkyjen sietokykyä. Varsinkin havupuilla protoplasti- ja muut soluviljelmät ovat kuitenkin hyvin kaukaisia mahdollisuuksia.

Jalostuksen ehdottomasti tärkein haaste biotekniikalle olisi aikuisten havupuiden *fysiologinen nuorentaminen*. Tämä tarkoittaa sellaisten solukkoviljely-, hormonikäsitteily- tms. menetelmien kehittämistä, joilla vanhojen puiden solukot saataisiin ”virkistettyä” kasvulliseen kloonimonistukseen soveltuviksi. Tällä voisi olla erittäin kauaskantoisia vaikutuksia havupuiden jalostuksessa. Lehtipuiden mikrolisäyksessä fysiologinen vanheneminen ei yleensä ole ongelma, mutta havupuilla varttaminen on toistaiseksi lähes ainoa keino täysikasvuisten puiden kloonauttamiseen.

Vanhenemisongelma rajoittaa suuresti myös havupuiden bio- ja geenitekniistä käsittelyä. Esimerkiksi kuusen ja männyn somaattisen embryogeneesin kehittelyn alkuvaiheissa solukkoviljely jouduttiin aloittamaan siemenalkioiden solukoista; nykyisin lähtömateriaalina voidaan käyttää nuorten siementaimien neulassolukoita. Itse biotekniikka ei siis toistaiseksi ole tuonut asiaan paljoa helpotusta, mutta sen alalta ratkaisujen on odotettava löytyvän. Koska kasvusolukoiden täydellinen nuorentuminen on luonnossa aivan normaali ilmiö (meiosissa), ennemmin tai myöhemmin löytyy varmasti keinoja niiden nuorentamiseen myös laboratorion solukkoviljelyolosuhteissa.

Geenitekniikan haasteet

Geenikartoitukselle ja genomitutkimukselle käytännön jalostuksen kauaskantoisina toiveina voidaan esittää lähinnä vain tarkennusta ja täsmennystä sille mitä edellä on esitetty:

- puiden taloudellisesti tärkeiden ominaisuuksien ja elintoimintojen (esim. ligniinibiosynteesi, talveutumisprosessit, kylmänkestävyyden muutokset) biokemiallisen ja molekyylibiologisen taustan tarkka tunteminen
- em. ominaisuuksia määräävien geenien yksityiskohmainen kartoitus, toiminnan ja rakenteen tuntemus.

Samalla kun lisääntyvä genomitieto vahvistaisi perustaa metsäpuiden fysiologisten prosessien muuttamiseen geeninsiirtojen avulla, se avaisi jatkuvasti paranevia mahdollisuuksia kohdistaa niihin myös suoraa tai markkeriavusteista valintaa. Vaikka varsinaiset geeninsiirto-manipulaatiot jäisivät metsäpuilla pelkiksi haaveiksi, niiden molekyylibiologinen perustutkimus voi pitkän päälle edesauttaa suuresti käytännön metsänjalostusta, mm. osoittamalla eri elintoimintoihin vaikuttavat tärkeimmät lokukset ja alleelit sekä tuomalla ne perinteisen jalostuksen valinta- ja risteytysmenetelmien ulottuville.

Geeninsiirtotekniikoilta voidaan samaan tapaan pitkällä aikavälillä odottaa lopullista täyttymystä niille toiveille, mitä edellä on lähivuosikymmenille esitetty. Metsätalouden kannalta geenitekniikan tutkimuksen yleiseksi haasteeksi voidaan tiivistää *menetelmien hallittavuuden kehittäminen* sellaiselle tasolle, että niitä voidaan ryhtyä hyödyntämään tuotuksellisesti ja turvallisesti käytännön metsänjalostuksessa ja -viljelyssä.

Toistaiseksi geeninsiirtoihin metsäpuilla liittyy paljon vakavia epäilyksiä ja ankaraa arvostelua niin toiminnan jalostuksellisen tehokkuuden kuin taloudellisen hyödyllisyydenkin suhteen, mutta ennen kaikkea niistä muulle luonnolle mahdollisesti aiheutuvien, ennalta arvaamattomien haitallisten vaikutusten takia. Jos näihin epäilyksiin ja uhkakuviin ei pystytä pikapuoliin osoittamaan selkeitä ratkaisuja, edessä saattaa olla koko metsäpuiden geenitekniikan tutkimuksen taantuminen. Monet maailman suurimmista metsäteollisuusyhtiöistä ovat ainakin toistaiseksi sanoutuneet irti kaikesta geeninsiirtojen soveltamisesta. Todellisia metsäpuusovelluksia ei ehkä koskaan tulekaan.

Vaikka yleisesti hyväksyttäviä menettelytapoja löytyisi nopeastikin, niiden käytäntöön pano tulee metsäpuilla tarvittavien pitkien testausaikojen takia väistämättä siirtymään kauas tulevaisuuteen. Monet metsäpuiden bio- ja geenitekniikan johtavat tutkijat ja innokkaimmat puolestapuhujat myöntävät, että saattaa mennä vuosikymmeniä ennen kuin nopeakiertoisimpienkaan puulajien siirtogeenisiä yksilöitä päästään kunnolla testaamaan käytännön viljelyolosuhteissa.

Eniten epäilyksiä ekologisista riskeistä on herättänyt puulajeille vieraiden, bakteereista tai muista kasveista peräisin olevien geenien käyttö tähänasti-

sisä geeninsiirtotutkimuksissa. Niillä pelätään olevan hyvin suuria ennalta arvaamattomia vaikutuksia itse puihin ja varsinkin muuhun metsäluontoon. Erityisesti on haluttu varmistaa, että tällaiset ”epäluonnolliset” geenit eivät pääse leviämään suvullisen lisääntymisen kautta luonnonmetsiin, niin kauan kuin niiden kaikista vaikutuksista ja riskittömyydestä muulle luonnolle ei ole täyttä varmuutta.

Geenitekniikan turvallisuutta ja hyväksyttävyyttä ajatellen olisi varmaankin eduksi, jos geeninsiirtosovellusten kehittämisessä keskityttäisiin puulajien omien ”luonnollisten” geenien manipulointiin. Tällöin ei luotaisi mitään sellaista uutta, mikä ei voisi luonnossa itsestäänkin syntyä ja levitä. Aikaansaavat muutokset ja jalostukselliset parannukset jäisivät näin ehkä suhteellisesti paljon pienemmiksi kuin muiden eliölajien hyvin tunnettua geenialainesta hyväksi käytettäessä, mutta lajin omien ”turvallisten” geenien käyttö avaisi ehkä nopeammin tien käytännön sovelluksiin.

Metsäpuiden geeninsiirtosovellusten yleisen hyväksyttävyyden kannalta olisi tärkeää saada itse geeninsiirtotekniikat mahdollisimman täsmällisiksi. Tutkimus näillä aloilla (lajien omien geenien eristäminen ja säätely, geenien rakenteen ja vaikutusten tarkka tunteminen, geenien emäsrakenteen hienosäätö, useiden geenien yhdistäminen ja samanaikainen siirto, siirtojen kohdentaminen kromosomeihin ja soluorganelleihin, erillisten siirtokromosomien rakentaminen, jne.) etenee parhaillaan erittäin nopeasti. Geenitekniikoiden kehittäminen keskittyy luonnollisesti aivan muihin kasvilajeihin ja eliöryhmiin kuin metsäpuihin, mutta metsäpuusovellusten voidaan odottaa seuraavan perässä muutaman vuoden viiveellä, niin kuin tähänkin asti.

Ekologisten ja ekonomisten riskien arviointi muodostaa ilmeisesti vakavimman esteen geenitekniikan soveltamiselle metsäpuihin. Nykyisin eri puolilla maailmaa käytössä olevat turvasäännökset ja lupamenettelyt pyrkivät ehdottomasti varmistamaan, että siirtogeenit eivät pääse siementen tai siitepölyn leviämisen taikka kasvullisen lisääntymisen myötä karkaamaan koekenttiä ympäröivään luontoon. Vastaavasti kaiken avomaan koetoiminnan kesto on rajoitettu siirtogeenisen aineiston kukkimattomaan

nuoruusvaiheeseen. Tämä merkitsee tietenkin sitä, että toistaiseksi siirtogeenien vaikutusten voimakkuuden ja pysyvyyden seuranta sekä niistä muulle viljelymetsäekosysteemille aiheutuvien riskien arviointi ei ole edes perustutkimuksen tasolla mahdollista, puhumattakaan käytännön jalostus- ja viljelysovellusten testauksen vaatimasta aikaskaalasta.

Kirjallisuutta

- Aronen, T. 1999. Biotekniikan sovellukset tulevat – muutuvatko metsänjalostuksen mallit? *Metsätieteen aikakauskirja* 2/1999: 255–260.
- Mann, C.C. & Plummer, M.L. 2002. Forest biotech edges out of the lab. *Science* 295: 1626–1629.
- Mathews, J.H. & Campbell, M.M. 2000. The advantages and disadvantages of the application of genetic engineering to forest trees: a discussion. *Forestry* 73(4): 372–380.
- McLean, M.A. & Charest, P.J. 2000. The regulation of transgenic trees in North America. *Silvae Genetica* 49(6): 233–239.
- Mullin, T.J. & Bertrand, S. 1998. Environmental release of transgenic trees in Canada – potential benefits and assessment of biosafety. *The Forestry Chronicle* 74: 203–219.
- Strauss, S.H., Campbell, M.M., Pryor, S.N., Coventry, P. & Burley, J. 2001. Plantation certification & genetic engineering – FSC’s ban on research is counterproductive. *Journal of Forestry*, December 2001: 4–7.
- Troedsson, H. 2000. Skogsbioteknik hos Stora Enso – Tillämpningar och principiella ställningstaganden. *Kungl. Skogs- och Lantbr. akad. Tidskr.* 139(17): 45–49.

Kirjoitus perustuu Maa- ja metsätalousministeriölle kansallista bio- ja geenitekniikkastrategiaa varten tehtyyn taustaselvitykseen ”Metsäpuilla tehtävä bio- ja geenitekkinen tutkimus ; huhtikuu 2002”. Strategian valmistuttua syksyllä 2002 selvitys tulee kokonaisuudessaan luettavaksi ministeriön verkkosivuille osoitteessa: www.mmm.fi.

■ MML, erikoistutkija Jouni Mikola, Metla, Vantaan tutkimuskeskus. Sähköposti jouni.mikola@metla.fi