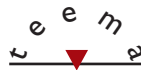


Helmi Kuittinen

Siirtogeenisten puiden ympäristövaikutukset



Aluksi

Riskinarvioinnissa arvioidaan siirtogeenisen materiaalin käytön ympäristö- (ja terveys) vaikutuksia. Kunkin siirtogeenisen puun vaikutukset ovat erilaiset, eivätkä siirtogeeniset puut muodosta yhtenäistä ryhmää. Vaikutukset riippuvat siirretystä geenistä, sen säätelyalueista ja muista mahdollista geneeistä, joita siirrossa on tullut, kohdelajista ja ympäristöstä, jossa puuta on tarkoitus viljellä. Oletettuja haittoja ja hyötyjä tulee arvioida myös pitkällä aikavälillä. Siirtogeenisten puiden viljelystä voi seurata myös huomattavia ekologisia ja taloudellisia hyötyjä.

Aluksi vertailen siirtogeenimenetelmän ja perinteisen jalostuksen eroja. Seuraavaksi tarkastelen ympäristöriskejä joita on liitetty erityisesti siirtogeenisiin kasveihin. Kaikki alla käsitellyt haittavaikutukset voivat tulla kyseeseen sekä perinteisesti että siirtogeenitekniikalla jalostetuissa puissa. Monet oletetut riskit liittyvät siirtogeenien leviämiseen ympäröiviin luonnonpopulaatioihin tai lähilajeihin, ja niiden vaikutuksiin näissä populaatioissa. Mahdollisia haittavaikutuksia ovat invasiivisuus ja risteytyminen uhanalaisen paikallisen populaation kanssa. Siirtogeenisen puun viljelyllä voi olla suoria haittavaikutuksia, jotka eivät liity siirtogeenin leviämiseen: esim. Bt-proteiinin haitalliset vaikutukset eikohdehyönteisiin tai maaperäeliöstöön. Epäsuorista vaikutuksista mainittakoon klonaalisti tuotetun siirtogeenisen materiaalin käyttö metsänviljelyssä (kloonimetsätalous), mikä voi vaikuttaa merkittä-

vällä tavalla metsäekosysteemin biodiversiteettiin. Keskityn tarkastelussa siirtogeenien leviämismahdollisuuksiin ja sen seurauksiin, sekä invasiivisuuden ja resistenssin evoluutioon.

Siirtogeeni- vs. perinteinen jalostus

Perinteinen jalostus perustuu lajissa olevaan tai lähilajista risteyttämisen kautta tuotuun geneettiseen muunteluun. Erilaisista alleleista ja niiden yhdistelmistä valikoituvat viljelylajikkeeseen ne, jotka tuottavat parhaan fenotyypin. Siirtogeenitekniikalla voidaan tuoda uusia geneettisiä variantteja jalostuksen kohteeksi. Kun perinteisessä jalostuksessa saadaan uutta geneettistä muuntelua risteytysten avulla korkeintaan läheisestä lajista, siirtogeenitekniikalla genejä voidaan tuoda samasta lajista tai hyvinkin kaukaisista lajeista. Genejä voidaan siirtää puihin esim. bakteereista ja viruksista.

Siirtogeenimenetelmällä voidaan toistaiseksi tuoda kasviin uusia genejä, jotka voivat olla peräisin joko samasta tai toisesta lajista. Genejä on voitu muokata ennen siirtoa. Kasvin genomissa sijaitsevia genejä ei voida vielä korvata siirtogeenillä, eikä siis kasvin oman geenin emäsjärjestystä voida muuttaa. Siirretty geeni sijoittuu pysyvästi genomiin ja periytyy jälkeläisille. Proteiinia koodaavan osan lisäksi siirtogeeni sisältää säätelyalueen (promoottorin), jona käytetään usein jatkuvan geenitoiminnan aiheuttavaa CaMV-promoottoria. Siirtovaiheessa muka-

na on myös esim. antibiootti- tai herbisidiresistenssin aiheuttava geeni (selektiivinen markkeri), jonka avulla siirtogeeninen kasvi on voitu tunnistaa suuresta joukosta kasveja, joihin siirtäminen on yritetty tehdä. Selektiivinen markkeri voi jäädä siirtogeeniin kasviin mukaan, mutta useille kasveille (mm. haavalle) on kehitetty menetelmiä joissa se poistetaan.

Puilla geenisiirto tehdään yleensä Agrobakteerivälitteisesti, tai pommittamalla solua partikkeleilla joiden pinnalla on siirrettävä DNA. Toistaiseksi geeniä ei voida vielä siirtää tunnettuun paikkaan tuman genomia vaan se insertoituu sattumanvaraisesti genomiin, ja useita kopioita voi insertoitua samanaikaisesti. Siirtogeeni voi insertoitua genomissa olevien geenien välialueelle tai joskus geenin sisälle, jossa se tuhoaa geenitoiminnan. Kun samaa siirtogeeniä on siirretty eri kasviyksilöihin, eri kasvilinjat sisältävät eri määrän kopioita eri paikkoihin insertoituneita, ja geeni toimii näissä eri tasoisesti.

Usein siirtogeenin toiminta hiljenee myöhemmässä vaiheessa. Siirtogeenin lisäksi sitä muistuttavat (homologiset) genomien omat geenit voivat myös hiljentyä. Tämän takia useita siirtogeenisia kasveja seurataan pitkän aikaa, jotta löytyisi yksilö, jossa on haluttu geenitoiminnan taso ja siten toivottu fenotyyppi. Joskus tavoitteena onkin nimenomaan geenitoiminnan hiljennys, esim. kun epätoivottu biokemiallinen synteesiketju halutaan katkaista. Tavoitteena on kehittää geeninsiirtomenetelmiä, joissa geeni voitaisiin siirtää tunnettuun kohtaan genomia, jotta vältettäisiin ongelmia geenin hiljenemisessä. Geeninsiirto kloroplastiin voi tarjota tähän mahdollisuuden.

On keskusteltu siitä onko siirtogeenitekniikalla tuotetulla viljelymateriaalilla yleisesti ottaen enemmän haittavaikutuksia kuin perinteisesti jalostetulla materiaalilla. Konsensusta ei ole saavutettu. Pohdinnassa on hyödyksi erotella siirtogeenin aiheuttaman ominaisuuden vaikutus ja itse siirtogeenimenetelmän vaikutukset. Siirtogeenimenetelmästä seuraa siirretyn geenin sattumanvarainen integroituminen genomiin, ja siitä johtuva mahdollinen geenien hiljentymisen, sekä jos integraatio tapahtuu toisen geenin sisälle, tämän toiminnan tuhoutuminen. Nämä vaikutukset ovat kuitenkin useimmiten kasville haitallisia, eivätkä lisää sen menestymismahdollisuuksia, esim. invasiivisuutta.

Huolestumista herättää etenkin yli lajirajojen tapahtuva geenisiirto. Koska siirretyllä geenillä ei ole ollut yhteistä evoluutiota genomien kanssa, johon se on siirretty, on ajateltu, että siirtogeenisissä eliöissä voisi esiintyä tavanomaista enemmän muutoksia muissa kuin kohdeominaisuudessa (pleiotrooppisia vaikutuksia). Tällaiset pleiotrooppiset vaikutukset lienevät kasvin kelpoisuudelle kuitenkin useimmiten haitallisia kuin hyödyllisiä. Lisäksi kenttäkokeissa seurataan useita siirtogeenisia yksilöitä, jotta löytyisi toivottu fenotyyppi ilman haitallisia pleiotrooppisia vaikutuksia. On myös ajateltu, että toisesta lajista siirretty geeni voisi toisinaan merkittävästi lisätä kasvin kilpailukykyä muihin lajeihin nähden ja siten myötävaikuttaa sen kehittymiseksi rikkaruohoksi (ks. kappale Invasiivisuus). Ympäristövaikutusten suuruus ei kuitenkaan automaattisesti seuraa siitä kuinka kaukainen geenisiirto on. Ympäristöriskiin vaikuttaa kussakin tapauksessa kyseessä oleva geeni, kohdeorganismi ja sen ekologia.

Vaikka siirtogeeniin puihin liittyvät ympäristöriskit ovat suurimmalta osalta laadultaan samoja kuin perinteisesti jalostetuilla puilla, on myös oletettuja riskejä, joita ei perinteisessä jalostuksessa ole. Tällainen on esim. mahdollisuus uusien virustautien synnylle siirtogeenisissä virusresistenteissä kasveissa.

Siirtogeenin leviäminen siitepölyn tai siementen kautta luonnonvaraiseen populaatioon tai toiseen lajiin

Monet siirtogeenisten eliöiden käytön mahdolliset haittavaikutukset liittyvät siihen että siirtogeenit voivat levitä muihin lajeihin tai luonnonvaraisiin populaatioihin. Leviäminen voi tapahtua siementen tai siitepölyn välityksellä. Siemenet kulkeutuvat puista yleensä lyhyempiä matkoja verrattuna siitepölyyn, joka tuulipölytteisillä lajeilla voi kulkeutua kauas. Siirtogeenisia siemeniä voi myös levitä tahattomasti ihmisten toimesta.

Käsittelen alla seikkoja, joita on otettu esille yleisesti siirtogeenisten organismien kohdalla. Niiden merkitykseen metsäpuilla vaikuttavat kunkin tapauksen erityispiirteet: metsäpuut ei ole homogeeninen ryhmä. Yhteistä metsäpuille on se, että ne ovat pitkäikäisiä, korkeasti ristisiittoisia ja useim-

mat tuulipölytteisiä. Viljelymateriaali voi olla geneettisesti lähellä luonnonmetsiä. Osa lajeista (kuten mänty, kuusi, koivu) esiintyy hyvin suurina yhtenäisinä populaatioina, joissa valinta on tehokasta, ja jotkut lajit (kuten jalot lehtipuut) esiintyvät pienissä ja eristyneissä populaatioissa, joissa ajautumisella on suurempi rooli.

Ensimmäinen askel siirtogeenin integroitumisessa luonnonpopulaatioon tai toiseen lajiin ristipölytyksen kautta on risteymän syntyminen. Se voi tapahtua joko siten että siitepöly kulkeutuu luonnonvaraisesta populaatiosta siirtogeeniseen kasviin, johon syntyy risteymäsiemen, tai toisinpäin niin että risteymäsiemen on luonnonvaraisessa kasvissa. Toisessa vaiheessa risteymä lisääntyy takaisinristeytyksellä luonnonvaraiseen kasviin tai siirtogeenikasviin. Risteymän lisääntyminen itsensä kanssa tuottaa F₂-jälkeläistön, mikä on harvinaisempaa, koska risteymiä on suhteessa vähän. Jatkuvien takaisinristeytysten tuloksena siirtogeeni lopulta siirtyy luonnonvaraiseen populaatioon. Sen mukana tulee ympärillä olevaa sekvenssiä siirtogeenikasvista, mutta rekombinaatio on pienentänyt ympäröivän sekvenssin pituutta.

Siirtymisen todennäköisyyteen vaikuttaa risteymän, F₂-sukupolven ja takaisinristeytysten menestyminen. Risteymän ja sitä seuraavien sukupolvien menestymiseen voi vaikuttaa useita tekijöitä. Jos siirtogeeni antaa kelpoisuusedun, esim. hyönteisresistenssin, risteymän kelpoisuus on parempi kuin luonnonvaraisen puun, ja todennäköisyys että risteymä tuottaa jälkeläisiä kasvaa. Toisaalta resistenssiominaisuus, esim. myrkyntuottaminen, voi kuluttaa kasvin resursseja ja pienentää kelpoisuutta silloin kun patogeenin aiheuttamaa valintapainetta ei ole. Risteymä voi olla kelpoisuudeltaan huonompi kuin vanhemmat (*outbreeding depression*). Tämä tulee kysymykseen etenkin kaukaisissa esim. lajien välisissä risteytyksissä. Risteymän huono kelpoisuus (=huono jälkeläistuotto) hidastaa geenin siirtymistä takaisinristeytysten kautta. Rekombinaation ansiosta edullinen geeni voi kuitenkin päästä eroon mukana tulleista huonoista geeneistä ja yleistyä. Risteymä voi joillain kasvilajeilla olla myös kelpoisuudeltaan parempi kuin vanhemmat esim. heteroosi-ilmion takia.

Peltokasvit ja niiden luonnonvaraiset populaatiot voivat olla geneettisesti niin erilaisia, että hyb-

ridisaation mahdollisuus on pienentynyt. Viljelty metsäpuut muistuttavat kuitenkin geneettisesti luonnonvaraisia metsiä. Männyllä, kuusella ja koivulla jalostus on jatkunut vasta muutamia sukupolvia. Parannusta halutuissa ominaisuuksissa esim. männyllä on saatu jo ensimmäisten sukupolvien valinnalla, mutta merkkigeenien suhteen viljelymetsät ovat yhä luonnonvaraisten populaatioiden kaltaisia. Kaiken kaikkiaan viljelymetsät eivät nykyisellään vielä poikkea geneettisesti olennaisesti luonnonmetsistä. Tästä syystä geneettisiä esteitä viljelymetsien ja luonnonmetsien väliselle geenivaihdolle ei ole, ja risteymät ja takaisinristeytykset ovat kelpoisuudeltaan samanlaisia kuin vanhempansa, jos siirtogeenin mahdollista vaikutusta ei oteta huomioon.

Kun siirtogeeni on siirtynyt luonnonpopulaatioon tai lajiin, sen frekvenssi siellä on aluksi pieni. Geenin kohtalo populaatioissa tämän jälkeen riippuu yleisistä populaatiogenetiikan laeista. Olennainen tekijä on se antaako geeni kelpoisuusedun, vai onko se neutraali tai haitallinen. Valinta yleistää hyödyllisiä geenejä ja karsii huonoja geenejä. Lisäksi vaikuttaa sattumasta johtuva ajautuminen, joka on voimakkainta pienissä populaatioissa. Suurissa populaatioissa valinta huonoja geenejä vastaan ja hyvien puolesta on tehokkaampaa kuin pienissä, sillä niissä ajautuminen ei muuta alleelifrekvenssejä paljon. Isoissa populaatioissa hyödyllinen geeni voi yleistyä luonnonvalinnan ansiosta. Jos geeni on neutraali, todennäköisyys fiksoitua on sama kuin sen alkufrekvenssi, jos taas haitallinen, fiksoitumistodennäköisyys on vielä tätä pienempi. Pienissä populaatioissa sekä edullisten että haitallisten geenien käyttäytymiseen vaikuttaa huomattavassa määrin sattuman aiheuttama ajautuminen.

Myös migraation määrä vaikuttaa siirtogeenien frekvensseihin. Jos migraatio siirtogeenipuista vieraiseen luonnonpopulaatioon on jatkuvaa, sen vaikutus on samankaltainen kuin tietyllä frekvenssillä tapahtuvalla mutaatiolla. Kun migraatio ja valinta on kestänyt monta sukupolvea, suuressa luonnonpopulaatioissa haitallinen siirtogeeni esiintyy lopulta frekvenssillä joka seuraa tasapainosta migraation taajuuden (kussakin sukupolvessa siirtogeenipuista tulevien migranttialleelien osuuden, *m*) ja siirtogeeniä vastaan kohdistuvan valinnan voimakkuuden välillä. Esim. jos siirtogeeni on dominoiva ja homo-tygootin suhteellinen kelpoisuus on 1–*s*, kun toisen

homotsygootin kelpoisuus on 1, siirtogeenin frekvenssi populaatiossa tasapainotilanteessa on m/s . Jos siirtogeeni on neutraali, jatkuva migraatio nostaa siirtogeenin alleelifrekvenssiä luonnonpopulaatiossa. Muutos on kuitenkin hidasta kun migraatio on pientä. Neutraalien geenien korvautumisnopeus on suoraan suhteessa migraatiotaajuuteen. Esimerkiksi jos migranttialleelin osuus kussakin sukupolvessa on 0,001, niin migranttialleeli korvaa alkuperäisen keskimäärin $1/m = 1000$ sukupolvessa. Tämä olisi männyllä 25 000 vuotta, jos sukupolvenväli on 25 vuotta. Jos isoon populaatioon tulee jatkuvasti hyödyllisiä alleleita, valinnalla on hyvät mahdollisuudet yleistää se. Mitä suurempi migraatio, voimakkaampi valinta ja mitä isompi populaatiokoko, sitä suurempi on hyödyllisen geenin korvautumisnopeus.

Mänty- kuusi- ja koivupopulaatioissa, joiden populaatiokoot ovat hyvin suuret, valinta toimii tehokkaasti, joten haitallisten migranttiteenin yleistymisen todennäköisyys on häviävän pieni, ja toisaalta jos geeni antaa kelpoisuusedun sen on mahdollista yleistyä. Männyllä valinnan tehokkuudesta kertoo voimakas klinaalinen muuntelu fenologisissa ominaisuuksissa migraation suuresta määrästä huolimatta.

Siirtogeenin aiheuttama muutos kelpoisuuteen

Siirtogeenin aiheuttama muutos kelpoisuuteen riippuu spesifisesti siirtogeenistä ja kohdeorganismista sekä kasvuympäristöstä. Esim. mikäli toimiva siirtogeeni vahvistaa puun stressinsietoa eri ympäristötekijöille tai sen resistenssiä kasvintuhoojia vastaan, on mahdollista, että puun kelpoisuus paranee. Ilman empiirisiä kokeita oloissa, joissa puut normaalisti kasvavat, siirtogeenin vaikutus on kuitenkin mahdotonta riittävällä varmuudella todeta.

On kuitenkin ryhmä siirtogeeniä, joilla voi päätellä melko varmasti olevan kielteisen vaikutuksen kelpoisuuteen. Usein siirtogeenisessä kasvissa on haluttu vähentää tai poistaa tietty biokemiallinen tuote esim. hiljentämällä tuotteen synteesiin osallistuva geeni. Tällainen esimerkki on puiden ligniinisynteesin vähentäminen. Suurissa puupopulaatioissa syntyy luonnollisen mutageneesin seurauksena jo-

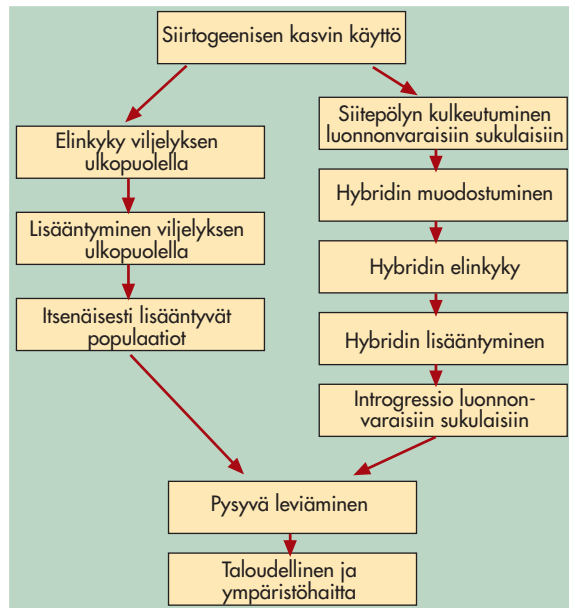
kaiseen geeniin jatkuvasti mutaatioita, joista valtaosa johtaa geenin toimimattomuuteen tai vialliseen geenituotteeseen. Esim. jos mutaatiotaajuus on 10^{-5} /sukupolvi/lokuks, niin miljoonia yksilöitä käsittävässä puupopulaatioissa syntyy joka sukupolvessa kymmeniä geenin toimintaa haittaavia mutaatioita. Jos geenin toimimattomuudella olisi positiivinen vaikutus kelpoisuuteen, tehokas valinta olisi sen jo yleistänyt populaatioissa. Koska näin ei ole käynyt evoluution kuluessa, geenin toimimattomuus on todennäköisimmin haitallista.

Leviämisen estäminen

Siirtogeenien leviämistä ympäröiviin populaatioihin tai lähilajeihin siitepölyn välityksellä on pyritty estämään siten, että näiden esiintymisalueiden välillä olisi alue jossa lajia ei esiinny (eristysvyöhyke). Metsäpuista esim. koivu, kuusi, mänty ja haapa ovat tuulipölytteisiä ja siitepölyn migraatio on tehokasta. *Pinus*-suvun lajeissa pölytykseen osallistuvaa siitepölyä on arvioitu tulevan satojen metrien, jopa kilometrien päästä. Suurin osa siitepölystä kulkeutuu suhteellisen lähelle, mutta pieni osa kulkeutuu ainakin ajoittain huomattavasti pitemmälle. Kulkeutumiseen vaikuttaa tuulen suunta ja voimakkuus jotka voivat vaihdella suuresti. Geenivirtaa voi eristysvyöhykkeillä huomattavasti vähentää, mutta tuulipölytteisillä lajeilla sitä on vaikea kokonaan estää.

Siirtogeenien karkaamisen ehkäisemiseksi on ehdotettu lisäksi erilaisia menetelmiä.

Steriiliyden aiheuttavan geenin siirto samaan materiaaliin mihin varsinainen kohdegeeni on siirretty voisi ehkäistä siitepölyn ja siementen kautta aiheutuvan geenivirran. Täydellisen steriliteetin saavuttaminen on vaikeaa, ja lisäksi on otettava huomioon siirtogeenin mahdollinen epästabiilius. Metsäpuista kukkimattoman koivun kehittämisessä on päästy pisimmälle. Geeninsiirto kloroplastiin tuman sijasta tarjoaa keinon ehkäistä siitepölyn kautta tapahtuva migraatio. Tämä perustuu siihen että kloroplastit periytyvät äidin kautta jolloin ne siirtyisivät vain siemeniin. Tämä on mahdollista vain lajeilla, joilla kloroplastit periytyvät maternaalisesti (useimmat koppisiemeniset). Siementen kautta tapahtuvaa geenivirtaa on helpompi hallita koska siemenet kulkeutuvat yleensä vain lyhyitä matkoja.



Kuva 1. Miten siirtogeeninen organismi tai sen geenit voivat vaikuttaa haitallisesti ekosysteemiin Wolfenbargerin ja Phiferin (2000) mukaan.

Puiden korjuu ennen kukkimista on yksi keino estää leviäminen. Tutkimukseen tarkoitetuissa kenttäkokeissa tämä on varteenotettava mahdollisuus.

Invasiivisuus

Viljelykasvi voi levitä valtaamalla kasvualaa viljelyksen ulkopuolelta. Se voi aiheuttaa sekä taloudellista haittaa, että ekologisia ongelmia syrjäyttämällä muita kasvilajeja. Mahdollista invasiivisuutta on pidetty yhtenä tärkeimmistä mahdollisista ympäristöriskeistä, joita uusien viljelykasvien (tavanomaisesti jalostettujen tai siirtogeenisten) käyttö voi aiheuttaa (kuva 1). Invasiivisuus voi koskea sekä itse viljelykasvia, tai risteymää luonnonvaraisen ja viljelykasvin välillä. Viljelykasvien luonnonvaraisia kantoja on hybridisaation seurauksena kehittynyt rikkaruohoiksi seitsemässä maailman 13 tärkeimmästä viljelykasvista. Suuri enemmistö uusien viljelylajikkeiden käyttöönotoista ei kuitenkaan ole johtanut ongelmiin.

On ajateltu että siirtogeenien on joissain tapauksissa mahdollista lisätä invasiivisuutta joko viljelykasvissa, tai siirryttyään luonnonvaraisiin populaatioihin tai lähilajeihin. Invasiivisuuden esiintymismahdollisuutta on katsottu lisäävän se, että a) siirtogeeniominaisuus aiheuttaa invasiivisuutta, b) laji, johon geeni siirretään on alunperin invasiivinen, tai c) että siirtogeeninen laji potentiaalisesti hybridisoituu invasiivisten lajien kanssa. Avainasemaan nousee itse jalostettu ominaisuus: voiko se lisätä puun invasiivisuutta kyseisissä ekologisissa oloissa. Invasiivisuutta voisi mahdollisesti lisätä esim. rikkahävitteen- tai hyönteiskestävyyttä tuova geeni. On arvioitu, että siirtogeenin tuoma kuivuu- densieto voisi laajentaa kuusen ekologista lokeroa, siten että se tulee kilpailukykyisemmäksi habitateissa, joissa mänty on päälaji.

Siirtogeenin ei tarvitse välttämättä aiheuttaa muutoksia invasiivisuuteen vaikuttavissa ominaisuuksissa, mutta jos se tuo mahdollisuuden kasvattaa puulajia alueella jossa sitä ei luontaisesti ole, niin uudessa ympäristössä lajilla ei ehkä ole samoja ekologisia rajoitteita kuin aikaisemmassa.

Siirtogeenisten kasvien käyttöä on verrattu eksoottisten lajien käyttöönottoon uusilla alueilla. Monet muualta tuodut (eksoottiset) viljelylajit ovat karanneet viljelyksiltä ja saaneet elintilaa alkuperäisten lajien kustannuksella, koska niiltä ovat puuttuneet luonnolliset viholliset tai ekologiset rajoitteet. Näin on käynyt ensi sijassa tropiikissa, jossa ilmasto on harvoin leviämisen esteenä. Myös metsäpuita on otettu laajasti viljelykseen niiden luontaisen esiintymisalueen ulkopuolella. Esim. eteläisellä pallonpuoliskolla viljellyt eksoottiset mäntylajit ovat monin paikoin levinneet viljelysten ulkopuolelle. Vertaus vieraslajeihin perustuu siihen, että toisesta lajista siirretty geeni toisi suuren muutoksen lajin ominaisuuksiin.

Vieraslajimallia on toisaalta kritisoitu sen perusteella, että yhden ominaisuuden suhteen jalostettu siirtogeeninen kasvi poikkeaa alkuperäisestä yleensä paljon vähemmän kuin mikään toinen laji, ja että monissa tapauksissa ero on paremminkin rinnastettavissa viljelykasvien perinteisten lajikkeiden väliin eroihin.

Geenivirta viljelypopulaatiosta paikallisesti sopeutuneisiin pieniin populaatioihin

Eräs viljelykasvien käyttöön liittyvä ongelma seuraa niiden mahdollisesta risteytymisestä uhanalaisen paikallisen populaation kanssa. Ongelmia voi periaatteessa aiheuttaa sekä siirtogeeninen että tavanomaisesti jalostettu kasvi, eikä näiden välillä ole periaatteellisia eroja. Siirtogeeniominaisuuden ansiosta kasvilajia voidaan kuitenkin mahdollisesti viljellä uudessa ympäristössä, jossa se joutuu lähisukuisen lajin tai paikallisesti sopeutuneen populaation läheisyyteen. Mikäli viljelty kasvilaji hybridisoituu paikallisen populaation tai lähilajin kanssa, seurauksena on geenivirta näiden välillä.

Jos viljelymateriaali poikkeaa läheisistä luonnonmetsistä geneettisesti siirtogeenin lisäksi myös muissa, adaptiivisesti tärkeissä ominaisuuksissa, niin viljelymetsästä luonnonmetsiin voi siirtyä alleleita, jotka heikentävät sopeutumista, ja ovat siten haitallisia. Jos geenivirta on runsasta suhteessa valinnan voimakkuuteen, valinta ei pysty tehokkaasti karsimaan haitallisia alleleja ja populaation identiteetti muuttuu. Pienen populaation lisääntymiskapasiteetti voi myös tuhlaantua huonosti menestyviin hybrideihin. Jos viljelypopulaation geneettinen muuntelu on pientä (kuten klonaalaisesti lisäytessä metsänviljelymateriaalissa tulisi todennäköisesti olemaan), muuntelu luonnonvaraisessa populaatiossa vähenee. Tällainen tilanne voi tulla kysymykseen kun luonnonvaraisen populaation koko on hyvin pieni, ja viljelypopulaation koko on hyvin paljon sitä suurempi, jolloin geenivirran suunta on pääasiassa viljelypopulaatiosta luonnonvaraiseen populaatioon päin. Geenivirran määrä suhteessa valinnan voimakkuuteen on tärkein vaikuttava tekijä.

Uhanalaisista eliölajeista huomattava osa on vaarassa kuolla sukupuuttoon hybridisaation takia. Esimerkkejä puuvartisen uhanalaisen populaation hybridisaatiosta yleisempään lähilajiin on mm. suvuissa *Quercus*, *Ulmus*, *Tilia* ja *Salix*. Suomessa tällaisen ilmiön mahdollisuus lienee jaloissa lehtipuissa, joiden populaatiokoot ovat pienet, ja jotka ovat osittain uhanalaiseksi luokiteltuja. Luonnonpopulaatioiden mahdollinen paikallinen sopeutuminen, uhanalaisuus, viljelyaineiston laajuus suhteessa luonnonvaraisiin populaatioihin ja pölytysmekanismit ovat avainasemassa, kun tarkastellaan tämän ilmiön mahdollisuutta.

Patogeeni-kasvikoevoluutio

Resistenssiominaisuuksia on kehitetty perinteisillä jalostusmenetelmillä ja nykyään resistenssiogenejä voidaan tuoda viljelykasveihin siirtogeenitekniikalla. Mikäli resistenssi geenit leviävät kestävästä lajikkeista ympäröiviin populaatioihin tai lajeihin, yhtenä mahdollisena seurauksena pidetään nopeutunutta patogeenien evoluutiota. Ilmiö koskee yhtäläisesti sekä perinteisiä että siirtogeenitekniikalla jalostettuja kasveja. Siirtogeenitekniikan avulla resistenssin jalostusta on mahdollisuus nopeuttaa ja tehostaa.

Kasvi ja sen tuholaiset aiheuttavat toisilleen evoluutiopaineita ja siten kehittyvät yhdessä. Uusi resistenssiominaisuus kasvissa vähentää patogeenin tai tuohyönteisen virulenssia tai elinkykyä ja pienentää siten sen kelpoisuutta parantaen samalla kasvin omaa kelpoisuutta. Toisaalta resistenssin ylläpitäminen, esim. luontaisen torjunta-aineen tuottaminen, vaatii kasvilta resursseja. Patogeenin/hyönteisen ominaisuudet jotka auttavat voittamaan resistenssin, yleistyvät vasteena tähän valintapaineeseen. Resistenssin *Bacillus thuringiensis*-bakteerin cry-proteiinille on havaittu syntyneen hyönteislajeissa sekä torjunta-aineruiskutusten seurauksena kentällä että laboratorio-olosuhteissa.

Erilaisia toimia on suositeltu vähentämään valintapaineita, jotka suosivat Bt-resistenssialleeleita hyönteisissä. Käytössä on yleisesti ”high dose-refuge”-strategia. Tässä kestäväksi jalostettujen kasvien täytyy tuottaa niin suuria annoksia Bt-proteiinia, että myös hyönteiset, joilla on resistenssi geenin heterotsygoottisena, kuolevat. Resistenssi ilmenee silloin vain homotsygoottisissa hyönteisyksilöissä, ja siksi geenin yleistyminen olisi hidasta. Lisäksi Bt-lajikkeiden lähistöllä tulisi viljellä tavanomaisia lajikkeita, jotta näiden eri viljelyalueiden välillä olisi riittävästi hyönteisten migraatiota. Tämä vähentäisi kelpoisuuseroa kestävä ja alttiin homotsygootin välillä ja siten pienentäisi valinnan tehoa.

On esitetty että patogeenien ja hyönteisten vastaevoluutiota voisi ehkäistä siten, että kasviin siirrettäisiin genejä, jotka tuottavat eri mekanismeihin perustuvia suoja-aineita samanaikaisesti. Tällöin hyönteisessä pitäisi kehittyä yhtä aikaa useita erillisiä mutaatiota niiden kaikkien murtamiseksi. Kasviin voi ehkä myös siirtää genejä, joissa olisi useita patogeenin tunnistuskohtia, ja yhdenkin tun-

nistuskohdan indusointi johtaa puolustusreaktioon. Toisaalta toleranssiominaisuuksien jalostuksen ei odoteta aiheuttavan valintapaineita tuholaisissa. On myös ajateltu että indusoitava Bt-geeni saattaisi vähentää mahdollisuuksia resistenssin kehittymiseksi sitä vastaan tuhohyönteisessä. Toisaalta induktion aiheuttama viive antaa kasvintuhoojille mahdollisuuden välttää täyttää torjunta-aineannosta siirtymällä kasvusta toiseen. Juuri alimittainen annostus on monissa eliöryhmissä osoittautunut varmimmaksi tavaksi nopeuttaa resistenssin evoluutiota.

Mikäli Bt-proteiinia tuottava siirtogeeni leviäisi laajalti viljelymateriaalin ulkopuolelle se voisi nopeuttaa hyönteisten resistenssin syntymistä. Metsäpuiden pitkäikäisyyden takia metsien uudistuminen ja siirtogeenin leviäminen on kuitenkin suhteellisen hidasta verrattuna hyönteisten lyhyeen elinkierto. Resistenssiominaisuuden syntyminen (mikäli se tapahtuu) lieneekin todennäköisempää itse viljelymetsässä, kuin siirtogeenin leviämisen seurauksena ympäröivissä populaatioissa. Resistenssiominaisuuden syntyminen kasvintuhoojaan yhden viljelykieron aikana lienee todennäköisempää pitkäikäisillä metsäpuilla kuin esim. peltokasveja viljeltäessä.

Myös herbisidiresistenssigeenin leviäminen rikkakasvinomaisiin sukulaisiin, mikäli sellaisia ekosysteemissä esiintyy, voisi aiheuttaa ongelmia. Silloin olisi turvauduttava tarpeen mukaan myös muihin torjuntakeinoihin, jotka voivat olla epäedullisempia viljelijän tai ympäristön kannalta. Kestävien lajikkeiden hyödyt ja haitat kokonaistorjunnan kannalta on punnittava tapauskohtaisesti.

Lopuksi

Siirtogeenisiin metsäpuihin liittyvää populaatiogeneettistä tai ekologista tutkimusta ei ole paljon julkaistu. Siirtogeenisen kuusen mahdollisista ympäristövaikutuksista on raportoitu (Tømmerås ym 1996) ja metsäpuiden ympäristöriskinhallintaa tutkitaan Tanskassa (National Environmentla Research Institute, http://www.dmu.dk/1_Om_DMU/2_aktproj/abstractmv.asp?Anr=8370). Muista viljelylajeista saatu tieto on osin käyttökelpoista myös metsäpuiden tarkastelussa.

Siirtogeenin vaikutusten arviointia metsäpuilla hidastaa se että puut ovat pitkäikäisiä. Vaikutukset puun ominaisuuksiin voivat näkyä vasta myöhäisessä elinkierron vaiheessa. Samoin ekologiset vaikutukset voivat näkyä vasta pitkän ajan kuluttua. Metsäpuut ovat sekä maailmanlaajuisesti että suomalaisessa ekosysteemissä hyvin dominoivia, ja niillä on välittömiä tai välillisiä vuorovaikutuksia lähes kaikkien samassa ympäristössä olevien eliöiden kanssa. Esimerkiksi maaperäekologiassa ja maapallon hiilitasapainon ylläpitämisessä niillä on oleellinen osa.

Tuulipölytteisillä metsäpuilla siitepölyn leviäminen ympäristöön on vaikea torjua täydellisesti. Huomio tulisi kiinnittää siihen, mitkä mahdollisuudet siirtogeenillä on yleistyä ympäröivissä populaatioissa ja onko siirtogeenin leviämisellä haitallisia vaikutuksia. Suurissa metsäpuupopulaatioissa haitallisten geenien yleistymisen todennäköisyys on häviävän pieni, mutta hyödyllisen geenin todennäköisyys yleistyä on suuri, jos geenivirta on jatkuva.

Kirjallisuutta

- Tømmerås, B., Johnsen, O., Skrøppa, T., Hindar, K., Holten, J. & Tufto, J. 1996. Long term environmental impacts of release of transgenic Norway spruce (*Picea abies*). Nina Niku Project (16808), Report 003:1–48.
- Wolfenbarger, L.L. & Phifer, P.R. 2000. The ecological risks and benefits of genetically engineered plants. *Science* 290: 2088–2093.

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

■ FT Helmi Kuittinen, Oulun yliopisto, Biologian laitos.
Sähköposti helmi.kuittinen@oulu.fi