



## Suojelualueverkoston suunnittelu matemaattisena ongelmana

Atte Moilanen



**Luonnonsuojelun tärkein päämäärä on turvata biologisen monimuotoisuuden säilyminen pitkälle tulevaisuuteen. Ihmisen toiminnasta johtuvaa luonnollisten elinympäristöjen häviämistä ja pirstoutumista pidetään yleisesti suurimpana maailmanlaajuisena uhkana eliölajien säilymiselle (Pimm & Lawton 1998). Kotimaisia esimerkkejä elinympäristöjen häviämisestä ovat vanhojen metsien ja ketomaisemien määrän huomattava väheneminen 1900-luvun loppupuoliskolla. Pirstoutumisella on merkittäviä vaikutuksia myös suojelualueverkoston suunnittelun.**



Resurssien (ruoka, lisääntymispaikat jne.) rajallisuudesta johtuen pieni elinympäristön pirstale (laikku) pystyy ylläpitämään vain verraten pientä populaatiota. Pienet populaatiot taas ovat vaarassa hävitä esimerkiksi säätilan vaihteluiden, metsästyksen tai geneettisen heikentymisen vuoksi. Mikäli suojeltavan lajin elinympäristö on pirstoutunut, sen säilyttäminen voi siksi vaatia useiden pienehköjen laikkujen suojelun. Tavoiteltavaa on, että suojellut laikut sijaitsisivat niin lähellä toisiaan, että laikusta toiseen luonnollisesti siirtyvät yksilöt voivat asuttaa tyhjäksi jääneen laikun. Esimerkiksi alue-ekologinen suunnittelu ekologisine käytävineen ja askelkivineen yrittää edesauttaa lajien säilymistä järjestämällä eliöyksilöiden siirtymistä oletettavasti edistäviä liikkumareittejä laikkujen välille.



Resurssien rajallisuus on tärkeä reunaehto suojelualuesuunnittelussa. On selvää, että luonnon monimuotoisuuden kannalta paras ratkaisu olisi kaiken hyvälaatuisen elinympäristön kertakaikkinen suojelu. Käytännössä kaiken suojelu ei kuitenkaan ole taloudellisesti, poliittisesti eikä sosiaalisesti mahdollista. Tästä seuraa, että käytettävissä olevat resurssit on kohdennettava tehokkaasti siten, että luonnonsuojelulle asetetut päämäärät toteutuvat mahdollisimman hyvin. Suunnittelijan on tyypillisesti pystyttävä vastaamaan seuraavantyyppiseen kysymykseen: jos 100 laikusta on mahdollista suojella 30, niin mitkä 30 tulee valita, jotta tavoitteet toteutuvat parhaiten? Perustellun vastauksen löytäminen tällaiseen kysymykseen ei ole helppoa.



Metapopulaatioiden tutkimuksen huippuyksikkö Helsingin yliopiston Populaatiobiologian osastolla on erikoistunut tutkimaan spatiaalista populaatiodynamiikkaa, jolla tarkoitetaan eliöiden alueellisia ja ajallisia kannanvaihteluja. Spatiaalisen populaatiodynamiikan tärkeä osa-alue on metapopulaatiodynamiikka (Hanski 1998), jolla tarkoitetaan lajin esiintymisen vaihtelua ryhmällä erillisiä elinympäristölaikkuja, jotka voivat olla esim. kukkaketoja tai vanhan metsän saarekkeitä. Metapopulaatiodynamiikan perusajatus on, että laji voi säilyä alueellisesti, mikäli (pienet) elinympäristölaikut muodostavat riittävän tiheän verkoston. Tällöin läheisestä asutusta laikusta lähtevät yksilöt pystyvät asuttamaan uudelleen tyhjäksi jääneen laikun. Metapopulaatio voi siis säilyä paikallispopulaatioiden häviämisten ja tyhjiksi jääneiden laikkujen uudelleenasettamisen välisessä tasapainossa siinäkin tapauksessa, että kukin yksittäinen laikku on niin pieni, että paikallispopulaatio säilyy hengissä keskimäärin vain muutaman vuoden kerrallaan.



Parin viime vuoden aikana metapopulaatioiden tutkimusryhmässä on alettu menestyksekkäästi tutkia matemaattisia ja tilastollisia menetelmiä metapopulaatiodynamiikan huomioimiseksi suojelualueverkoston suunnittelussa. Tätä aihepiiriä ei ole tutkittu muualla maailmassa johtuen siitä, että metapopulaatiodynamiikan tutkimus ja suojelualuesuunnittelun matemaattiset menetelmät ovat tulleet laajemmin tutkimuksen kohteeksi vasta 1990-luvulla. Kyse on siis varsin uusien tieteenalojen yhdistämisestä.



Matemaattisia ongelmia suojelualueverkoston suunnittelussa



Suojelualueverkoston suunnittelussa voidaan käyttää apuna



tietyjä matemaattisesti optimaalisia verkstoratkaisuja (Pressey et al. 1997, Cabeza & Moilanen 2001). Näiden hakemisessa käytettävien laskennallisten menetelmien havainnollistaminen on hyvä aloittaa kuvaamalla tyypillinen empiirinen havaintoaineisto, jota optimoinnin pohjana käytetään. Aineisto koostuu joukosta elinympäristölaikkuja, joiden pinta-ala ja hinta tunnetaan, ja joilta on kartoitettu lajien esiintyminen vähintään yhtenä vuonna (tyypillisesti laikkuja ja lajeja on satoja). Aineisto voi näyttää esimerkiksi seuraavanlaiselta (1 merkitsee lajin läsnäoloa, 0 poissaoloa):

Laikku nro	Pinta-ala	Lajit 1-8
1	10	1111 1100
2	4.0	1110 0001
3	2.5	0001 1110
4	1.4	1110 0000
5	0.5	0011 0001
6	0.3	0000 1110

Tärkeimmät suunnittelussa hyödynnettävät käsitteet ovat lajirunsaus (laikulla olevien lajien määrä) ja täydentävyys. Täydentävyys kertoo kuinka erilaisia ovat kahden laikun laijijoukot. Esimerkiksi yllä olevassa aineistossa laikut 2 ja 3 täydentävät toisiaan erinomaisesti, mutta laikut 3 ja 6 huonosti.

Yksinkertaisin suojelualueverkoston suunnittelussa käytetty menetelmä on ratkaista niin sanottu minimipeitto-ongelma, jossa tavoitteena on löytää lukumääräisesti tai pinta-alaltaan pienin joukko laikkuja, joka sisältää vähintään yhden populaation kutakin lajia (ratkaisussa ei huomioida populaatiokokoja). On kuitenkin teoreettisesti selvää, että yksi populaatio kutakin lajia ei voi taata kaikkien lajien säilymistä suojelualueella. Tämä tulos on vahvistettu myös kaikissa asiaa tutkineissa empiirisissä tutkimuksissa; ratkaisu, joka yhdellä hetkellä sisältää kaikki lajit, saattaa 10 vuoden kuluttua sisältää vain 70% lajeista, ja nämäkin vain siinä tapauksessa, että suojelualan ulkopuolisen elinympäristön laadussa ei ole tapahtunut merkittävää heikentymistä. Minimipeitto-ongelmaa voidaankin luonnollisesti laajentaa siten, että kullekin lajille vaaditaan enemmän kuin yksi populaatio. Tällöin lajin katoaminen yhdeltä laikulta voidaan mahdollisesti korvata siirtoistutuksena toisesta populaatiosta.

Toinen yksinkertainen ongelmatyyppi on niin sanottu maksimipeitto-ongelma: Jos käytettävissä on tietty määrä resursseja, niin mikä laikkujoukko sisältää "suurimman biodiversiteetin". Tässä suurin biodiversiteetti voidaan määrittellä eri tavoin riippuen siitä lasketaanko lajien esiintymien pinta-aloja vai populaatiomääriä ja millä tavalla tavoitetasojen (esim. kolme populaatiota per laji) alitukset/ylitykset huomioidaan ratkaisun hyvyttä arvioitaessa.

Yllä mainittujen optimointiongelmien ratkaiseminen ei valitettavasti ole aina helppoa, esimerkiksi sadasta laikusta voidaan valita  $2^{100}$  eli n.  $10^{30}$  erilaista laikkuyhdistelmää. Kaikkien näiden vaihtoehtojen läpikäyminen parhaan yhdistelmän löytämiseksi ei ole laskennallisesta mahdollista, ja siksi ratkaisun hakemisessa käytetäänkin erilaisia numeerisia optimointimenetelmiä. Esimerkiksi minimipeitto-ongelmaa on ratkaistu seuraavalla yksinkertaisella ja epätarkalla algoritmilla:

1. Aseta ratkaisuksi lajirunsaus laikku.
2. Lisää ratkaisuun täydentävin laikku eli laikku joka eniten kasvattaa lajimäärää.
3. Jos kaikki lajit ovat mukana ratkaisussa, lopeta, muutoin palaa kohtaan 2.

On helppoa osoittaa, että tämä algoritmi ei aina tuota optimaalista tulosta. Yllä olevaa esimerkkiaineistoa käyttäen havaitaan, että algoritmi valitsisi järjestyksessä laikut 1, 2 ja 3, vaikka pelkästään laikut 2 ja 3 kattaisivatkin kaikki lajit. (Minimipinta-alaongelman ratkaisu olisi laikut 4,5 ja 6.) Nykyisellään minimipeitto-ongelma osataan ratkaista riittävän tarkasti kehittyneempiä algoritmeja käyttäen, mutta monien vaikeampien ongelmatyyppien ratkaisumenetelmät ovat edelleen työn alla.

Suojelualuesuunnittelun avuksi on viime aikoina kehitetty myös päätösanalyttisiä menetelmiä, jotka voivat perustua esimerkiksi haavoittuvuuden ja korvaamattomuusasteen

käsitteisiin. Laikun korvaamattomuusaste on korkea, jos on todennäköistä että laikku tarvitaan mikäli suojelun tavoitteet halutaan saavuttaa. Haavoittuvuus taas liittyy riskiin, että laikun tai sen ympäristön laatu heikkenee ilman pikaista suojelupäätöstä. Suojelupäätösten kannalta kiireellisimpiä ovat korvaamattomat ja haavoittuvat laikut.

Ylämainituille ongelmatyypeille on yhteistä se, että niissä optimointi pohjautuu yhteen havaintoon lajin läsnäolosta laikuilla. Kuitenkin lajien esiintyminen luonnossa vaihtelee vuodesta toiseen ja spatiaalisen populaatiodynamiikan huomioiminen suojelualueverkoston suunnittelussa onkin menneen parin vuoden aikana tunnistettu merkittäväksi haasteeksi koko tutkimusalalle.

### Metapopulaatiodynamiikka ja suojelualueverkoston suunnittelu


Metapopulaatiodynamiikan teorian ensimmäinen (usein empiirisesti vahvistettu) peruslähtökohta on, että populaation hävintäriski on suurempi pienellä kuin suurella laikulla. Toinen perusoletus on, että hyvin kytkeytynyt tyhjä laikku asutetaan uudelleen nopeammin kuin eristynyt laikku, jonka lähellä ei ole saman lajin muita populaatioita. Sekä pinta-ala ja kytkeytyvyys vaikuttavat siis yksittäisen elinympäristölaikun asutustilanteeseen. Yleensä pieni laikku on tyhjä, mutta jos se on lähellä suurta populaatiota, saattaa suuresta populaatiosta tuleva migranttien virta pitää pienenkin laikun asuttuna enimmäns osan aikaa. Jos metapopulaatiodynamiikka jätetään huomiotta on vaarana, että suojelualueverkoston suunnittelu pohjataan väärään käsitykseen siitä, mitä lajin läsnäolo laikulla tarkoittaa. Staattiseen asutustilanteeseen pohjaavat menetelmät epäsuorasti olettavat, että lajin läsnäolo laikulla on merkki myös läsnäolon jatkuvuudesta. Tällä oletuksella on luontevaa valita pieni, hinnaltaan edullinen laikku mukaan suojelualuesuunnitelmaan. Käsitys tilanteesta muuttuu, jos tiedostetaan, että lajin läsnäolo pienellä laikulla on pääosin seurausta suuren laikun läheisyydestä. Eli yhteistä, lajin läsnäolo suojelualueella saattaa oleellisesti riippua suojelualueen ulkopuolisesta elinympäristöstä. Tämä tilanne ei ole tavoiteltava eikä luonnonsuojelun kannalta suotuisa, sillä suojelualueen ulkopuoleisen elinympäristön tulevaisuudesta ei ole takeita.

Toistaiseksi kirjallisuudessa on ehdotettu muutamaa epäsuoraa menetelmää edistää lajin pitkäaikaista säilymistä suojelualueella (Cabeza & Moilanen 2001):

- (1) Valitaan vain tiettyä kokoa suurempia laikkuja sikäli kun lajin säilymisen mahdollistava laikun minimikoko tunnetaan. Tätä menetelmää on käytetty joillekin nisäkkäille.
- (2) Pohjataan laikkujen valinta populaatiokokoihin. Joko valitaan suurin laikku tai laikku, jolla lajin tiheys on suurin. (Tällöin oletetaan, että kannan tiheys on luotettava merkki laikun laadusta.)
- (3) Valitaan laikkuverkosto, jonka ympärille piirretty monikulmio on mahdollisimman pieni, sillä tiivis laikkuverkosto oletettavasti edesauttaa tyhjiksi jääneiden laikkujen uudelleen asuttamista.


Metapopulaatioiden tutkimusryhmässä on kehitetty suojelualueverkoston suunnittelumenetelmiä, jotka perustuvat spatiaalisen populaatiodynamiikan suoraan huomioimiseen (Moilanen & Cabeza 2001). Näissä pyritään ratkaisemaan nk. maksimisäilyvyysongelma, jossa vastataan kysymykseen: mikä laikkuyhdistelmä tulee valita, jotta lajin säilymistodennäköisyys valitulla aikavälillä on suurin, kun tietty määrä resursseja on käytettävissä? Kehitettyssä ratkaisussa sovitetaan ensin lajin dynamiikkaa kuvaavan metapopulaatiomallin parametrin empiiriseen havaintoaineiston lajin esiintymisestä. Sitten kullekin laikulle määritetään hinta. Paras laikkuyhdistelmä haetaan ohjattuun satunnaistamiseen perustuvalla optimointimenetelmällä. Hakuprosessissa huomioidaan lajin parametrivaihteluun sisältyvä epävarmuus. Lopputuloksena on kullekin laikulle todennäköisyys kuulua parhaaseen verkostoon. Tyypillisesti kalliit ja/tai eristyneet laikut eivät kuulu parhaaseen verkostoon. Tärkeimpiä ovat edulliset ja hyvin kytkeytyneet laikut.

Tätä menetelmää on sovellettu Suomessa uhanalaisen tummaverkkoperhosen (*Melitaea diamina*) metapopulaatioon (Wahlberg et al. 1996, Moilanen & Cabeza 2001). Tummaverkkoperhonen elää Tampereen seudulla




laikkuverkostossa, joka koostuu n. sadasta kosteasta niitystä, joilla kasvaa lajin toukkien ravintokasvia, lehtovirmajuurta. Hoitamaton niitty kasvaa noin 20 vuodessa umpeen pajupusikoksi. Metapopulaation ylläpidon kustannus tuleekin siitä, että niityt, joilla laidunnus on jo loppunut, täytyy pitää vapaana varjostavasta kasvillisuudesta. Tämä kustannus on pienin hyväkuntoiselle laidunnetulle niitylle tai voimalinjan alusmaalle, suurempi jo pajukoitumassa olevalle laiduntamattomalle niitylle ja selkeästi suurin metsätalouskäyttöön otetulle niitylle, jolle on istutettu kuusta.


### Käytännön ongelmia matemaattisten menetelmien soveltamisessa




Metapopulaatiodynaamista lähestymistapaa suojelualuesuunnitteluun on tällä hetkellä mahdollista soveltaa lajeille, joiden dynamiikkaa kuvaavat parametrit (levämisetäisyysjakauma, paikallisen hävintäriskin suuruus jne.) ovat valmiiksi tiedossa tai mahdollista määrittää helposti kerättävästä havaintoaineistosta. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että lähestymistapa soveltuu toistaiseksi korkeintaan muutaman lajin säilymistodennäköisyyden maksimointiin. Suojelualueilla kuitenkin elää vähintäänkin satoja lajeja, joiden säilyminen on mielenkiinnon kohteena. Suojelualuesuunnittelun matemaattisten menetelmien soveltamisessa eräs suurimpia ongelmia onkin hyvälaatuisen havaintoaineiston kerääminen suurelle lajijoukolle, sillä tällaisen aineiston kerääminen on hidasta, vaikeaa ja kallista.




Ratkaisuna havaintoaineiston laatuongelmaan on esitetty nk. indikaattori-, sateenvarjo- tai lippulaivalajeja. Lippulaivalajit ovat yleisön hyvin tuntemia karismaattisia lajeja (liito-orava tms.), joiden suojelulle on helppo saada tukea yleisöltä. Indikaattori- ja sateenvarjolajit puolestaan ovat (helposti havaittavia) lajeja, jotka ovat merkki hyvästä elinympäristön laadusta ja joiden esiintyminen on oletettavasti merkki suuresta lajirunsaudesta. Pieni joukko hyvin valittuja indikaattorilajeja riittäisi siten pohjaksi onnistuneen ja lajistoltaan kattavan suojelualuesuunnitelman tekoon. Valitettavasti empiiriseen aineistoon perustuvat tutkimukset indikaattori- ja sateenvarjolajien edustavuudesta ovat yleensä päätyneet siihen, että hyvien indikaattorilajien löytäminen on vaikeaa ja etenkin lajiryhmien välillä mahdotonta. Esimerkiksi lintujen osalta jotenkin edustava laji tuskin kertoo paljoakaan hyönteislajiston monimuotoisuudesta. Tästä johtuen hyvä luonnontuntemus ja perusteellisuus laikkujen luontoarvojen kartoituksessa on edelleen tärkeä lähtökohta onnistuneelle suojelualuesuunnittelulle.



Toinen ongelma matemaattisten menetelmien soveltamisessa on poliitikan ja maanomistusolojen suuri vaikutus toteutuviin suojelusuunnitelmiin. Poliittisluonteisten tekijöiden huomioiminen matemaattisissa analysissa on vaikeaa, vaikka todellisessa päätöksenteossa näiden tekijöiden painoarvo saattaa olla suurikin.




Kolmas ongelma on kommunikaation puute tiedemiesten ja käytännön suunnittelua tekevien virkamiesten välillä. Vaikka laskennallisia ja päätösanalyysiin perustuvia menetelmiä onkin kehitetty viime vuosina, ei menetelmien tuntemus ole levinnyt kovinkaan laajalti tiedeyhteisön ulkopuolelle. Tärkeä osa tutkimustyön julkistamista onkin tuottaa helpokäyttöisiä ja hyvin dokumentoituja tietokoneohjelmistoja, joita ilman menetelmät eivät leviä laajempaan käyttöön.



Metapopulaatioiden tutkimusryhmässä on juuri valmistumassa metapopulaatioiden analyysiin ja metapopulaatiodynamiikan simulointiin soveltuva ohjelmisto.

### Biologiset perustot tuudet syytä muistaa



Luonnonsuojelun tavoitteiden kannalta tehokkaiden suojelualueverkoston suunnittelumenetelmien kehittäminen on tärkeää, sillä käytettävissä olevat resurssit eivät tyypillisesti riitä kaiken hyvälaatuisen elinympäristön suojeluun. On tärkeää valita sellainen joukko laikkuja, joka turvaa mahdollisimman monen lajin säilymisen pitkällä aikavälillä. Perinteiset suojelualueverkoston suunnittelumenetelmät eivät ole huomioineet sitä, että lajien esiintymisalueet luonnossa vaihtelevat vuodesta toiseen. Jos tämä biologinen perustotus unohdetaan, voidaan virheellisesti tehdä suojelualuesuunnitelmia, joissa oletetaan, että yksi tai muutama pieni esiintymä riittää turvaamaan lajin esiintymisen. Erityisenä

vaarana on, että näitä menetelmiä käytetään perusteena sille, että suojelualuesuunnitelman ulkopuolista elinympäristöä ei ole tarpeen säästää.

Metapopulaatioiden tutkimusryhmässä kehitettävät laskennalliset menetelmät ja helppokäyttöiset tietokonesovellukset pyrkivät parantamaan suojelualueverkoston suunnittelussa käytettäviä menetelmiä ottamalla huomioon spatiaalisen populaatiodynamiikan. Toistaiseksi kehitettyjä menetelmiä voidaan soveltaa lajeille, joiden biologiset ominaisuudet, erityisesti leviämiskyky, tunnetaan riittävän tarkasti.

#### KIRJALLISUUTTA:

**Cabeza, M. & A. Moilanen (2001): Design of reserve networks and the persistence of biodiversity.**

**Trends in Ecology & Evolution, painossa.**

**Hanski, I. (1998): Metapopulation dynamics. Nature 396:41-49.**

**Moilanen, A. & M. Cabeza (2001): Single-species dynamic site selection. Lähetetty julkaistavaksi.**

**Pimm, S. L. & J. H. Lawton (1998): Planning for biodiversity. Science 279:2068-2069.**

**Pressey, R. L., H. P. Possingham & J. R. Day (1997): Effectiveness of alternative heuristic**

**algorithms for identifying indicative minimum requirements for conservation reserves. Biological Conservation 80:207-219.**

**Wahlberg, N., A. Moilanen & I. Hanski. (1996): Predicting the occurrence of species in**

**fragmented landscapes. Science 273:1536-1538.**

*Kirjoittaja on FT ja TkL, joka toimii tutkijatohtorina metapopulaatioiden tutkimuksen huippuyksikössä Helsingin yliopiston Ekologian ja systematiikan laitoksella.*  
[atte.moilanen@helsinki.fi](mailto:atte.moilanen@helsinki.fi)