

# Informaatio ja eksergia ekosysteemipalveluiden mittareina

■ Petteri Vihervaara

Luonnon monimuotoisuuden väheneminen huolestuttaa monia aikalaisiamme. Joidenkin tutkijoiden mukaan se on ihmiskunnan suurin ympäristöongelma. Useimmat ovat ainakin sitä mieltä, että pitkälle jatkuessaan biodiversiteetin hupeneminen kaventaa huomattavasti ihmisten tulevaisuuden vaihtoehtoja ja murentaa yhteiskuntien kestävyden perusteita. Ihmisyhteisöt ovat riippuvaisia ekosysteemipalveluista, joita monimuotoisen luonto tuottaa. Ekosysteemipalveluiden taloudellisen arvon ymmärtäminen saattaa olla toimiva keino paikallisena ratkaisuna kestävyden tavoittelussa, mutta viime kädessä kysymys on planeetan mittakaavassa tarkasteltavan biosfäärin arvon ymmärtämisestä.

On ajateltu, että ekosysteemipalveluiden taloudellisen arvottamisen myötä yhteiskunnan toiminnasta ekosysteemeille aiheutuvat haitat saataisiin yhteismitallisiksi kaiken muun toiminnan kanssa. On kuitenkin nurinkurista antaa arvoa elämää ylläpitäville ekosysteemipalveluille markkinalogiikkaa noudattelevien, niukkuuden käsitteestä kumpuavien perinteisten taloustieteen mallien pohjalta, joissa ekosysteemipalvelut nähdään markkinoiden sisäisenä rakenteena. Ekologinen taloustiede tarjoaa vaihtoehtoisen näkökulman, jonka lähtökohtana on, ettei talous voi ylittää ympäristön määräämää kestävyttä. Siinä systeemin muutoksia pyritään kuvaamaan talouden käsittein.

Tarkastelen asiaa biologin silmin sosio-ekologisen systeemin ulkopuolelta ja pyrin avaamaan vaihtoehtoisia tapoja hahmottaa luonnon monimuotoisuuden todellista merkitystä ja arvoa termodynamiikan ja informaatioteorian avulla. Vaihtoehtoisena ”valuuttana” esittelen kaksi evoluution mittaria, jotka ovat informaatio (sitä kuvaavat esim. fylogeneettinen ja geneetti-

nen diversiteetti) ja eksergia (eli systeemin työntekokapasiteetti).

## Ekosysteemipalvelut ovat elämän synnyttämiä prosesseja

Ekosysteemipalveluista on puhuttu viime aikoina tiedeyhteisössä paljon. Yksinkertaistaen niillä tarkoitetaan ”hyötyjä, joita ihmiset saavat luonnosta”. Laaja ja monitieteinen käsite on saanut osakseen myös kritiikkiä ja sitä on tulkittu väärin, kun on ajateltu termin tarkoittavan pelkästään luonnon monetarisoinnista. Väärinkäsitysten välttämiseksi on alettu suosimaan ns. kaskadimallia (Haines-Young & Potschin 2010), jonka mukaan ekosysteemipalveluiden syntyketjun osat rakentuvat 1) luonnon monimuotoisuudesta ja ekosysteemien rakennepiirteistä, 2) ekosysteemien toiminnallisista ominaisuuksista, 3) ihmisten niistä saamasta ja kokemasta hyödystä ja 4) hyödyn arvottamisesta (ei pelkästään taloudellisesta, vaan myös sosiaalisesta, terveydellisestä ja moraalaisesta). Jaottelun avulla voidaan tarkentaa, mitä ekosysteemipalvelututkimuksen osa-alueita kulloinkin tarkastellaan. Lisäksi ekosysteemipalvelut on yleisesti totuttu jakamaan tuotanto-, sääätely-, kulttuuri- ja tukipalveluihin (MA 2005). Ekosysteemipalveluihin pohjautuvan tarkasteltavan suurin arvo on sosio-ekologisen systeemin holistinen ymmärrys, mikä on edellytyksenä, jos mielitään sovittaa kestävästi yhteen yhteiskuntien ja luonnon systeemit. Elämä ja sen kehityksestä syntynyt luonnon monimuotoisuus on ekosysteemipalveluiden perusta.

Elämä maapallolla on nykytiedon mukaan yli 3,5 miljardia vuotta vanhaa (mikä universumin mittakaavassakin alkaa jo olla kunnioitettava ikä). Perinteinen biologinen määritelmä elämälle perustuu ennen kaikkea kahteen perusominaisuuteen: aineenvaihduntaan eli metaboliaan

ja lisääntymiseen eli kopiautumiseen ja muunte- luun. Eliöt pyrkivät keräämään ja kierrättämään ympäristöstään energiaa ja ainetta, ja siirtä- mään perinnöllisen informaationsa seuraavalle sukupolvelle. Fysiikan antama selitys elämä- nä tuntemallemme ilmiölle on niin ikään perin yksinkertainen: ”vapaaan energian kuluttamis- ta mahdollisimman nopeasti” (Kaila & Annila 2008). Systeemiekologisen ajattelun mukaisesti aurinko on maapallolla esiintyvän elämän ener- gialähde, ja luonnon monimuotoisuus on järjes- telmä, joka on kehittynyt vapaan energian mak- simaalisen tehokkaaseen hyödyntämiseen.

Elämä maapallolla janoaa aineenvaihdu- taansa varten energiaa ja aineita. Biogeokemi- alliset kierrot, joita ekosysteemipalveluslangissa kutsutaan tuki- tai ylläpitopalveluiksi, kierrät- tävät maapallon sisäisessä systeemissä noin 30 alkuainetta, joista lähinnä hiilen, typen ja fosfo- rin kiertoihin liittyvät vaiheet tunnetaan sangen hyvin (Burgin ym. 2011; Schlesinger ym. 2011). Tiedot muiden aineiden, esimerkiksi mangaa- nin ja raudan, ekosysteemitöimintoja säätele- vistä vaikutuksista ovat vielä kovin puutteellisia. Organismien perusluokittelu pohjautuu niiden käyttämiin energialähteisiin. Mikrobin maa- ilmasta tunnetaan useita vaihtoehtoisia perus- metabolian tapoja, kun taas kasvit ja eläimet ovat tässä suhteessa hyvin yksinkertaista jouk- koa hankkiessaan energiansa joko yhteyttämäl- lä tai syömällä. Yksinkertaistaen voidaan väittää, että vanhimmat elämänmuodot sisältävät eniten toisistaan poikkeavaa informaatiota siitä, miten maailmankaikkeudessa selvittää ja menesty- tään. Näillä eliöillä lajikäsitys, jonka tunnetun lähinnä kasvien ja eläinten kohdalla, on merki- tykseltään kyseenalainen. Olennaisempia ovat sen sijaan erilaisten eliöryhmien toiminnalliset erot, kuten tapa hankkia energiaa<sup>1</sup>.

1 Eliöiden energiametabolia perustuu veden, hapen, hiilen, typen, raudan ja rikin hapetus-pelkistysreakti- oihin ja siihen lukeutuvat myös lukuisat käymispro- sessit. Toisenvaraisten eliöiden (joita ekologisessa ravintoverkossa kutsutaan kuluttajiksi ja hajottajiksi) orgaanisen aineen hajotuksessa eli hengityksessä orgaanisesta hiilestä muodostuu hiiliidioksidia. Käy- misessä orgaanisesta hiilestä muodostuu jokin toinen orgaaninen hiilmolekyyli tai hiiliidioksidi. Denitrifi-

Biologiaa, kemialla ja fysiikkaa yhdistävä sys- teemijattelu ei ole mitenkään uutta tieteessä, vaikka se ei olekaan ollut perinteisessä ekologi- sessa tutkimuksessa vallitseva ajattelutapa. Sys- teemiekologisen ajattelun juuret ovat syvällä tieteenhistoriassa. Kestävyyden tutkimuksessa sen avaamiin mahdollisuuksiin ollaan kuitenkin vasta heräämässä.

## Boltzmannin termodynaamiset systeemit ja Darwinin informaatioteoria

Samoihin aikoihin 1800-luvun jälkipuoliskolla kun Charles Darwin (1809–82) julkaisi oival- luksensa evoluutiosta (Darwin 1859), Ludwig Boltzmann (1844–1906) oli kiinnostunut Brow- nin liikkeestä<sup>2</sup> ja termodynamiikasta. Erityisesti Boltzmannia kiinnosti termodynamiikan toisen lain<sup>3</sup> mukainen luonnon systeemien väistämät- tön ajautuminen kohti täydellistä epäjärjestystä, kohti tasapainoon pyrkivän maailmankaikkeu- den ”lämpökuolemaa”. Darwinin näkemys taas näytti johtavan täysin vastakkaiseen suuntaan, kohti monimutkaisuutta, erikoistumista ja bio- logisten systeemien organisoitunutta järjestys- tä. Boltzmannin mielestä näytti siltä, että elävät organismit joutuvat yhä kauemmaksi epäjärjes-

---

kaatio on hengitysprosessi, jossa mikrobit käyttävät nitraattia hengitykseensä. Maapallolta tunnetut eliöt voidaan jaotella kolmeen tyyppiin: 1) Tuotantoon kykeneviin yhteyttäviin eliöihin (fotosynteesi). 2) Kemoliautotrofiin mikrobeihin, jotka voivat hyödyntää kemiallista energiaa ja muodostaa orgaanista hiiltä eli ovat siis tuottajia. Tästä esimerkkinä ovat ns. merien mustat savuttajat -lähteet, joiden vaikutuksesta syn- tyy kokonainen eliöyhteisö. Yhteisön energian saanti perustuu sedimentistä kumpuvaan kemialliseen energiaan (yleisesti pelkistynyt rikki ja rauta). 3) Toi- senvaraisiin eliöihin eli kaikkiin niihin, jotka tarvitsevat orgaanista hiiltä energianlähteenään. (Morowitz 1968; Schlesinger ym. 2011)

- 2 Robert Brownin vuonna 1827 havaitsema nesteessä tai kaasussa mikroskoopilla nähtävissä olevien hiukkasten satunnainen ja itsenäinen liike, jonka aiheuttaa atomi- en ja molekyylien värähtelystä johtuva lämpöliike.
- 3 Termodynamiikan 2. pääsääntö: Entropia kasvaa. Sen tarkemmasta määrittelystä yleisimmin käytetyt muotoilut ovat: eristetyn systeemin prosessi etenee kohti suurinta todennäköisyyttä eli suuntaan, jossa entropia kasvaa ja vapaa energia vähenee; tai eriste- tyn systeemin kokonaisentropia kasvaa; tai lämpöä ei voi muuttaa täydellisesti työksi; tai kaikki ajautuu järjestyksestä kaokseen (Wikipedia).

tyksestä ja termodynaamisesta tasapainotilasta muodostaen samalla järjestäytyviä rakenteita, jotka sijaitsevat jonkin matkan etäisyydellä tasapainotilasta (Boltzmann 1905; Schneider & Kay 1995). Myös atomimallin keksijä Niels Bohr (1885–1962) osoitti kiinnostusta fysiikan ja biologian yhdistämiseen, mutta hänen vitalistiset näkemyksensä elämää selittävistä voimista eivät tällä saralla ole kantaneet kovin pitkälle.

1900-luvun puolessa välissä Boltzmannin havainnoista innostui itävaltalainen fyysikko, nobelisti ja yksi kvanttimekaniikan perustajista, Erwin Schrödinger (1887–1961), joka niin ikään oli kiinnostunut selittämään, mitä on elämä. Schrödingerin erityisansioksi on luettava, että hän yritti luoda siltaa fysiikan, kemian ja biologian välille. Hän kiteytti ajatuksensa kahteen fundamentaaliseen perinnöllisyyttä ja termodynamiikkaa yhdistävään prosessiin, jotka kuvaavat elämää: *järjestystä järjestyksestä* ja *järjestyksestä epäjärjestyksestä* (Schrödinger 1944; Schneider & Kay 1995). Järjestyksestä järjestyksestä -teemalla hän tarkoitti, kuinka on mahdollista, että organismit välittävät tietoa sukupolvelta toiselle. Esimerkkinä hän käytti banaanikärpäsen geenejä, joiden arvioitiin koostuvan noin tuhannesta atomista. Schrödinger ihmetteli, kuinka on mahdollista, että solussa olevat niin pienet rakenteet eivät muutu lämpötilan vaikutuksesta vaan voivat välittää informaation ehjänä seuraavalle sukupolvelle. Hän arveli, että se oli vältettävissä vain, jos geeni muodostuisi jonkinlaisesta jaksottomasta kiteestä, jonka rakenteeseen informaatio tallentuu koodikirjoituksena. Noin kymmenen vuotta myöhemmin löydetty DNA-kaksoiskierre toteutti Schrödingerin ennustuksen (Watson & Crick 1953), mikä johti molekyylibiologian hurjaan kehitykseen.

Järjestyksestä epäjärjestyksestä -teemaa ei kuitenkaan ole joko kunnolla ymmärretty tai siihen ei ole pystytty tarttumaan. Tällä ongelmalla Schrödinger tarkoitti kysymystä, kuinka on mahdollista, että elämä säilyttää organisoidun rakenteen, vaikka se termodynamiikan toisen säännön eli suljetun systeemin entropian kasvun nimissä pitäisi olla pitkällä aikavälillä mahdotonta. Schrödinger selitti tämän sillä, että organismi säilyttää järjestyksen lisäämällä ympäris-

tönsä epäjärjestyksestä<sup>4</sup> Schrödinger siis ratkaisi ongelman kääntymällä epätasapainoisen termodynamiikan puoleen, jossa energia- ja ainevirrat systeemin ja ympäristön välillä ovat merkityksellisiä. Ilya Prigogine (1917–2003), joka sai vuonna 1977 kemian Nobelin ansioistaan dissipatiivisten rakenteiden<sup>5</sup>, kompleksisuuden ja palautumattomien prosessien tutkimuksessa, osoitti matemaattisesti, kuinka prosessi itseorganisoitumisen kautta on mahdollinen (esim. Prigogine 1955).

Termodynamiikkaa ja biologiaa yhdistäviä määritelmiä elämälle ovat Boltzmannin ja Schrödingerin lisäksi esittäneet mm. ekologien hyvin tuntema tilastotieteilijä Alfred J. Lotka (1922), informaatioteorian perustajana tunnettu Claude Shannon, jonka diversiteetti-indeksi on niin ikään kaikille ekologeille tuttu (Shannon & Weaver 1949), Odumin veljekset (Odum 1959; Odum & Odum 2000) ja Jeffrey Wicken (1987). Lotka (1922) arveli evoluution kehittyvän siihen suuntaan, että läpivirtaava energia hyödynnetään mahdollisimman tehokkaasti. Termodynamiikan soveltaminen elollisten systeemien tutkimukseen on tarjonnut uusia näkökulmia myös sosioekologisten systeemien kestävyden tutkimiselle tulevaisuudessa (esim. Nielsen & Müller 2009; Jørgensen ym. 2008; Jørgensen & Svirezhev 2004; Schneider & Kay 1995). Biosfäärin mittakaavassa tehtävän ekosysteemipalvelututkimuksen tulisi ainakin olla tietoisia näistä mahdollisuuksista. On myös hyvä pitää mielessä, että termodynamiikka liittyy kiinteästi ekologisen taloustieteen paradigmaan, jonka oppi-isänä pidetään Nicholas Georgescu-Roegenia (Georgescu-Roegen 1967; Naskali 2010). Seuraavaksi tarkastelen hieinan tarkemmin, mitä eksergiolla ja informaatiolla tarkoitetaan ja miten ne voisivat liittyä ekosysteemipalveluiden arvottamiseen.

4 Schrödinger kehitti negentropian-käsitteen, jolla pyrki kuvaamaan ilmiötä. Negentropiaan on kuitenkin suhtauduttu kyseenalaisesti.

5 Dissipatiivinen rakenne on termodynaamisesti avoin systeemi, joka toimii yleensä kaukana termodynaamisesta tasapainotilasta ympäristössä, jonka kanssa se vaihtaa energiaa ja ainetta. Eliöiden kohdalla tämä ilmenee systeemin ulkopuolisen energian sitoutumisena kemialliseen muotoon.

## Eksergia, vapaa energia ja termodynamiikan pääpiirteet

Lämpö on atomien ja molekyylien värähtelyä. Mitä enemmän on värähtelyä, sitä enemmän havaitaan lämpöä. Muita termodynamiikan kannalta olennaisia käsitteitä ovat tila, entropia (eli haje, jota arkisesti ja osin harhaanjohtavasti myös epäjärjestykseksi kutsutaan) ja eksergia<sup>6</sup> (eli systeemin kyky tehdä työtä [W, joule], ts. hyödyntää vapaata energiaa; hyödyllisen työn mahdollinen maksimi prosessissa, joka johtaa systeemin tasapainoon lämpölähteen kanssa). Eksergian käsitteen määritteli Zoran Rant vuonna 1956, mutta sen idean oli kehittänyt jo J. Williard Gibbs vuonna 1873. Perinpohjaisen selvityksen eksergian käytöstä termodynaamisten ekologisten systeemien tutkimuksessa antavat Jørgensen & Svirezhev (2004).

Termodynamiikan pääkäsite on systeemi. Systeemi on kokonaisuus, jonka todellinen tai kuviteltu raja erottaa ympäristöstään. Systeemit luokitellaan avoimiksi, suljetuiksi ja eristetyiksi sen mukaan, kulkevatko aine ja energia niiden rajapinnan läpi ympäristöön. Eristetyssä systeemissä ei vaihdu aine eikä energia; suljetussa ei vaihdu aine, mutta energia vaihtuu. Avoimesa systeemissä vaihtuvat sekä aine että energia. Tila on systeemin termodynaamisten muuttujien joukko. Maapallo (siis biosfääri) on suljettu systeemi, jonka läpi enimmäkseen auringosta peräisin oleva energia kulkee.<sup>7</sup> Ekosysteemejä maapallolla voidaan tarkastella avoimina systeeminä. Termodynaamisen systeemin perustoimintaperiaate on, että ympäristöstä otetaan korkealaatuista energiaa (esim. auringon valo), ja käytetty energia palautetaan ympäristöön laadultaan heikentyneenä (esim. lämpösaasteily). Tämä johtaa palautumattomaan kokonaisentropian kasvuun.

Termodynamiikan pääsääntöjä on kolme.

- 6 Muita ehdotettuja variaatioita kuvaamaan termodynaamisia suhteita ovat esimerkiksi emergia, essergia tai endergia.
- 7 Merenpohjien mustien savuttajien ympärille muodostuneiden ekosysteemien pääasiallisena energialähteenä ei ole aurinko. Lisäksi ihmiset ovat oppineet hyödyntämään ennen aurinkokuntamme syntyä atomeihin sitoutunutta ydinenergiaa.

Termodynamiikan ensimmäinen pääsääntö on *energian säilyminen*. Sen mukaan energiaa ei voi luoda eikä hävittää, vaan ainoastaan muuttaa muodosta toiseen. Systeemiin tuotu lämpö muuttuu systeemin sisäenergiaksi ja systeemin tekemäksi työksi. Termodynamiikan toinen pääsääntö on *entropian kasvu*. Sen mukaan eristetyn systeemin prosessi etenee kohti suurinta todennäköisyyttä eli suuntaan, jossa entropia kasvaa ja vapaa energia vähenee (ks. alaviite 3). Mikään ei estä järjestystä kasvamasta hetkellisesti, mutta koska epäjärjestyneiden tilojen todennäköisyys on valtavasti suurempi kuin järjestyneiden (hiukkaset voivat järjestyä ”epäjärjestykseen” monilla tavoin, ”järjestykseen” vain yhdellä tavoin), etenee kehitys todennäköisyyslaskennan lakien mukaan suuressa mittakaavassa, ts. suurella määrällä tapahtumia aina kohti todennäköisintä, epäjärjestyneintä lopputilaa. Termodynamiikan kolmas pääsääntö on *entropian nollapiste*. Sen mukaan täydellisen kiteen entropia on nolla. Kaikki toiminta lakkaa absoluuttisessa nollapisteessä. Tämän vuoksi ei absoluuttista nollapistettä voi saavuttaa.

Termodynamiikka kuvaa tilan muutosta ajan suhteen systeemitheorian mukaisesti mustana laatikkona, alussa ja lopussa. Erotuksena tilastollisesta fysiikasta (mekaniikasta) termodynamiikan tarkastelussa ei kuitenkaan tarkastella tuon muutoksen vaiheita (so. systeemin mikrotiloja), vaan empiirisiin parametreihin (esim. paine, lämpötila) mitattavaa makrotilan muutosta. Boltzmann pohti erityisesti ideaalin kaasun muutosta kohti entropiaa. Kaasun partikkeleiden levittäytymisen mahdollisimman tasaisesti tilaan kuvaa entropiaa ja samalla ajan suuntaa. Kuitenkin jo Boltzmann mietti, voisiko lähestymistä soveltaa kuvaamaan elollisen luonnon ilmiöitä. Hän piti sitä kuitenkin vaikeana. Esimerkiksi biosfäärin eliöiden rinnastamista ideaalikaasun partikkeliin ei voinut tehdä, sillä niiden käyttäytymiseen vaikutti jokaisen partikkelin, siis eliöyksilön, muisti ja itsenäiset valinnat. Termodynamiikan ja eksergian käyttömahdollisuudet tekniikassa ovat moninaiset, mutta luonnon ja varsinkin ekosysteemien tutkimukseen niitä ei ole kovin paljon yritetty soveltaa.

## Informaation määritelmät

Entäpä informaatio? Onko informaation vaihtuminen systeemin ja ympäristön välillä mahdollista? Tähän ei taida olla toistaiseksi muuta vastausta kuin, että asia riippuu siitä, miten informaatio määritellään. Luonnonjärjestelmien tutkimuksen näkökulmasta informaation(kin) alkuperä on kuitenkin fysiikassa (Karnani ym. 2009; Kullback 1959). Kahden ajallisesti eristetyin systeemin välillä informaatio voi kulkea, kuten perinnöllisyystieteestä tiedetään. Informaatio evoluution käsitteenä liittyy olennaisesti luonnonvalintaan: *kilpailijaa parempi tieto ympäristön tilasta ja resurssien hyödyntämismahdollisuuksista antaa valintaedun*. Tätä periaatetta seuraten ekosysteemit ovat kehittyneet kohti monimutkaisempia rakenteita. ”Hyvin kypsytynyt” ekosysteemi (esim. vanha sademetsä), jossa myös biodiversiteetti on runsasta, sisältää enemmän (geneettistä) informaatiota kuin yksinkertainen ekosysteemi (esimerkiksi sademetsään raivattu soijapello tai nautalaidun). Kypsän ekosysteemin kyky tehdä tehokkaasti työtä (eksergia, ts. kyky hyödyntää vapaata energiaa), siis ottaa ympäristöstään energiaa ja aineita sekä muuntaa ne aineenvaihdunnan avulla perinnölliseksi informaatioksi, on suurempi kuin yksinkertaisen ekosysteemin (Jørgensen & Svirezhev 2004).

Informaatio on valitettavan usein hyvin epä-tarkasti käytetty käsite (ks. myös Lagerspetz 2011). Informaatioteoriaa pidetään nykyisin sovelletun matematiikan haarana, jossa tarkastellaan informaation mittaamista ja siirtämistä. Käytännön sovelluksia löytyy mm. molekyylibiologiasta, mutta myös tiedonpakkauksen tekniikasta ja yhteiskunnallisista ilmiöistä. Varsinaisen informaatioteorian keksijänä ei suinkaan pidetä Darwinia, vaikka hän kuvaa ilmiötä lajin muuntumisen kautta, vaan Claude Shannonia. Myös informaatioteoriassa mittana pidetään entropiaa. Tämä on kuitenkin johtanut moniin väärinkäsityksiin, sillä Boltzmannin ja Shannonin matemaattisten kaavojen muuttujien keskenään identtisistä suhteista huolimatta Shannonin tilastollinen entropia on eri asia kuin Boltzmannin termodynaaminen entropia (ks. Wicken 1987, s. 18–19). Molemmat on joh-

deettavissa Gibbsin alkuperäisestä tilastollisesta yhtälöstä<sup>8</sup>. Lähtökohdana Shannonin entropian määritelmälle (huom. nimi, jota hän ei itse olisi halunnut ilmiöstä käyttää!) on, että se muodostuu mistä tahansa symboleista, aakkosista, jotka välittävät informaatiota, kun niiden järjestystä vaihdellaan. Epävarmuus tilastollisessa termodynamiikassa ja informaatioteoriassa on kuitenkin luonteeltaan hyvin paljon toisistaan poikkeavaa. Tilastollisessa termodynamiikassa epävarmuus on ehdotonta: systeemin mikrotilaa ei voi stokastisuuden vuoksi tarkasti tietää. Informaatioteoriassa epävarmuus vähenee sitä mukaa, kun viestin välitykseen tarvittavat aakkoset ja niiden merkitys selviävät. Boltzmannin–Gibbsin palautumattomien prosessien entropiakaava perustuu makro- ja mikrotilojen erottamiseen, mutta Shannonin entropiassa näin ei ole. Ehkä kompleksisuus olisi parempi nimi kuvaamaan Shannonin entropiaa. Biologiassa informaatioteoria ja termodynamiikka kuitenkin väistämättä kohtaavat.

Biodiversiteettitutkimuksen ja ekosysteemien toiminnan kannalta olennaisia informaation luokittelutapoja on monia. *Taksonominen diversiteetti* kuvaa lajien ja muiden taksonomisten luokittelutasojen määrää ja runsautta. *Fylogeneettinen diversiteetti* kuvaa taksonien välisiä evolutiivisia etäisyyksiä, siis myös erilaistumiseen kulunutta aikaa. Informaation arvottamisen näkökulmasta juuri fylogeneettisen diversiteetin käyttäminen on perusteltua, koska se ottaa huomioon myös ajallisen ulottuvuuden (ks. Faith ym. 2010). *Geneettinen diversiteetti* muodostuu DNA:sta, ja tarkastelun kohteena voivat olla esim. nukleotidit, alleelit, kromosomit tai genotyypit. *Funktionaalinen diversiteetti* tarkoitetaan toiminnallisten ominaisuuksien määrän vaihtelua. Näiden lisäksi muita tapoja mitata monimuotoisuutta ovat esimerkiksi spatio-temporaalinen diversiteetti, ekologisten vuorovaikutusten määrä, maisemallinen monipuolisuus jne. (Naeem ym. 2012).

8 Gibbs:  $S = -k \sum P_i \ln P_i$ ; Shannon:  $H = -K \sum P_i \log_2 P_i$

## Miksi biodiversiteetin määrä kasvaa?

Maapallon elämänhistorian kuluessa on evoluution seurauksena ilmaantunut yhä uusia innovaatioita, jotka ovat johtaneet adaptiivisiin radiaatioihin, eli nopeaan lajimäärän kasvuun, jota uusi luonnonvalinnassa hyödylliseksi osoittautunut valintaetu on vahvistanut. Yleisimmin uusia lajeja syntyy isolaation seurauksena, tunnetuimpana kaikkien aikojen ensimmäisenä dokumentoituina esimerkkinä darwininsirkut Galapagossaarilla. Tavallisesti lajiutumista erotetaan kolme päätyyppiä: *allopatria*, jossa populaation osat elävät maantieteellisesti erillään; *sympatria*, jossa populaation osat elävät samalla maantieteellisellä alueella, mutta eri ekologisissa lokeroissa; sekä *parapatia*, jossa populaation osat elävät maantieteellisesti vierekkäin. Lajiutuminen voi olla verrattain nopeaa, mutta ihmistoiminnan ajalliseen mittakaavaan verrattuna puhutaan hyvin pitkistä ajanjaksoista. Yksi biodiversiteetin esiintymistä maapallolla säätelevä päägradientti (muuttuja) on etäisyys päiväntasaajasta (joka luonnollisesti kertoo myös maanpinnalle tulevan aurinkoenergian määrän, mihin tuki alueellisesti erot vaikkapa pilvisyydessä voivat vaikuttaa; Gaston 2000). Tästä klassisesta pääsäännöstä on kuitenkin lukematon määrä poikkeuksia ja variaatioita tarkastelun kohteena olevista eliöryhmistä riippuen (ks. esim. Heino 2011). Kun monimuotoisuutta katsotaan fysiikan näkökulmasta, sen kasvaminen ei sinänsä ole päämäärä vaan sitä ilmenee, kun systeemi sillä tavoin saa energiaeroja tasoitettua mahdollisimman nopeasti (esim. Jaakkola ym. 2008). Biodiversiteetin alueellista ja eliömaantieteellistä jakautumista maapallolla säätelevät kuitenkin yleensä paljon lajiutumista nopeammat vuorovaikutukset.

Leviämiskyky on yksi biodiversiteetin tärkeimmistä (ja elämänhistoriassa luultavasti yksi ensimmäisistä) toiminnallisista ominaisuuksista jatkuvasti muuttuvissa ekosysteemeissä, esimerkiksi luontaisten häiriöiden, kuten tulipalon ja sitä seuraavan suksession, muokatessa maisemaa. Mutta se ei kuitenkaan ole ainoa keino. Esimerkiksi jotkin puulajit voivat olla todella huonoja levittäytymään uusille alueille, jolloin niiden evolutiivisesti tehokkaimmaksi selviytymiskeinoksi jää parantaa mahdollisuuksiaan sel-

vitä sillä paikalla, jossa ne sattuvat esiintymään. Tällaisia selviytymiskeinoja voivat olla vaikkapa panostaminen siementen laatuun määrän sijaan tai kasvinsyöjille myrkyllisten kemiallisten yhdisteiden kehittäminen suojakseen. Hyvän yhteenvedon biodiversiteetin eliömaantieteellisen jakautumisen lainalaisuuksista esittelee Stephen Hubbel kollegoineen (2001), ja sitä täydentää Ken Thompson (2010) tuoreilla esimerkeillä biodiversiteetin esiintymisestä pienemmässä mittakaavassa ja paikallistasolla.

Perustuotannosta vastaava kasvillisuus määrittelee paikallistasolla paljolti, mitä muuta lajistoa ja ravintoketjun seuraavilla tasoilla olevia kuluttajia (eläinkuntaa) ekosysteemeistä löytyy. Teoriassa tämä on yksinkertaista, mutta käytännössä biodiversiteettiä tunnistettaessa, kartoitettaessa ja mallinnettaessa haasteita riittää. Kasvillisuuden esiintymistä säätelevät etenkin maaperän ravinnepitoisuus, pH, sadanta ja lämpötila. Esimerkiksi Euroopassa kasvillisuuden lajirunsaus on yleensä sitä suurempaa, mitä korkeampi on maaperän pH (7 tai yli), mikä taas liittyy kalkkipitoisuuteen, kun taas happamien maiden (pH 6 tai alle) lajisto on niukempaa, kuten Suomen kasvillisuudestakin tiedetään. (Tässä ei tietenkään pidä mennä liian pitkälle äärimmäisyyksiin eli kasveille suotuisan vaihteluvälin, pH 4–9, ulkopuolelle.) Äkkiseltään katsottuna yleinen lainalaisuus korkeamman pH:n ja runsaamman biodiversiteetin välillä näyttäisi selvältä. Mutta asia ei olekaan niin yksinkertainen. Etelä-Afrikan fynbos-, Australian kwongan- ja Brasilian cerrado-ekosysteemeissä asia onkin päinvastoin. Niissä happamilla hiekkamailla kasvillisuuden biodiversiteetti on kaikkein suurimmillaan. Esimerkit osoittavat, että kullakin alueella erilainen evoluutiohistoria (mukaan luettuna biogeokemiallisten kiertojen evoluutio) on syynä monimuotoisuuden runsauteen (Thompson 2010). Lajit hyötyvät myös, jos ne pystyvät muokkaamaan ympäristön olosuhteita itselleen sopiviksi, mikä parantaa niiden kilpailuetua. Näin tekee esimerkiksi kuusi boreaalisella kasvillisuusvyöhykkeellä happamoittamalla maaperää neulasillaan ja varjostamalla alikasvustoa, mikä suosii sen omia

taimia. Samanlaisia biodiversiteetin paikallista runsautta sääteleviä historiallisia kehityskulkuja voi periaatteessa liittää minkä tahansa aineen ympärille, joka biosfäärissä kiertää.

Vesiekosysteemien lajiston makroekologiseen esiintymiseen vaikuttavista tekijöistä yhteenvedon tehnyt Jani Heino (2011) on osoittanut, että joillakin lajeilla (esimerkiksi sudenkorennot, kalat ja sammakot) alueellinen lajirunsaus noudattelee klassista leveysasteittain laskevaa suuntausta siirryttäessä päiväntasaajalta napapiireille. Kaloilla, jotka tunnetaan parhaiten, energia ja historia ovat tärkeimmät lajirunsausta ja kotoperäisyyttä (endemismia) selittävät tekijät. Kuitenkin eräiden lajiryhmien (koskikorennot, vesiperhoset ja salamannerit) kohdalla on viimeaikaisissa tutkimuksissa saatu viitteitä siitä, ettei niiden alueellinen levinneisyys noudattelisikaan suoraan leveysastegradienttia vaan taustalla olisi monimutkaisempia eliömaantieteellisiä syitä. Vielä monimutkaisemmaksi vesieliöiden lajirunsauden säännönmukaisuuksien määrittely menee, jos verrataan globaalin, alueellisen tai paikallistason säännönmukaisuuksia. Esimerkiksi suurikokoisilla vesikasveilla leveysgradientin vaikutus havaitaan alueellisella tasolla, mutta ei globaalilla mittakaavalla. Leveysasteen merkitys heikkenee biodiversiteetin selittäjänä myös, jos yritetään selittää erilaisten ekosysteemien välistä lajirunsausta. Paikallinen lajirunsaus on tyypillisesti lineaarisessa suhteessa alueellisen lajirunsauden kanssa. Laajan mittakaavan lajirunsauden jakautumisesta tehdyt johtopäätökset perustuvat yleensä yleisistä lajeista tehtyihin havaintoihin, kun taas harvinaisemmat lajit puuttuvat tutkimusaineistoista (Lennon ym. 2011). Heino (2011) ehdottaa suuren mittakaavan makroekologisen levinneisyystarkastelun ja paikallisemman maisematason metayhteisöjen tarkastelujen yhdistämistä, jotta lajirunsausta selittävästä tekijöistä saataisiin parempi käsitys.

Biodiversiteetin kasvua, runsautta ja levinneisyyttä säätelevien syiden tarkempi käsittely olisi erillisen kirjoituksen aihe. Edellä kuvatut esimerkit kuitenkin antavat käsitystä siitä, millaisia vaikutuksia biodiversiteettikato voi ekosysteemipalveluille aiheuttaa (ks. myös Vihervaara 2011).

## Ekosysteemipalveluiden universaalit mittarit

Ekosysteemipalvelututkimus on Odumin (1959) ja Folken ym. (2004) mukaisesti sosio-ekologisen systeemin tutkimusta. Ihmistoiminnan planetaarisen mittakaavan saavuttaneista vaikutuksista johtuen (Rockström ym. 2009) pitkän aikavälin kestävyys tarkastelussa biosfäärin käsittely yhtenä systeeminä on erityisen mielekästä. Tästä johtuen lajimäärä on mittari, jonka tilaa on syytä seurata erityisen tarkasti, sillä siinä tapahtuneet negatiiviset muutokset (biodiversiteettikato) ovat ihmisten ajallisessa mittakaavassa peruuttamattomia ja vähentävät käytettävissämme olevia ekosysteemipalveluita väistämättömästi. Kuuluisan biologi Theodosius Dobzhanskyn (1900–75) sanoin, biologiassa (ja ekologiassa) ei ole mitään mieltä ilman evoluutiota. Tällöin myöskään ekosysteemipalveluissa tai niiden arvottamisessa ei ole mitään mieltä ilman ymmärrystä evoluutiosta. Ekologisissa vuorovaikutuksissa saalistus, kilpailu ja symbioosi saavat erilaisia muotoja, joilla energiaa ja aineita kierrätetään biosfäärissä. Evoluutioprosessit sopeuttavat lajeja kulloinkin vallitseviin olosuhteisiin, ja tässä suhteessa tieto menneestä on tärkein menestyksen tae.

Eksergiaa on tarjottu vaihtoehtoiseksi tavaksi arvioida ekosysteemipalveluita ja ekosysteemien kestävyttä (Jørgensen 2010; Sciubba 2004; ks. myös Nielsen & Müller 2009). Erityisesti eksergian käyttöä on perusteltu siitä näkökulmasta, että ajan kuluessa kypsyyneen luonnontilaisen ekosysteemin kyky tehdä työtä on mahdollisimman suuri (vrt. Carnot 1824). Pelkästään eksergiaa mitattaessa evoluution aikana kertynyt informaatiopääoma voi jäädä kuitenkin aliarvioiduksi, mikä rajoittaa sen käytettävyyttä ainoana ekosysteemipalveluiden mittana. Esimerkkinä tästä voidaan ajatella vaikkapa ruohostomaille istutettavia puuviljelmää, joiden biomassan tuotanto voi olla suurempaa kuin alkuperäisen eliöyhteisön, mutta samalla menetetään paikalla aiemmin esiintyneen lajiston geneettinen informaatio (ellei muutosta edeltävää lajistoa pystytä suojelemaan muilla keinoin). Eksergia (ja viittaa nyt nimenomaan

ekosysteemien eko-eksergiaan, en tekno-systeemien eksergiaan, jossa määritelmää käytetään mm. laitteiden energiatehokkuuden mittarina ja esimerkiksi elinkaariarvioinnissa) on joka tapauksessa aliarvostettu ja huonosti tunnettu mittari, jonka käyttömahdollisuuksia tulisi selvittää nimenomaan ekosysteemipalveluiden kestävyyttä arvioitaessa. Perinteisen ekologian ilmiöiden selittämisessä sen sovellukset eivät äkkiseltään tunnu yhtä tarpeellisilta. Ihmiskunnan energiatarpeen tyydyttämisen janossa on syytä myös muistaa, että viimeiset 50–100 vuotta sosio-ekologisen systeemin muutos sekä ihmiskunnan nopea massan ja informaation siirto ovat perustuneet muinaisten ekosysteemien eksergiakapasiteettiin ja sen tekemän työn ylijäämänä varastoituneeseen fossiiliseen energiaan. Tuon muinaisen työn voimalla ihmiset nyt lentävät ympäri maapalloa käytännössä lähes ilmaiseksi, jos asiaa haluaa verrata biosfäärin todelliseen vuotuisen työntekokapasiteettiin suhteutettuna rahallisena arvona. Tätä ja siitä aiheutuvia ilmastovaikutuksia on mm. hiilijalanjäljellä yritetty tehdä näkyväksi.

Biologiseen maailmankuvaan helpommin istuva toinen ekosysteemipalveluiden mittari on fylogeneettinen diversiteetti (tai yleisemmin geneettinen monimuotoisuus). Sen avulla evoluutiohistorian myötä biodiversiteettiin kertynyt informaatio ja sen monipuolisuus tulee parhaiten otetuksi huomioon. Ekosysteemipalveluiden lisäksi on esitetty myös niin sanotun evosysteemipalvelukäsitteen käyttöönottoa, jolla tarkoitetaan evoluutiopotentiaalın säilyttämistä mahdollisimman suurena tulevaisuuden vaihtoehtoja varten (Faith ym. 2010). Fylogeneettisen diversiteetin käyttö yksinään ekosysteemipalveluiden mittarina jää kuitenkin puutteelliseksi, sillä se ei ota huomioon energia- ja ainevirtoja. Yhdessä eksergian ja fylogeneettisen diversiteetin avulla voitaisiin tuoda paljon uutta ekosysteemipalveluiden arvottamiseen, mutta yksinään kumpikaan ei ole riittävä. Myös muiden luonnon monimuotoisuutta kuvaavien mittareiden parempi tunteminen ja soveltaminen käytäntöön on tärkeää ekosysteemiprosessien kestävyuden turvaamiseksi.

Esimerkkinä geneettisen monimuotoisuuden merkityksestä voidaan pitää saimaanlohta. Yksilö- ja kilomääräisesti tarkasteltuna saimaanlohia uiskentelee Saimaan vesistöalueella runsaasti; kuitenkin niiden luontainen lisääntyminen on estynyt kutupaikkojen tuhoutumisen vuoksi ja geneettinen perimä on äärimäisen kapea (vuonna 1988 pyydystettiin vain viisi emokalaa, joiden jälkeläisiä seuraavan vuoden istukkaat olivat; Primmer 2012). Kaventunut geneettinen materiaali vähentää muuntelua ja altistaa populaation monille uhkille, kuten vaikkapa sairauksille, loisille tai ilmastonmuutokselle.

Etenkin tuotantopalveluiden, esimerkiksi maataloustuotteiden, arvottamiseen perinteiset taloudelliset arvottamismenetelmät sopivat yleisesti ottaen hyvin. Niiden arvottaminen on perustunut erityisesti biomassan arvoon (ts. joko sen energiasisältöön tai ainemäärään ja laatuun). Sääteily- ja tukipalveluiden arvottamisen perustuminen niukkuudesta lähtevään ajatteluun sen sijaan on ongelmallista. Perinteisen aineeseen pohjautuvan arvostuksen rinnalla pitäisi pystyä ottamaan huomioon myös biodiversiteetin aineeton informatiomäärä, josta ekosysteemitoinnot ja eliöiden väliset vuorovaikutukset ovat riippuvaisia – ja sitä kautta varsinkin monet sääteily- ja tuki-/ylläpito-palvelut. Niiden kestävä hallinta edellyttää ekologisen taloustieteen periaatteiden soveltamista käytäntöön. Luonnonjärjestelmien evolutiivisen informaation turvaaminen tulee ottaa huomioon myös, kun yhteiskuntaa muunnetaan kohti vuotuista aurinkoenergiavuotta hyödyntävää biotalouden mallia. Jos biosfäärin informaatiopääomasta päätetään tinkiä energian vuoksi, pitää vähintään ymmärtää, mitä ollaan tekemässä, mitkä ovat vaikutukset muuttuneeseen systeemiin ja miten riskit kasvavat. Energia ja informaatio ovat luonnon ja elämän perussuureet, joiden varaan ekosysteemipalvelutkin perustuvat. Ne ovat oikeastaan saman asian kääntöpuolet: ilman energiaa ei ole informaatiota, mutta ilman informaatiota ei energiaa voida hyödyntää.

*Kiitokset kollegoille kommentaista.*



## Kirjallisuus

- Boltzmann, L. 1905. *Populäre Schriften* (käännös *Theoretical physics and philosophical problems* by B. McGuinness, Reidel, Dordrecht, 1974). Parth, Leipzig, Germany.
- Burgin, A.J., Yang, W.H., Hamilton, S.K. & Silver, W.L. 2011. Beyond carbon and nitrogen: how the microbial energy economy couples elemental cycles in diverse ecosystems. *Fron. Ecol. Environ.* 9(1): 44–52.
- Carnot, S. 1824. *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*. Bachelier, Paris, France.
- Darwin, C. 1859: *On the origin of species*. John Murray, London, UK.
- Faith, D.P., Magallón, S., Hendry, A.P., Conti, E., Yahara, T. & Donoghue, M.J. 2010. Ecosystem services: an evolutionary perspective on the links between biodiversity and human well-being. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 2, 66–74.
- Folke, C., Carpenter, S., Walker, B., Scheffer, M., Elmqvist, T., Gunderson, L. & Holling, C.S. 2004. Regime shifts, resilience, and biodiversity in ecosystem management. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 35:557–81.
- Gaston, K.J. 2000. Global patterns in biodiversity. *Nature* 405, 220–227.
- Georgescu-Roegen, N. 1967. *Analytical economics*. Harvard University Press, Cambridge, MA.
- Gibbs, W. 1873 (1948). *Collected Works*, vols. 1, 2. Yale University Press, New Haven.
- Haines-Young, R.H. & Potschin, M.P., 2010. The links between biodiversity, ecosystem services and human well-being. Teoksessa: Raffaelli, D., Frid, C. (toim.), *Ecosystem Ecology: A New Synthesis*. Cambridge University Press.
- Heino, J. 2011. A macroecological perspective of diversity patterns in the freshwater realm. *Freshwater Biology* 56, 1703–1722.
- Hubbell, S. (ed.) 2001: *The unified neutral theory of biodiversity and biogeography*. Princeton University Press, Princeton and Oxford.
- Jaakkola, S., El-Showk, S. & Annala, A. 2008. The driving force behind genomic diversity. *Biophysical Chemistry* 134, 232–238.
- Jørgensen, S.E., Fath, B.D., Bastianoni, S., Marques, J.C., Müller, F., Nielsen, S.N., Patten, B.C., Tiezzi, E. & Ulanowicz, R.E. 2008: *A new ecology: systems perspective*. Elsevier. UK and the Netherlands.
- Jørgensen, S.E. & Svirezhev, Y.M. 2004: *Towards a thermodynamic theory for ecological systems*. Elsevier.
- Jørgensen, S.E. 2010: Ecosystem services, sustainability and thermodynamic indicators. *Ecological Complexity* 7: 311–313.
- Kaila, V. & Annala, A. 2008. Natural selection for least action. *Proc. R. Soc. A* 464, 3055–3070.
- Karnani, M., Pääkkönen, K. & Annala, A. 2009: The physical character of information. *Proc. R. Soc. A* 465, 2155–2175.
- Kullback, S. 1959. *Information theory and statistics*. Wiley, New York, 1959.
- Lagerspetz, K. 2011: Elämä ja informaation alkuperä. *Tieteessä tapahtuu* 8, 3–7.
- Lennon, J.J., Beale, C.M., Reid, C.L., Kent, M. & Pakeman, R.J. 2011. Are richness patterns of common and rare species equally well explained by environmental variables? *Ecography* 34, 529–539.
- Lotka, A.J. 1922. Contribution to the energetics of evolution. *Proceedings National Academy Sciences*, Vol. 8, s. 147.
- Millennium Ecosystem Assessment [MA]: *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Island Press; 2005.
- Morowitz, H.J. 1968. *Energy flow in biology: biological organization as a problem in thermal physics*. New York, NY: Academic.
- Naeem, S., Duffy, E. & Zavaleta, E. 2012: The functions of biological diversity in an age of extinction. *Science* 336: 1401–1406
- Naskali, A. 2010. Ekosysteemipalvelun termodynaamiset juuret. Teoksessa Hiedanpää, J. ym. *Hyödyllinen luonto – ekosysteemipalvelut hyvinvointimme perustana*. Vastapaino, Tampere, s. 33–51.
- Nielsen, S.N. & Müller, F. 2009: Understanding the functional principles of nature – Proposing another type of ecosystem services. *Ecological Modelling* 220: 1913–1925.
- Odum, E.P. 1959. *Fundamentals of ecology*, 2nd ed. Philadelphia: W.B. Saunders Company.
- Odum, H.T. & Odum, E.P. 2000: The energetic basis for valuation of ecosystem services. *Ecosystems* 3(1): 21–23.
- Prigogine, I. 1955. *Introduction to the thermodynamics of irreversible processes*. Wiley & Sons, New York.
- Primmer, C. 2012: Saimaan lohi – erään pienen populaation tarina. Esitelmä 23.8.2012 Luonnonsuojelugeneetikaa ympäristöammattilaisille (ConGRESS) -seminaarissa. Suomen ympäristökeskus.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, A., Chapin, F.S., Lambin, E.F., Lenton, T.M., Scheffer, M., Folke, C., Schnellhuber, H.J. ym.: A safe operating space for humanity. *Nature* 461:472–475.
- Schlesinger, W.H., Cole, J.J., Finzi, A.C. & Holland, E.A. 2011. Introduction to coupled biogeochemical cycles. *Front. Ecol. Environ.* 9(1): 5–8.
- Schneider, E.D. & Kay, J.J. 1995. Order from disorder: the thermodynamics of complexity in biology. Teoksessa Murphy, M.P. & O'Neill, L.A.J. (toim.): *What is life? The next fifty years. Speculations on the future of biology*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Schrödinger, E. 1944. *What is Life? The physical aspect of the living cell*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Sciubba, E. 2004: From engineering economics to extended exergy accounting: a possible path from “monetary” to “resource-based” costing. *Journal of Industrial Ecology* 8(4): 19–40.
- Shannon, C. & Weaver, W. 1949. *The mathematical theory of communication*. Urbana: University of Illinois Press.
- Thompson, K. 2010: *Do we need pandas? The uncomfortable truth about biodiversity*. Green Books, UK.
- Vihervaara, P. 2011. Mitä tiedetään biodiversiteetin ja ekosysteemipalveluiden välisistä suhteista? *Luonnon Tutkija* 115(3): 91–97.
- Watson, J.D. & Crick, F.H.C. 1953. A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid. *Nature* 171, 737–738.
- Wicken, J.S. 1987: *Evolution, thermodynamics, and information: Extending the Darwinian Program*. Oxford University Press. New York.

**Kirjoittaja on filosofian tohtori ja Suomen ympäristökeskuksen (SYKE) erikoistutkija**