

# Jätteet ja nielut

**Kaikki elävät järjestelmät tuottavat väistämättä jätettä. Tämä johtuu energian ja aineiden muunnoksia hallitsevasta entropiaperiaatteesta. Jotta jäte ei tukahduttaisi järjestelmien toimintaa, niille tarvitaan useanlaisia nieluja: yhtäältä jäte on johdettava pois sieltä, missä se syntyy, toisaalta se on sijoitettava jonnekin, missä se ei aiheuta haittaa. Evoluutio on tuottanut maapallon elämälle tyydyttävät nielut. Voidaanko sama saavuttaa yhteiskunnallisen prosessin tuottamille jätteille?**

Jäte on biologisen prosessin väistämätön tuote. Jäte on yhtä lailla yhteiskunnallisen prosessin väistämätön tuote. Minkäänlaista elävää järjestelmää ei voi olla ilman, että sen elintoiminnot tuottavat jätettä. Jätteen synnyn fysikaalinen perusta on entropiaperiaate: elämän prosessit tekee mahdolliseksi se, että intensiivisessä muodossa oleva vapaa energia ja organisoitunut materia muuntuvat vähemmän järjestyneiksi pitäen muunnosten voimin yllä elämän prosesseja<sup>1</sup>. Luonto ja talous – ekologia ja ekonomia – ovat entropiaperiaatteen osalta samankaltaisia, mutta niiden välillä on olennaisia eroja esimerkiksi siinä, miten jätteelle käy.

Ekologian ja ekonomian yhtäläisyydet ovat korostuneet 1900-luvun jälkipuoliskolta lähtien sitä mukaa kun on vahvistunut näkemys, että ekologiset olosuhteet määrittävät yhteiskuntien toimeentuloa. Kulttuurin tutkija Raymond Williams kiteytti yhtäläisyyden toteutumukseen: ”Meillä ei esimerkiksi teollisuuden kohdalla ole enää varaa puhua siitä, että auto on tuote, mutta romuttamo sivutuote...”<sup>2</sup> Williams nosti autoteollisuudelle malliksi ekologisen kiertokulun: luonnon prosessien tuotteet palautuvat ympäristöön, missä ne ovat tarjolla kiertokulun seuraavalle vaiheelle. Eikö teollisen tuotannon tulisi toimia samoin? Voiko inhimillinen tuotanto olla periaatteiltaan erilaista kuin tuotanto muualla luonnossa?

Elämän prosessit edellyttävät kahdenlaisia aineksia: energiaa käyttövoimaksi sekä materiaaleja kuten ravinteita rakennusaineiksi. Energia virtaa prosessien läpi ja hajaantuu ympäristöön, lopulta maapallon ulkopuoliseen avaruuteen. Materiaalit muuntuvat elämän prosessin edellyttämiin muotoihin ja kuluvat prosessissa jätteeksi, mutta mikäli kierto toimii, ne tulevat uudelleen tarjolle. Sekä energia että materiaalit ovat peräisin elämän yksiköiden ulkopuolelta, mutta tämä vaatii täsmennystä: sisäpuolen ja ulkopuolen raja on tulkinnanvarainen. Elämä ja ympäristön ainekset ja prosessit, joista elämä on riippuvainen, kuuluvat erottamattomasti yhteen. Lähde ja nielu ovat tässä olennaisia käsitteitä. Ne tulee tulkita sananmukaisesti: elämän prosessin tarvitsemat ainekset

ovat peräisin lähteistä, ja tarpeettomat jätteet päätyvät nieluihin.

Tästä yhteenkuuluvuudesta syntyvät kierrot, jotka ylläpitävät elämän prosesseja. Kierrot voi esittää yksinkertaisina kaavioina, mutta todellisuus on monimutkainen: kiertojen mekanismit ovat täsmällisesti määräytyneitä kemiallisia reaktiota, jotka kietovat organismien elintoiminnot ja ympäristön ainekset yhteen. Erityisen ongelman muodostavat jätteet, joita prosessissa väistämättä syntyy. Ne joko tulevat kiertojen avulla hoidetuksi nieluun, tai ne aiheuttavat kiertoon tukoksen, jos nielu on ahdas.

## Metabolia

On hyödyllistä erottaa toisistaan elämä ”olioina” sekä virrat, jotka pitävät näitä olioita yllä. Tästä muodostuva kokonaisuus on metabolia, aineenvaihdunta. Metaboliaa jäsentävät lähteet ja nielut. Kun organismien metaboliaa tutkitaan ikään kuin ”puhtaassa muodossa” laboratorioon eristettyinä, organismien soluja ylläpitävät prosessit voivat vaikuttaa itsenäiseltä systeemiltä, joka saa aineksensa organismin ”ulkorajan” läpi toteutuvan aineenvaihdunnan välityksellä. Tällaisen näkökulman mukaan lähteet ja nielut ovat organismin ulkopuolella. Ne ovat kuitenkin olennainen osa täsmällisesti määräytyneiden, biokemiallisten reaktioiden välittämien prosessien sisäistä dynamiikkaa.

Otan esimerkiksi kaasujen vaihdon: hengitämme sisään happea ja ulos hiilidioksidia. Happi muuntuu hiilidioksidiksi, kun ravintoaineet hapettuvat kehon kudosten soluissa. Happi kulkeutuu kudoksiin molekyyleinä, jotka ovat kiinnittyneet veren punasolujen hemoglobiiniin. Palamisen tuottama hiilidioksidi puolestaan sitoutuu vereen useassa eri muodossa ja kulkeutuu keuhkoihin, missä se vapautuu hengitysilmaan ja sitä tietä ulos kehosta.

Verenkierto ja soluhengityksen kaasujen vaihto muodostavat tarkoin säädellyllä fysiologisen kokonaisuuden.

Verisolujen ja veren plasman biokemia luo soluhengitykselle hapen lähteen ja hiilidioksidin nielun. Prosessin toiminta vaatii, että sääntely on nopeaa ja tarkkaa: kaasut siirtyvät verenkierron hiussuonten ja kudosten solujen välillä molekyyli kerrallaan. Siirtymisen mekanismi on biokemiallinen lähde–nielu–dynamiikka.

Suuremmissa mittakaavassa hengittämisen edellytys on kaikille happea tarvitseville elämän muodoille tietenkin ilmakehä, joka on maapallon laajuinen hapen lähde ja hiilidioksidin nielu<sup>3</sup>. Kasvit sitovat yhteyttäessään hiilidioksidia ja tuottavat happea, kun taas hengitys – myös kasvien hengitys – kuluttaa happea ja tuottaa hiilidioksidia. Yhteyttäviä organismeja, aluksi syanobakteereita, ilmaantui maapallolle runsaat kolme miljardia vuotta sitten, ja hapen pitoisuus ilmakehässä alkoi kasvaa runsaat kaksi miljardia vuotta sitten<sup>4</sup>. Ilmakehä on ollut hapen ja hiilidioksidin osalta sekä lähde että nielu riippuen siitä, onko määrittelyyn kiintopiste yhteyttäminen vai hengitys. Ilmakehän kaasupitoisuuden ja organismien elintoimintojen tiivis yhteys on tuottanut dynaamisen vakaan tilan, joskin sekä hapen että hiilidioksidin pitoisuudet ovat geologisten ajanjaksojen kuluessa vaihdelleet varsin paljon<sup>5</sup>.

Lähteiden ja nielujen välinen suhde ei ole symmetrinen, koska ravinteet ja jätteet ovat organismien fysiologiassa toisilleen vastakkaista laatua: toista tarvitaan, toisesta pitää päästä eroon. Lisäksi monet metabolian jätteet ovat suoranaisesti haitallisia organismien elintoiminoille. Ne täytyy pitää tiukasti elimistöstä eristettyinä, ja jätteiden kasautumisen aiheuttamat tukokset täytyy kyetä estämään.

Näin ollen jätteellä on erityinen merkitys organismien fysiologiassa: jäte tuottaa ongelmia, mikäli sille ei ole systeemin piirissä nielua. Jätteestä täytyy päästä eroon siirtämällä se systeemin ulkopuolelle. Seuraava kysymys onkin, voiko jätettä kasautua ympäristöön niin paljon, että siitä seuraa uudenlaisia ongelmia. Jätteen haittojen torjuminen vaatii toisin sanoen usean tasoisia nieluja: esimerkiksi soluhengityksen hiilidioksidille verenkierto muodostaa fysiologian sisäisen nielun, ja ilmakehä on sille globaali nielu. Yhteyttäminen ja hengityksen välisen dynaamisen suhteen turvin ilmakehän nielu ei ole ahdas.

Metaboliaa pitää yllä energia, joka virtaa elämän yksiköiden läpi ulkopuolisesta lähteestä ulkopuoliseen nieluun. Biokemisti Franklin Harold esittelee bioenergeetiikan peruskaavan seuraavasti: elämän yksiköiden läpi virtaava energia ylläpitää 'metabolista työtä', jonka voimalla elintoiminnot toteutuvat. Ylivoimaisesti tärkein energian muoto, joka on elämän prosessien hyödynnettävissä, on auringon säteily. Yhteyttäminen muuntaa säteilyenergian välivaiheiden kautta hiiliyhdisteiden sidosenergiaksi. Kemiallinen sidosenergia on täysin rinnasteista muihin energian muotoihin. Sen muuntuminen reaktioissa, jotka pitävät yllä solujen elintoimintoja, on tarkoin säänneltyjen prosessien tulos.<sup>6</sup>

Elämän energiatalouden olennainen piirre on prosessien hienopiirteinen tarkkuus. Esimerkiksi yhteyttä-

minen tapahtuu kvanttimitakaavassa: auringon säteilyn fotonit virittävät viherhiukkasissa elektroneja yksi kerrallaan korkeammalle energiatasolle. Entsyymit ohjaavat metabolian reaktioita erittäin tehokkaasti ja täsmällisesti. Energian käytön hyötysuhde on paras silloin, kun muunnokset tapahtuvat mahdollisimman pienin askelin. Organismien elintoiminnot lähenevät tällaista periaatetta.

## Ekologiset kierrot

Organismien aineenvaihdunnan prosessit ovat evoluution tuottamia. Prosessien tehostumiseen johtanut luonnonvalinnan paine on ollut erittäin vahva siitä lähtien, kun biologian funktionaalisesti tärkeimmät piirteet, geenit, proteiinit ja kalvorakenteet, vakiintuivat ehkä kolme ja puoli miljardia vuotta sitten<sup>7</sup>. Nestemäinen vesi on elämälle välttämätöntä, mutta empiiristä aineistoa ei ole siitä, missä olosuhteissa ensimmäiset elämän muodot saivat alkunsa.

Elämän varhaiset vaiheet tuottivat useita suuria muutoksia koko planeetan ympäristöön, sillä aineenvaihdunnan tehostuminen muutti vastaavasti myös ympäristöä<sup>8</sup>. Mikro-organismien valtavan nopean lisääntymiskyvyn ansiosta elämän vaikutuspiiri laajentui nopeasti kaikkialle planeetan vesiympäristöihin. Kuivalle maalle elämä levittäytyi paljon myöhemmin, ehkä 800 miljoonaa vuotta sitten. Organismien metabolian tehokkuus aiheutti ongelmia: koska maapallolla on kaikkea ainesta rajallinen määrä, ravinteista ilmeni pulaa. Ratkaisuksi kehittyi eri organismiryhmien työnjakoon perustuvia ravintoketjuja, joiden voimin ravinteet säilyvät ekologisissa kiertokuluissa. Metabolian tärkeimmät yhdisteet ja prosessit ovat samat kautta koko eliökunnan, mikä on tukenut kiertojen vakiintumista.<sup>9</sup>

Kiertoja pitävät yllä esitumalliset mikro-organismit kuten bakteerit ja arkeonit; niiden ominaiset metaboliat muodostavat toisiaan täydentäviä ravinteita välittäviä järjestelmiä. Kierrot ovat elämän historiassa vanhaa perua, ja esitumalliset mikro-organismit ovat kiertoja ylläpitäviä agentteja<sup>10</sup>. Monisoluiset organismit ovat kehittyneet mikro-organismien tuella – niiden aineenvaihduntaa sääntelevät kehämäiset biokemiallisten reaktioiden ketjut ovat alun perin vakiintuneet esitumallisten mikro-organismien yhteispelissä.

Jätteet muodostivat ongelman jo varhain, ja ne oli saatava siirrettyksi syrjään. Biokemisti Nick Lane käyttää esimerkkinä viinin käymistä: alkoholipitoisuuden maksimi on noin 15 %, koska käymisen tuote alkoholi tukahduttaa prosessin. Elämä on oletettavasti kohdannut alkuvaiheissaan vastaavan ongelman useaan otteeseen. Onpa elämä syntynyt millaisissa olosuhteissa tahansa, uudenlaisten prosessien tuotteet ja jätteet eivät ole voineet jäädä sekoitukseksi, jossa prosessin uudistumista tukeva liikevoima hiipuisi. Tarvittiin nieluja.<sup>11</sup>

Solukalvo on ollut elämän vakiintumisen tärkeä edellytys, koska se eristää elävien yksiköiden fysiologian välittömästä ympäristöstään sekä välittää aktiivisesti ainesten

## ”Maapallon rajallisuus on todennäköisesti muodostunut ongelmaksi varsin pian elämän synnyn jälkeen.”

vaihtoa soluun sisään ja solusta ulos. Kalvoon sisältyy erikoistuneiden proteiinien muodostamia huokosia, jotka toteuttavat aineiden siirtymisen.

Aineiden kierrot ovat laajentuneet maapallonlaajuisiksi biogeokemiallisiksi kierroiksi, joiden varantoina toimivat sekä ilmakehä että meret. Maapallon rajallisuus on todennäköisesti muodostunut ongelmaksi varsin pian elämän synnyn jälkeen. Ravintoketjuina toteutunut organismiryhmien työnjako (tuottajat – kuluttajat – hajottajat) on oletettavasti vakiintunut varhain, ehkä mikro-organismien valtavan lisääntymiskyvyn mahdollistaman itseorganisoinnin tuloksena.<sup>12</sup>

Elämän prosessien muutokset ovat tuottaneet maapallon olosuhteissa murroksia, mistä hapen kasautuminen ilmakehään on tunnettu esimerkki. Happi tuotti ”ekokatastrofin” niille elämän muodoille, jotka menestyvät vain hapettomissa olosuhteissa, mutta asetelmalla on myös toinen puoli. Kun yhä useammanlaiset organismit omaksuivat hapen hengittämiseen perustuvan tehokkaan metabolian, elämän kokonaistilavuus maapallolla laajeni olennaisesti. Ratkaiseva askel oli aiotumallisten organismien synty ja uuden energetiikkaa säätelevän yksikön, mitokondrion, vakiintuminen endosymbioosin tuloksena solujen osaksi.<sup>13</sup>

Globaalit biogeokemialliset kierrot osoittavat elämän voiman: nykyisenkaltainen maapallo on tulos yhteisevoluutiosta, jonka osapuolia ovat olleet elämänmuodot ko-

konaisuutena sekä epäorgaaninen fysikaalis-kemiallinen ympäristö. Nykyiset olosuhteet, joissa elämä kukoistaa, ovat elämän itsensä tuottamat. Jätteiden eliminointi on kokonaisuuden olennainen osa; siihen tarvitaan sekä prosessien sisäiset nielut jätteen eristämiseksi aineenvaihdunnan piirissä että globaalit nielut, joissa jätteelle on riittävästi tilaa.

### Voiko talous jäsentyä kierroksi?

Inhimillinen talous on ilmaantunut valmiiksi katettuun pöytään: kattaus on runsaat kolme miljardia vuotta kestäneen biologisen evoluution tulos. Ihmisille on ollut tarjolla käyttökelpoisiksi muokattuja hyödykkeitä, jotka on ensimmäiseksi otettu tuotannon piiriin. Ihmiskunnan vaikutus globaaliin ekologiaan pysyi pitkään vähäisenä. Voimaperäinen vaikutus alkoi noin 10 000 vuotta sitten, jolloin vakinaiset paikoilleen asettuneet viljely-yhdyskunnat ja kaupunkimaiset asutukset saivat alkunsa.

Taloudellisia systeemejä ylläpitää energia, joka virtaa lähteistä nieluihin. Nicholas Georgescu-Roegen asetti keskeiseksi tavoitteekseen analysoida tuotantoa prosessina siten, että materiaaliset ehdot, siis sekä energian että aineiden käyttö tuotannossa, sisältyvät tarkasteluun<sup>14</sup>. Hän jäseni tuotantoprosessin rakenteellisia ehtoja kolmella toisiinsa nivoutuvalla käsitteellä. Perinteisesti käytetyn käsiteparin muodostavat varanto (*stock*) ja virta (*flow*). Varanto käsittää sen, mitä tiettyyn tuotantoprosessiin tarvittavista aineksista kaiken kaikkiaan on saatavilla. Virta käsittää sen, mikä on käytössä aikayksikköä kohden. Virta on sidoksissa aikaan: eilisen tai huomisen virtaa ei voi käyttää tänään.

Georgescu-Roegenin omaperäinen käsite on tuotannon tukirakenteisiin viittaava *fund*; se käsittää sellaiset ainekset, jotka ovat läsnä tuotantoprosessissa ja luovat sen välttämättömän perustan, mutta eivät sisälly tuotteiden lopulliseen hahmoon. Esimerkiksi teollisessa tuotannossa tällaisiin aineksiin sisältyvät maapohja, rakennukset, koneet ja työvoima. Keinokastelun järjestelmä havainnollistaa näiden kolmen käsitteen keskinäisiä suhteita: *stock* on käytettävissä oleva vesimäärä, *flow* on virta aikayksikössä, ja *fund* on kanavien ja patojen muodostama koko prosessin perusta. Perusta (*fund*) säilyy tuotantoprosessissa periaatteessa muuttumattomana, mutta vain mikäli sitä korjataan ja huolletaan tarpeen mukaan. Osa prosessiin johdetuista energiasta ja aineksista kuluu perustan ylläpitämiseen.

Georgescu-Roegen loi tuotantoprosessin yleisiä piirteitä kuvaavan mallin, jonka perustana on virtojen (*flow*) ja perustan (*fund*) yhteisvaikutus<sup>15</sup>. Perustan (*fund*) aineksia ovat maapohja, sijoitettu pääoma sekä työvoima. Virtoja (*flow*) suuntautuu sekä prosessiin sisään (*input*) että prosessista ulos (*output*). Sisään virtaavat luonnonvoimien tuottamat asiat kuten auringonpaiste ja sade, tuotteiden osaksi muuntuvat raaka-aineet sekä laitteistojen ja työvoiman toiminnan edellyttämät ainekset. Ulos virtaavat tuotteet ja jätteet.

Mallin kohde on *tuotannon prosessi*, jossa aika on sisäistyneenä. Erityisen tärkeitä ovat perustan (*fund*) aikaan sidotut ominaisuudet. Monet perustan ainekset ovat aktiivisia vain osan koko prosessin kuluista. Tämä korostuu maataloudessa: erikoistuneet laitteet kuten kylvökoneet ja leikkuupuimurit ovat toimeettomina suuren osan vuotta. Teollisen tuotantoprosessin osista on helpommin luotavissa jatkumo, joka on jatkuvasti käynnissä. Yksittäisiä tuotannonaloja laajemmalle ulottuvan kierron edellytys on, että eri alojen prosessit muotoutuvat ketjuiksi. Massiivisia koneita käyttävän ”savupiipputeollisuuden” piirissä tämä on hankalaa, mutta IT-perustainen automaatio ja bioteknologia avaavat kiertotaloudelle uudenlaisia mahdollisuuksia tekemällä tuotannon perustan (*fund*) paljon aiempaa joustavammin muuntuvaksi.<sup>16</sup>

Toisenlaisen näkökulman talouteen kiertoliikkeenä tarjoaa ajatus, että talous kokonaisuutena muodostaa kierron, jonka vastakkaisina kohtioina toimivat tuotanto ja kulutus. Sen toivat talousteoriaan ranskalaiset fysiokraatit: erityisesti François Quesnay (*Tableau Economique*, 1758) vaikutti suuresti 1800-luvun poliittiseen taloustieteeseen (David Ricardo, Karl Marx). Klassisen ajatuksen mukaan kierrolle tarjoavat liikevoiman maa (mukaan lukien luonnonvarat) sekä työ. Ne sekoittuvat fysikaalisessa mielessä erottamattomasti toisiinsa ja vaikuttavat aina yhdessä. Inhimillinen kyky tehdä työtä on ihmiskehon fysiologian välityksellä osa luonnon tuotavaa voimaa, ja työvoiman ylläpitämiseksi tarvitaan luonnon tuottamia hyödykkeitä kuten ravintoa, vaate- tusta, suojaa, ja niin edelleen.

Kun analyysi kohdistuu talouteen kokonaisuutena, peruskäsitteet asettuvat väistämättä korkealle abstraktiotasolle. Joseph Schumpeter totesi taloudellisen analyysin historiikissaan, että talouden kokonaisuutta on tarkasteltu aikojen saatossa käyttäen perustana joko tavaroiden tosiasiallisia aineellisia hahmoja (’reaalianalyysi’) tai tavaroiden markkinoilla ilmeneviä vaihtoarvoja (’monetaarinen analyysi’). Reaalianalyysi hallitsi talousajattelua Aristoteleesta suunnilleen 1600-luvun alkuun asti; muu tuskin olisi ollut mahdollista rahan välittämän vaihdon suhteellisen kehittymättömyyden vuoksi. Uudemmassa talousajattelussa näkökulmien suhteet vaihtelivat, kunnes monetaarinen analyysi tuli hallitsevaksi 1800-luvun loppupuolella. Schumpeter arvioi, että kehittyneen talouden kiertokulun analyysille ei ole käytännössä muuta vaihtoehtoa kuin monetaarinen analyysi: koko taloudesta voi luoda kokonaiskuvan ainoastaan käyttämällä pientä määrää aggregoituja muuttujia, joiden perustana ovat yhteismitalliseksi oletetut hinnat.<sup>17</sup>

Pääomalla on koko taloudessa kahtalainen rooli, joka on tavallaan käänteinen edellä kuvatulle asetelmalle: pääoma voi olla jotakin, mikä siirtyy joustavasti kohteesta toiseen (rahoituspääoma), tai se voi olla sidottu tietyn prosessin koneisiin ja laitteisiin (tekninen pääoma)<sup>18</sup>. Rahoituspääoma on irrallaan tuotannon aineellisesta hahmosta vastaavalla tavalla kuin monetaa-

**”Taloudellinen ajattelu on etäännytynyt tuotannon aineellisesta taustasta. Vaihtoarvojen välityksellä tavarat muuntuvat toisikseen talouden itseriittoiseksi ja suljetuksi oletetussa kehäliikkeessä.”**

rinen analyysi on irrallaan tuotteiden materiaalisista hahmoista.

Asetelma heijastaa sitä, että taloudellinen ajattelu on etäännytynyt tuotannon aineellisesta taustasta. Vaihtoarvojen välityksellä tavarat muuntuvat toisikseen talouden itseriittoiseksi ja suljetuksi oletetussa kehäliikkeessä. Talouden kiertokulku sulkeutuu itsenäiseltä vaikuttavaksi prosessiksi, jossa tavaroiden vaihtoarvot määräävät kierron kulkua käyttöarvojen sijasta. Kate Raworth esittää tästä perinteisestä taloudellisen kierron käsitteestä terävän kriittisen yhteenvedon; hänen vaihtoehtonsa on ’donitsitalouden’ malli<sup>19</sup>. Se asettuu korkealle abstraktiotasolle, mutta Georgescu-Roegenin perinne, jonka lähtökohtana ovat tuotantoprosessin konkreettiset aineelliset ehdot, tarjoaa mahdollisuuksia vahvistaa mallin konkretiaa. Erityisesti jätteet ovat muodostaneet perinteiselle talousanalyysille ongelman. Ne on sysätty tarkastelun ulkopuolelle ”ulkoisvaikutuksina”, mutta tämä ei ratkaise jätteiden tuottamia aineellisia ongelmia.

Toki jätteiden aiheuttamat ongelmat on teollisen tuotannon piirissä ajoittain havaittu, mutta ne on katsottu ratkaistuviksi, kun tuotannon jatkuvuutta uhanneet tukokset on saatu torjutuksi. Suomalaisittain edustava esimerkki on se, miten puunjalostusteollisuus suhtautui vesien saastumiseen ennen kuin ympäristöongelmista tultiin laajemmin tietoisiksi. Esimerkiksi Etelä-Saimaalla Kaukaan tehdas pääsi perille saastumisen hai-

toista jo 1930-luvulla, kun tehtaan käyttövesi pilaantui. Ongelma ratkaistiin tehostamalla vesien virtauksia, jolloin jätevedet ajautuivat Lauritsalan uimarannoille ja Vuokseen.<sup>20</sup>

Uudempia esimerkkejä tarjoaa vanhentuneiden tuotannon perustaan (*fund*) kuuluvien laitteiden dumpkaus. Esimerkiksi öljyjätti Royal Dutch Shell aikoi 1990-luvun puolivälissä upottaa vanhentuneen öljynporauslauttansa (Brent Spar) Atlantiin, mutta ympäristöliikkeiden voimakas protesti esti aikomuksen toteuttamisen. Elektrooniikkaromun ja vanhentuneiden öljytankkereiden kuljetaminen purettaviksi halvalla työvoimalla kehitysmaissa ovat vastaavia esimerkkejä.

Kiertotalouden kehittämisen tukena ei ole sellaisia rakenteellisia etuja, jotka ovat edistäneet ekologisten kiertojen vakiintumista. Prosessien perusosat eivät ole samalla tavoin yhdenmukaisia, eikä kehityksellä ole ollut tukenaan pitkää yhteisevoluutiota. Lisäksi talouden analysointi perustuu muuttujien karkean tasoiseen aggregointiin, mistä johtuen aggregointien suhde tuotannon materiaaliseen perustaan on epäselvä. Sekä käsitteellinen että teknologinen kehitys on kuitenkin avannut mahdollisuuksia kiertotalouden idean konkretisoitumiselle; Georgescu-Roegenin *flow-fund*-malli on hyvä lähtökohta.

## Nielujen ahtauden anatomia

Nieluilla on tavallaan kaksi hahmoa: yleinen ja erityinen. Yleinen hahmo seuraa termodynamiikan toisen pääsäännön mukaisesta entropiaperiaatteesta. Ympäristössä tarjolla olevia vapaan energian varoja voi käyttää hyväksi vain kerran, ja käyttökelpoisessa muodossa olevat raaka-aineet muuntuvat käytössä jätteiksi, joiden palauttaminen käyttökelpoiseen muotoon on usein mahdotonta. Georgescu-Roegen käytti esimerkkinä auton renkaiden kulutuspuunnan hajaantumista nanohiukkasina teiden varsille. Ei ole mahdollista luoda kiertoa, joka palauttaisi hiukkaset takaisin rengasteollisuuden raaka-aineeksi.

Biologinen evoluutio on ratkaissut jäteongelmat luomalla hienovaraisia biogeokemiallisia kiertoja, jotka ovat mahdollisia sen ansiosta, että elämän perustana ovat pohjimmiltaan yhdenmukaiset prosessit. Talous voi koettaa jäljitellä tätä ratkaisua, mutta samaa tehoa ei ole mahdollista saavuttaa.

Nieluongelman erityisen hahmon muodostavat laadulliset erot erilaisten prosessien yksityiskohdissa. Esimerkiksi autojen romuttamojen koneistot toimivat erilaisen logiikan mukaan kuin puiden runkoja hajottavat sienten ja bakteerien pienoisekosysteemit. Tosin ero on tietysti määrin historiallinen: kivihiihikauden saniaspuiden rungot kasautuivat maaperän sedimentteihin ja muuntuivat aineeksi, jonka nykyisin tunnemme kivihiilenä. Sienet ja bakteerit eivät (vielä) kyenneet hajottamaan ligniiniä.<sup>21</sup> Nykyisin ne kykenevät. Voisiko teknisten kulkuvälineiden materiaalitalous oppia tehokasta kierrätystä, joka jäljittelee ekologisia kiertoja?

Esitän lopuksi luettelomaisen yhteenvedon tilanteista, jotka nostavat esiin nielujen ahtauden erilaisia ilmenemismuotoja.

[1] Energia: vapaa energia virtaa entropiaperiaatteen mukaisesti systeemien läpi. Energian nielu on maapallon systeemin ulkopuolella ulkoavaruudessa. Kuten nykyisin on hyvin tiedossa, olosuhteiden muutokset maapallon pintakerroksen kierroissa voivat olennaisesti vaikuttaa siihen, miten lämmön säteily pois maapallolta järjestyy. Myös materiaalien muuntumista tuotannossa voidaan analysoida entropiaperiaatteen avulla: järjestynyt aines hajaantuu käytössä peruuttamattomasti ympäristöön. Elämä ratkaisee tämän ongelman molekyyli- ja kvanttitmittakaavassa toimivien prosessien turvin; taloudessa ei voida saavuttaa samankaltaista tarkkuutta.

[2] Nielun tukos: prosessi tukahtuu alkuunsa. Tälle sopiva analogia on se, kun unohdan avata savupellin tehdesäni tulen kamiinaan, ja savu tukahduttaa luopaavasti virinnee liekin. Aineenvaihdunnan kierroissa sisään rakennettu nielu on välttämätön. Tämä on ollut evoluution saatossa useaan kertaan ongelma, jonka metabolian strategioiden hienopiirteinen kehitys on ratkaissut.

[3] Nielun täyttyminen: jotain sinänsä tavanomaista ainesta kertyy niin paljon, että nielun funktionaaliset piirteet muuttuvat. Ajankohtaisia esimerkkejä on runsaasti: ilmakehään kertyvä hiilidioksidi aiheuttaa ilmaston lämpenemisen, hapan laskeuma muuttaa maaperän ravinnetalouden dynamiikkaa, ravinteiden kertyminen vesiin muuttaa ekosysteemin rakennetta ja niin edelleen. Vastaavista ongelmista on biosfäärin historiassa useita esimerkkejä.

[4] Nielun häiriöt: myrkyt, joita aineenvaihdunta ei kykene muuntamaan vaarattomaan muotoon. Klooratut hiilivedyt (DDT, PCB) varastoituvat rasvakudoksiin ja aiheuttavat fysiologisia vaurioita, torjunta-aineet kuten neonikotinoidit sekä hormonien tavoin vaikuttavat kemikaalit tuottavat vakavia häiriöitä organismien elintoinnoille ja niin edelleen. Luonnonvalinnan tuottamat mikro-organismien fysiologiset sopeutumukset voivat kyetä neutraloimaan joitakin myrkyjä, mutta eivät kaikkia.

[5] Ei nielu: uudenlaiset hajoamattomat ainekset kasautuvat ja tukkivat silkan määränsä vuoksi ekosysteemien kierron. Muovijätteen kertyminen valtameriin ja merten rannoille on ajankohtainen esimerkki. Myös maaperään kertyy hienoksi jauhautunutta ”mikromuovia”, jonka haittoja ei vielä yksityiskohtaisesti tunneta.

[6] Nielun dynamiikan tukkiutuminen: ympäristö muuttuu suuressa mittakaavassa ihmistoimien kumuloiduvien paineiden seurauksena siten, että ekologisten systeemien vakaus eli ”resilienssi” häiriintyy. Pidän tätä tärkeimpänä biologisen monimuotoisuuden murenemista

aiheuttavana tekijänä. Esimerkiksi metsien käsittely johtaa talousmetsien rakenteen köyhtymiseen siten, että elintavoiltaan erikoistuneen lajiston elintila häviää.

Tässä on myös ”kuudennen sukupuuttoaalton” uhkaa aiheuttavien tekijöiden ydin: ihmisten toiminnot selvästi pahentavat laajojen sukupuuttojen uhkaa, mutta taustalla on monenlaisia haitallisia ympäristömuutoksia. Niiden yhteinen tekijä on maapallon elämän elintilan kaventuminen. Tämä on rinnasteista sille, että ihmis-toimien tuottamien muutosten nielut ovat ahtaita. Kuudennen sukupuuttoaalton uhka on näistä muutoksista korkealla aggregoinnin tasolla esitetty ennuste.

Erot elämän historian aiempiin sukupuuttoaaltoihin on syytä huomioida. Niitä ovat aiheuttaneet maapallon kattavat geofysikaalisten olosuhteiden muutokset kuten asteroidin törmäys sekä laaja-alainen tuliperäinen mullistus. Vaikka nykytilanne on uhkaava, se on näiden aiempien mullistusten tuottamia tilanteita lohdullisempi. Nykytilanne sallii eritellä mahdollisten torjuntatoimien

kohteita; sen sijaan esimerkiksi massiivisen meteoriitin törmäyksen jälkeen mitään ei olisi tehtävissä.

Mitä apua on nielujen ahtauden eri muotojen erittelystä? Annan yksinkertaisen vastauksen: jotta ongelmia kyettäisiin torjumaan, saatikka ratkaisemaan, niitä aiheuttavat erilaiset mekanismit on kyettävä pitämään toisistaan erillään. Yleisluonteiset indikaattorit voivat kuvata kehityksen suuntaa, mutta ne peittävät sisäänsä laadullisesti merkityksellisiä erotteluja. Esimerkiksi monet aineiden käyttöä kuvaavat mittarit perustuvat aineiden painoon, joten niitä hallitsevat painavat ainekset kuten kivi ja sora. Maaperän materiaalien käyttö ei ole vakavin aineiden käytön ongelma; ongelmia aiheuttavat esimerkiksi myrkyt, jotka eivät kiveen verrattuna paina mitään.

Nielujen ahtauden ongelmille tulisi löytää täsmällisiä ratkaisuja. Tuotannon aineiden täsmällinen erittely ja erottelu on tässä olennaista. Kiertotalouden mallit ovat vielä kehityksensä alussa, mutta niiden luomia ihanteita kannattaa vaalia.

## Viitteet

- 1 Ekologisen taloustieteen edelläkävijä Nicholas Georgescu-Roegen (1906–1994) korosti entropiaperiaatetta biofysikaalisen teorian perustana (Georgescu-Roegen 1971). Hän käytti esimerkkinä entropiaperiaatteesta sitä, että ympäristön intensiivisiä vapaan energian varoja voi käyttää vain kerran; kivihiilen polttaminen tuottaa hyödyllistä lämpöä, hyödyntöä lämpöä sekä tuhkaa. Energia ja aine eivät häviä, mutta lämpöä ei saa toista kertaa käyttöön eikä tuhka pala.
- 2 Williams 2003, 65.
- 3 Suuri kirjo mikro-organismeja menestyy ainoastaan hapettomissa (anaerobisissa) olosuhteissa, ja niillä on globaalissa aineiden kierrossa tärkeä rooli. Niiden energia-aineenvaihdunta on periaatteessa samankaltaista mutta yksityiskohdiltaan erilaista kuin happea vaativien organismien.
- 4 Knoll 2003.
- 5 Orgaanista hiiltä on poistunut kierrosta sedimenttikerrostumiin, joista fossiiliset polttoaineet ovat peräisin.
- 6 Harold 1986.
- 7 Knoll 2003, 84.
- 8 Wilkinson 2006; Lenton & Watson 2011.
- 9 Morowitz 1979.
- 10 Knoll 2003, 23.
- 11 Lane 2015, 99–100.
- 12 Lenton & Watson 2011 (luku 16) käyttävät nimitystä *the grand recycling coalition*.
- 13 Lane 2015 esittelee yksityiskohtaisesti mitokondrioiden merkitystä.
- 14 Georgescu-Roegen 1971.
- 15 Sama, luku 9.
- 16 Scazzieri 1999.
- 17 Schumpeter 1954, 276–288.
- 18 Pasinetti & Scazzieri 2008.
- 19 Raworth 2017.
- 20 Haila, Rynänen & Saraste 1971, 100–101. Löysin tiedon puunjalostusteollisuuden tutkimusyksikön Keskuslaboratorion kirjastoon talletetusta lehtiartikkelista (1938). Kirjaston kortistossa oli myös viite ns. Winterin komitean mietintöön vuodelta 1938; viitteen mukaan mietintö kokosi yhteen eri teollisuuslaitoksille suunnatun kyselyn tulokset. Raporttia ei kuitenkaan annettu kirjastosta nähtäväksi, koska sen tiedot olivat ”yhtiöiden omaisuutta” (siis vuonna 1970).
- 21 Wilkinson 2006, 25–26.

## Kirjallisuus

- Georgescu-Roegen, Nicholas, *The Entropy Law and the Economic Process*. Harvard University Press, Cambridge (Mass.) 1971.
- Haila, Yrjö, Rynänen, Timo & Saraste, Matti, *Ei vettä rantaa rakkaampaa. Puunjalostusteollisuus Suomen vesien pilaajana*. Weilin & Göös, Helsinki 1971.
- Harold, Franklin M., *The Vital Force. A Study in Bioenergetics*. W.H. Freeman, New York 1986.
- Knoll, Andrew H., *Life on a Young Planet. The First Three Billion Years of Evolution on Earth*. Princeton University Press, Princeton (NJ) 2003.
- Lane, Nick, *The Vital Question. Energy, Evolution, and the Origins of Complex Life*. W.W. Norton & Company, London 2015.
- Lenton, Tim & Watson, Andrew, *Revolutions That Made the Earth*. Oxford University Press, Oxford 2011.
- Morowitz, Harold, *Energy Flow in Biology* (1968). OX BOW Press, Woodbridge 1979.
- Pasinetti, Luigi L. & Scazzieri, Roberto, *Capital Theory: Paradoxes*. Teoksessa *The New Palgrave. Capital Theory*. Toim. John Eatwell, Murray Milgate & Peter Newman. Macmillan, London 1990, 136–147.
- Raworth, Kate, *Doughnut Economics. Seven Ways to Think Like a 21st Century Economist*. Random House, London 2017.
- Scazzieri, Roberto, *A Theory of Resilient flow-fund Linkages*. Teoksessa *Bioeconomics and Sustainability. Essays in Honor of Nicholas Georgescu-Roegen*. Toim. Kozo Mayumi & John M. Gowdy. Edward Elgar, Cheltenham 1999, 229–256.
- Schumpeter, Joseph, *History of Economic Analysis* (1954). Routledge, London 1986.
- Wilkinson, David M. *Fundamental Processes in Ecology. An Earth Systems Approach*. Oxford University Press, Oxford 2006.
- Williams, Raymond, *Luontokäsitykset*. Teoksessa *Luonnon politiikka*. Toim. Yrjö Haila & Ville Lähde. Vastapaino, Tampere 2003, 40–66.