

Ekotoksikologia

1

2

3 *Ympäristön kemikalisoitumisen vaikutukset eliöihin ja eliöyhteisöihin*

4

5 Mikko Nikinmaa

6 Biologian laitos

7 Turun yliopisto

8

9

10	sisällysluettelo:
11	Esipuhe
12	1. Johdanto – mitä ekotoksikologia on
13	1.1. Historia ja nykyiset päähaasteet
14	1.2. Ekotoksikologian päämäärät
15	1.3. Monien tieteenalojen sulatusuuni
16	1.4. Ekotoksikologian yhteydet
17	1.4.1. Riskinarviointi ja toksisuustestaus
18	1.4.2. Ympäristöetiikka
19	1.4.3. Ympäristöekonomia
20	1.4.4. Ympäristöpolitiikka
21	2. Ympäristön pilaantumista aiheuttavat tekijät
22	2.1. Yleiset piirteet
23	2.2. Metallit, metalloidit ja organometalliyhdisteet
24	2.3. Muut epäorgaaniset yhdisteet
25	2.4. Orgaaniset yhdisteet
26	2.4.1. Öljy ja sen komponentit
27	2.4.2. Tuholaismyrkyt
28	2.4.3. Halogeenejä sisältävät yhdisteet
29	2.4.4. Hormonihäiritsijät
30	2.4.5. Lääkeaineet ja henkilökohtaisen hygienian hoitotuotteet
31	2.4.6. Puunjalostusteollisuuden jätevedet
32	2.5. Nanomateriaalit
33	2.6. Säteily
34	2.6.1. Radioaktiivinen säteily
35	2.6.2. UV-säteily
36	2.6.3. Muu lyhytaaltainen säteily
37	2.7. Geenimuuntelu
38	3. Kemikaalien kulkeutuminen ympäristössä
39	3.1. Aineiden päästöt ja kulkeutuminen
40	3.2. Pitkien matkojen kulkeutuminen
41	4. Ekotoksikologian tärkeimmät tutkimuseliöt ja koejärjestelyt
42	4.1. Mallieliöt ekotoksikologiassa
43	4.2. Tärkeimmät koeasetelmat eliöiden vasteita tutkittaessa
44	4.3. Mikro- ja mesokosmokset
45	4.4. Ekosysteemimanipulaatiot
46	4.5. Tärkeimmät ekotoksikologian tutkimusalat
47	5. Kemikaalien biosaataavuuteen vaikuttavat tekijät
48	6. Kemikaalien kulkeutuminen eliöihin
49	7. Kemikaalit eliössä: kudostakautuminen ja siihen vaikuttavat tekijät
50	8. Biotransformaatio
51	8.1. Faasi 1
52	8.2. Faasi 2
53	9. Eritys selkärangaisista eläimistä
54	9.1. Kemikaalin modifiointi eritettävään muotoon

55	9.2. Eritys virtsassa
56	9.3. Eritys sappinesteessä ja muuten ruuansulatuskanavan kautta
57	9.4. Eritys muiden reittien kautta
58	10. Eritys muista organismeista
59	11. Kemikaalien vaikutukset eliöihin: bioindikaattorit ja biomarkkerit
60	11.1. Geneettiset vaikutukset ja ekotoksikogenomiikka
61	11.2. Vaikutukset lisääntymiseen
62	11.3. Neurotoksisuus
63	11.4. Vaikutukset energia-aineenvaihduntaan
64	11.5. Vaikutukset kalvoihin
65	11.6. Apoptoosi ja nekroosi
66	11.7. Kehitysvaikutukset
67	11.8. Käyttäytymisvaikutukset
68	11.9. Bioindikaattorit ja biomarkkerit
69	12. Ympäristömuutoksien vaikutukset kemikaalien myrkyllisyyteen
70	12.1. Lämpötila
71	12.2. Happi
72	12.3. Suolapitoisuus
73	12.4. Muut abioottiset stressit
74	12.5. Eliöiden väliset vuorovaikutukset
75	12.5.1. Peto-saalissuhde
76	12.5.2. Kilpailu
77	13. Kemikaalien yhteisvaikutukset
78	14. Akuutti ja krooninen myrkyllisyys
79	14.1. Myrkyllisyyden mallinnus
80	15. Kemikaalien vaikutukset populaatioihin
81	16. Kemikaalien vaikutukset yhteisöihin ja ekosysteemeihin
82	17. Ekotoksikologian materiaali
83	17.1. Tärkeitä julkaisusarjoja
84	17.2. Esimerkkejä kirjallisuudesta
85	17.3. Ekotoksikologian sanastoa
86	
87	

88 **Esipuhe:**

89 Ihmisen aiheuttamista ympäristömuutoksista laajin on ympäristön kemikalisoituminen. Ihmisen tuottamia
90 kemikaaleja löytyy jo kaikkialta maapallolta Etelänapamantereen jäätiköitä myöten. Vaikka ympäristöön
91 joutuvien aineiden vaikutukset eivät ylitäkään uutiskynnystä kuin ajoittain, joka hetki ympäristöön pääsee
92 haitallisia kemikaaleja. Tämän vuoksi kansalaisten yleissivistykseen pitäisi kuulua ympäristön
93 kemikalisoitumisen ja kemikaalien haittavaikutusten pääpiirteiden tiedostaminen ja ymmärtäminen. Tähän
94 asti on kuitenkin ollut vaikeaa saada kokonaiskuvaa ekotoksikologiasta, ympäristön kemikalisoitumisen
95 vaikutuksista, koska suomeksi ei ole ollut olemassa minkäänlaista perusteosta aiheesta. Tämän teoksen
96 päämääränä on olla tällainen. Olen pyrkinyt siihen, että tekstin ymmärtäisivät kaikki asiasta kiinnostuneet,
97 mutta että siinä olisi myös alaan aiemmin perehtyneille kiinnostavia näkökulmia. Toivottavasti olen

98 onnistunut tässä. Koska perusteoksen pituuden on pysyttävä rajallisena, olen joutunut karsimaan useita
99 aiheeseen ilman muuta liittyviä osasia omien mieltymysteni mukaan. Toivottavasti se, mitä olen ottanut
100 mukaan, herättää lukijoiden mielenkiinnon laajemminkin. Työhön ovat antaneet arvokkaita kommentteja
101 veljeni Eero Nikinmaa kasvipuolelta, ja Tapio Eeva ja Timo Vuorisalo, jotka ovat tuoneet mukaan ekologian
102 näkökohtia. Tietystikin kaikki virheet ja puutteet, joita työhön on jäänyt, ovat omiani. Toivon, että työ
103 saavuttaa mahdollisimman laajan lukijakunnan, sillä ympäristön kemikalisoituminen koskettaa jokapäiväistä
104 elämäämme monin tavoin ruuan tuotannosta leikkikalujen ostopäätöksiin.

105 1. Johdanto – mitä ekotoksikologia on

106

107 1.1. Historia ja nykyhetken haasteet

108 Nimi ekotoksikologia on vasta vähän yli 40-vuotias – sitä käytettiin ensimmäistä kertaa 1969. Vaikka nimi
109 onkin suhteellisen tuore, ekotoksikologian tutkimuksen kenttä on ollut olemassa aina siitä lähtien, kun
110 ihmisen päästöt rupesivat vaikuttamaan ympäristöön. Niin kauan kuin ihmismäärä säilyi pienenä,
111 vaikutukset pysyivät pienialaisina, mutta niillä saattoi paikallisesti olla suurikin merkitys niin ihmisten kuin
112 eläinten hyvinvoinnille. Yhtenä muinaisista ympäristöongelmista voidaan pitää Rooman vesiputkien
113 aiheuttamaa lyijymyrkytystä. Roomalainen sotilasteknikko ja arkkitehti Vitruvius kirjoitti akveduktien
114 mukana talousveteen tulevan lyijyn haitoista jo ennen ajanlaskun alkua. Roomalaisten luiden lyijypitoisuus
115 on paljon korkeampi kuin nykyihmisten, mikä viittaa siihen, että heillä on todennäköisesti ollut myös lyijyn
116 aiheuttamia hermostollisia häiriöitä. Keskiajan Euroopassa jätehuoltoa tai viemärointiä ei juuri ollut, ja
117 kaupunkien kadut olivat täynnä ihmisvirtsa ja ulosteita, minkä seurauksena niin loiset kuin sairaudet
118 saattoivat levitä räjähdysmäisesti. Tämä oli yksi syy mustan surman (ruton) leviämiseen (kaupungit olivat
119 myös rotille mitä mainioin elinympäristö). Pohjois-Euroopassa kaupunginisät olivat jopa tyytyväisiä
120 toistuviin kaupunkipaloihin, jotka tuhosivat rottakannat ja paransivat hygieniatasoa. Laajamittaisen
121 viemäroinnin yleistyessä 1800-luvulla puhdistamattomat jätevedet laskettiin ympäröiviin vesistöihin.
122 Tilannetta pahensi vesiklosetin käyttöönotto teollisuusmaissa 1800-luvun jälkipuoliskolta alkaen. Tämän
123 seurauksena vesistöt rupesivat rehevöitymään ja jos alajuoksun asujat käyttivät vettä talousvetenään,
124 suolistoperäiset sairaudet kuten kolera levisivät nopeasti. Missä lämmitystä tarvittiin, syntyvät savukaasut
125 ja niiden noki olivat tärkein syy sumuun. Esimerkiksi Lontoon sumut olivat pahimmillaan, kun
126 asuntokohtainen puulämmitys oli vallitseva. Teollistuminen toi mukanaan happaman sateen. Jo 1800-luvun
127 lopulla hiilen poltto Keski-Englannissa aiheutti lohikalasaaliiden vähenemisen Pohjois-Englannin joissa. Kun
128 hiiltä käyttävien tehtaiden savupiippuja pidennettiin, siirtyi hiilen polttamisessa syntynyt rikkidioksidi
129 Skotlantiin ja Norjaan, missä huonosti puskuroitu tunturivesi happamoitui (rikkidioksidista muodostui
130 veden kanssa rikkihapoketta ja rikkihappoa) ja laajalla alueella kaikki kalat kuolivat.

131 Ekotoksikologia selvittää nykyisin pääasiassa ympäristön kemikalisoitumisen aiheuttamia muutoksia.
132 Ympäristön pilaantumisen korjaamisessa on tähän mennessä jo useita menestystarinoita. Ensimmäinen
133 näistä liittyy DDT:hen ja muihin varhaisiin hyönteismyrkkyihin. Rachel Carlson kirjoitti 1962 kirjan ”Äänetön
134 Kevät (Silent Spring)”. Kirjassa esitettiin uhkakuva siitä, miten lintujen määrä romahtaa DDT:n ja muiden
135 hyönteismyrkkyjen käytön seurauksena. Jo vuonna 1874 syntetisoitu DDT otettiin toisen maailmansodan
136 aikana käyttöön tuholaismyrkkinä ja sen arveltiin silloin olevan siunaus ihmiskunnalle. Useat
137 horkkasääskiyhdyskunnat tuhottiin DDT-myrkytyksin ja näin malaria saatiin käytännössä katoamaan
138 Euroopasta. DDT:n tuholaismyrkkyvaikutuksen keksijä, Paul Hermann Müller saikin lääketieteen ja

139 fysiologian Nobel-palkinnon vuonna 1948. Vasta myöhemmin DDT:n käyttöön liittyvät negatiiviset ilmiöt
 140 rupesivat näkymään. Erityisesti ravintoketjun yläpäässä olevien petolintujen kannat romahtivat ympäri
 141 teollistunutta maailmaa. Suomessa muun muassa merikotkan ja muuttohaukan kannat pienenivät.
 142 Merikotkalla ei ollut juurikaan poikasia 1960-1970-lukujen vaihteessa. Muutos tämänhetkiseen n. 350
 143 poikaseen maanlaajuisesti on huimaava. Laboratoriokokeet osoittivat, että ennen muuta DDT:n
 144 johdannainen DDE vaikuttaa kalkkiaineenvaihduntaan, minkä seurauksena munien kalkkikuori ohenee ja ne
 145 rikkoontuvat helposti jo haudonnan aikana. Kun pystyttiin osoittamaan, että erityisesti petolintujen
 146 poikastuotanto pieneni ja että pienentyneeseen poikastuotantoon liittyi munankuorien ohentuminen, alkoi
 147 päättäjäienkin mielipide muuttua DDT:n kieltoa kannattavaksi – suurelta osin varmaan Rachel Carlsonin
 148 kirjan maailmanlaajuisen menestyksen ansiosta.

149 Elohopean vaikutukset tulivat erityisen selvästi näkyviin Japanissa tapahtuneen Minamata-katastrofin
 150 yhteydessä. Kymmenien – jopa satojen - ihmisten kuolema elohopeamyrkytykseen, kun tehtaan
 151 puhdistamattomat jätevedet laskettiin lahteen, jonka vettä ja eliöitä paikalliset asukkaat käyttivät, riitti
 152 herättämään yleisen mielipiteen elohopeapästäjä vastustavaksi. Muutos näkyi Suomessa erityisesti siinä,
 153 että aiemmin siemenvilja ”peitattiin” elohopealla (eli kaikkien vieraiden organismien kasvu jyvien pinnalla
 154 estettiin elohopealla), mutta tämä kiellettiin. Elohopeaa sisältävien loisteputkien ja nykyisin myös
 155 pienoisloisteputkien (joita energiansäästölamputa on suuri osa) keräilyä tehostettiin.

156 Vielä 1960-luvun lopussa ja 1970-luvun alussa Suomen ja Ruotsin metsäteollisuuden jätevedet vastasivat
 157 suunnilleen yli sadan miljoonan ihmisen jätevesikuormaa. Tuolloin esimerkiksi Näsijärvi ja Etelä-Saimaa
 158 olivat suurelta osin vaahtoavaa ja haisevaa aluetta. Kalat viihtyivät huonosti puunjalostusteollisuuden
 159 jätevesien pilaamissa vesistöissä ja Itämeren alueen hylkeistä suuri osa oli lisääntymiskyvyttömiä. Kun
 160 tuolloin teollisuusjohtoa haastateltiin, paperituotannon negatiivisille ympäristövaikutuksille ei ollut
 161 tehtävissä mitään. Kuitenkin 1970-luvulta alkaen aluksi keskieurooppalaiset ja englantilaiset paperin
 162 kuluttajat ja muutaman vuoden viipeellä pohjoismaalaisetkin rupesivat vaatimaan vesistöystävällisempää
 163 paperia. Tämän tuloksena paperin valmistuksen prosessit ovat muuttuneet niin, että tällä hetkellä
 164 ympäristökuorma tuotettua yksikköä kohti on selvästi alle prosentin 1970-lukuun verrattuna. Nykyisin
 165 voidaankin lohikaloja menestyksekkäästi istuttaa Näsijärveen ja Itämeren hyljekannat ovat kasvaneet
 166 kalastajille riesaksi asti.

167 Hapan laskeuma oli 1980-luvun suurimpia ympäristöongelmia Pohjoismaissa. Vallitsevien lounaistuulien
 168 takia Englannin ja muun Länsi-Euroopan teollisuuden savukaasut tulivat aluksi erityisesti Norjaan, mutta
 169 myöhemmin myös Ruotsiin ja Suomeen. Savukaasut sisälsivät merkittäviä määriä rikin ja typen oksideja ja
 170 tuloksena olikin, että sateeseen muodostui paljon rikkihapoketta ja –happoa sekä typpihappoa. Kun
 171 Fennoskandian vedet ovat huonosti puskuroituja (sisältävät vain vähän karbonaatteja), hapan laskeuma
 172 aiheutti voimakkaita veden pH-muutoksia jopa 4.5:een (neutraalin veden pH on 7). Ensin katosivat Norjasta
 173 tunturijärvien lohikalat ja sitten muualtakin Fennoskandiasta lohikalojen lisäksi useista vesistöistä –
 174 erityisesti pikkujärvistä - ravut ja särkikalat. Happaman laskeuman aiheuttamat biologiset muutokset toivat
 175 ensi kertaa Suomessa yhteen niin perus- kuin soveltavan tutkimuksen rahoittajat ja niin valtion
 176 tutkimuslaitoksien kuin yliopistojen tutkijat suuren Hapro-tutkimusohjelman puitteissa.
 177 Tutkimusohjelmassa tehtiin merkittävässä määrin kansainvälisestikin korkeatasoista työtä happamasta
 178 laskeumasta ja sen biologisista vaikutuksista Suomessa niin metsiin kuin vesistöihin. Yksi näkyvistä
 179 aikaansaannoksista oli Springerin kustantamana ilmestynyt kirja ”Acidification in Finland”. Voimakkaan
 180 tutkimuspanostuksen ja näkyvien vaikutusten tuloksena ruvettiin edellyttämään rikinpoistoa
 181 savukaasuista. Samanaikaisesti ruvettiin käyttämään entistä vähärikkisempiä hiili- ja öljylaatuja. Tämän

182 tuloksena happamoituminen on ympäristöongelmana jokseenkin poistunut Euroopasta ja Pohjois-
183 Amerikasta. Aiemmin happamoituneissa Suomen pikkujärvissä on taas elinvoimaisia kalakantoja.
184 Happamoituminen ongelmana on siirtynyt Kiinaan ja muualle Itä-Aasiaan. Yli puolet Kiinan
185 energiantuotannosta saadaan hiilestä ja voimalaitoksien savukaasut tulevat taivaalle lähes
186 puhdistamattomina. Tämän seurauksena ilmakehän rikki- ja typpioksidi- sekä pienhiukkaskuormat ovat
187 suuria.

188 Bensiniin lisätyn lyijyn alettiin autoliikenteen kasvaessa huomata esiintyvän tienvarsien eliöissä korkeissa –
189 jopa akuutin lyijymyrkytyksen aiheuttavissa – pitoisuuksissa. Tämän havainnon jälkeen ruvettiin enenevässä
190 määrin etsimään korvaavia aineita lyijyn tilalle ”liukastamaan” polttoainetta. Lyijyn käyttö polttoaineessa
191 kiellettiin ensin Kaliforniassa ja myöhemmin Euroopassa. Kiellon jälkeen tienvarsien eliöiden lyijypitoisuus
192 on laskenut jyrkästi ja metalli yleisenä ympäristöongelmana on käytännössä poistunut Länsimaista. Lyijy
193 haitallisena aineena on kuitenkin jälleen noussut otsikoihin. Lyijyä on käytetty värien komponenttina ja
194 äskettäin jouduttiin Pohjois-Amerikassa vetämään markkinoilta joukoittain kiinalaisia leikkikaluja, joiden
195 lyijypitoisuus ylitti länsimaissa hyväksytyt normit.

196 Johtopäätöksenä voikin sanoa, että haluttaessa ympäristöön liittyvät ekotoksikologiset ongelmat pystytään
197 ratkaisemaan, mutta ratkaisut eivät ole ilmaisia. Kemikaalipäästöjen vaikutusten selvittäminen on
198 ekotoksikologien pääasiallinen tehtäväkenttä: tehtävä työ vaikuttaa suoraan koko maapallon hyvinvointiin.
199 Varhemmin hyväksyttiin yleisesti laimennusperiaate – ihmisen kaikkien toimintojen aiheuttamat
200 kemikaalipäästöt laimenisivat ympäristössä riittävästi, jotta niistä ei olisi haittaa. Puhuttiin esimerkiksi
201 vesistöjen itsepuhdistuskyvystä. Lukuista joukko esimerkkejä kemikaalien ympäristöön joutuneiden
202 pitoisuuksien haitallisista vaikutuksista eliöstöön osoittaa, että laimennusperiaate ei enää ole riittävä, vaan
203 kaiken luontoon joutuvan materiaalin ominaisuudet ja vaikutukset eliöihin on selvitettävä ja päästöt
204 puhdistettava. Näin ollen ekotoksikologien tutkimuspanosta ja asiantuntemusta tarvitaan hyvin paljon.

205 1.2. Ekotoksikologian päämäärät

206 Ekotoksikologian tutkimuksen päämäärät voidaan jakaa tieteellisiin ja käytännön päämääriin. Tieteelliset
207 päämäärät voidaan pelkistää pyrkimykseen ymmärtää, miten kemikaalit vaikuttavat eliöiden ja
208 eliöyhteisöjen toimintoihin. Se, miten tähän ymmärrykseen pyritään, riippuu tutkimusalasta.
209 Tutkimusalasta riippumatta ekotoksikologia on joko takautuvaa tai ennustavaa tutkimusta. Ennustavassa
210 ekotoksikologiassa tärkeällä sijalla on mallien käyttö. Päämääränä on mallien avulla arvioida
211 kemikaalipäästöjen tuleva käyttäytyminen ja vaikutukset. Koska aineet vaikuttavat biokemiallisten
212 reittiensä kautta, eliöiden toiminnan perusmekanismit ja toiminnan säätely täytyy ymmärtää, jotta
213 ekosysteemivaikutuksia voi selvittää parhaiten. On ilman muuta selvää, että ekotoksikologian tieteellinen
214 tutkimus ei ole riippumatonta tutkittavan tieteenalan teoreettisesta ja aikaisempaan tutkimukseen
215 perustuvasta taustasta. Tekniikkojen kehittyminen on viime vuosina mahdollistanut ensinnäkin sen, että
216 pienetkin ympäristön ainepitoisuudet voidaan selvittää, ja toiseksi sen, että eliöiden koko genomin
217 muutokset voidaan selvittää. Tämän takia tuleekin tärkeäksi arvioida, onko mitattavissa olevilla
218 kemikaalipitoisuuksilla biologista merkitystä ja kuvaavatko genomitason muutokset kemikaalien,
219 luontaisten ympäristötekijöiden vaihtelun vai näiden yhdessä aiheuttamia muutoksia. Koska
220 ekotoksikologian päämäärät ovat usein käytännönläheisiä, ovat paikalliset tavoitteet tärkeitä. Pyrkimyksenä
221 on tällöin luoda perusta säätelylle, ympäristöön joutuvien kemikaalien enimmäismäärälle jokaisessa
222 tarkkaan spesifioitussa paikassa tai selvittää, minkälaisia veden- tai ilmanpuhdistuksen keinoja on
223 käytettävä. Takautuvan tutkimuksen avulla voidaan osoittaa, miten ympäristöön jo joutuneet

224 kemikaalikuormat ovat vaikuttaneet ympäristöön aikojen saatossa. Parhaassa tapauksessa ympäristöä on
 225 tutkittu jo ennen pilaantumista, jolloin takautuvan tutkimuksen avulla voidaan näyttää kemikalisoitumisen
 226 aiheuttamat eliöyhteisöjen toiminnan muutokset. Tutkitun ympäristön tuloksien johtopäätöksiä voidaan
 227 siirtää muille alueille.

228 1.3. Monien tieteenalojen sulatusuuni

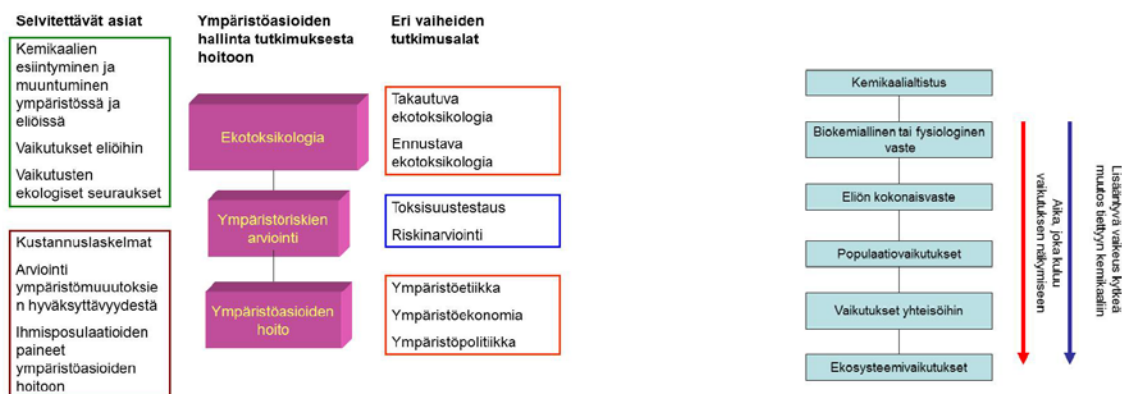
229 Kun ekotoksikologia tutkii kemikaalien vaikutuksia ekosysteemeihin ja tutkimuksella on sekä voimakas
 230 teknologinen että päätöksenteon näkökulma, tulee sen piiriin lukuisa joukko eri tutkimusaloja. Aineiden
 231 kulkeutuminen ympäristössä on fysiikan tutkimusta, johon liittyy sekä hydrologian ja oseanografian että
 232 meteorologian piirteitä, kun sekä veden virtaukset ja merivirrat että vallitsevat tuulet ja muut ilman
 233 virtaukset vaikuttavat aineiden liikkeisiin. Aineiden muuntuminen ympäristössä on tyypillisesti kemian alaa
 234 ja eri puhdistustoimien suunnittelu kemian teknologiaa. Kemikaalien vaikutukset eliöihin ovat
 235 biokemiallista ja fysiologista tutkimusta ja eliöiden välisten vuorovaikutusten ja eliöyhteisöjen
 236 koostumuksen selvittäminen ympäristön pilaantuessa on ekologiaa. Havaittujen muutoksien perinnöllisyys
 237 on luonnollisesti geneettistä tutkimusta. Tutkimusalan sijasta tutkimuksen päämäärä – sen selvittäminen,
 238 miten kemikaalit kulkeutuvat, muuntuvat ja vaikuttavat eliöyhteisössä – tekee työstä ekotoksikologiaa.
 239 Luonnontieteellisen tutkimuksen lisäksi ekotoksikologiaan liittyvä päätöksenteko edellyttää muun muassa
 240 filosofian, etiikan, taloustieteen ja yleisen politiikan tutkimusta. Ekotoksikologian ja perinteisemmän
 241 toksikologian erona on pääosin se, että toksikologia keskittyy ihmiseen vaikuttavien muutoksien
 242 selvittelyyn kun taas ekotoksikologia tutkii luonnoneliöitä ja –ympäristöjä. Silloinkin kun ekotoksikologinen
 243 tutkimus selvittää kemikaalien vaikutuksia ihmiseen, se käsittelee ihmistä osana ympäristöään.
 244

245 1.4. Ekotoksikologian yhteydet

246 Kuva 1. Kemikaaleihin liittyvien ympäristöasioiden hoidon hierarkia tutkimuksesta ratkaisuihin. Kuvassa a.
 247 vasemmalla selvitettävät asiat, keskellä asioiden tutkimuksen ja hoidon hierarkia sekä oikealla hierarkiaan
 248 kuuluvat tutkimusalat. Kuvassa b. kemikaalivaikutusten ajallinen hierarkia.

249 1a

1b



250

251 1.4.1. Toksisuustestaus ja riskinarviointi

252 Koska ekotoksikologia tutkii, miten ympäristön pilaantuminen vaikuttaa eliöihin niiden luonnollisessa
 253 elinympäristössä, ekotoksikologisen tutkimuksen ja toksisuustestauksen välillä on suuri ero.
 254 Toksisuustestauksen päämääränä on se, että samaa kemikaalia tutkittaessa saataisiin sama tulos niin
 255 Australiassa kuin Alaskassa tai niin Kinshasassa kuin Kemissä. Tämän vuoksi toksisuustestauksessa pyritään
 256 vakioimaan kaikki käytettävästä eläinlajista alkaen. Pitkällisen testauksen ja hyväksymismenettelyjen
 257 jälkeen tulokseksi saadaan ISO standardi, jonka mukaan testaus sitten tulisi suorittaa riippumatta
 258 suoritustaikasta ja siellä vallitsevista ympäristöolosuhteista. ISO:n (International Standardization
 259 Organization) www-sivuilla (www.iso.org) ovat tällä hetkellä hyväksytyt standardisoidut toksisuustestit ja
 260 ne voi ostaa tarvittaessa. Näistä poimin seuraavassa kaksi (ISO1706:2000; Aineiden pitkäaikaisen
 261 myrkyllisyyden testaus vesikirpulla, *Daphnia magna* ja ISO7346-1:1996; Aineiden akuutin toksisuuden
 262 testaus makeanveden kalalla (*Brachydanio rerio* Hamilton Buchanan, Teleostei, Cyprinidae): static method).
 263 Molemmissa tapauksissa testin tekijän tulee tehdä ohjeen mukaan kaikki alkaen ”keinotekoisesta” vedestä,
 264 jonka sisältämät suolamäärät, pH ja lämpötila tunnetaan ja käyttää toksisuustestauksessa laajalle levinneitä
 265 lajeja, joita ei välttämättä esiinny luontaisesti lainkaan alueella, jossa työ tehdään. Tämä piirre ei ole
 266 tietenkään haitallinen silloin, kun pyrkimyksenä on ympäristöön joutuvan kemikaalin yleisen myrkyllisyyden
 267 arviointi, mutta se soveltuu huonosti tilanteeseen, jossa pyritään selvittämään, mitä paikallisia vaikutuksia
 268 kemikaalilla on. Jos esimerkiksi toksisuustestin vesi (joka on useimmiten laadittu muistuttamaan Keski-
 269 Euroopan vettä) poikkeaa esimerkiksi metalli-ionipitoisuuksiltaan luonnonympäristön vedestä, tulevat
 270 kaikki tulokset metallien myrkyllisyydestä olemaan ympäristön kannalta epärelevantteja. Samoin veden
 271 humuspitoisuus vaikuttaa huomattavasti eri aineiden myrkyllisyyteen, koska eri humukset sitovat eri
 272 kemikaaleja eri tavoin. Johtopäätöksenä voikin sanoa, että standardisoiduilla toksisuustesteillä on oma
 273 paikkansa ympäristötutkimuksessa, mutta ne ja ekotoksikologinen tutkimus- ja selvitystyö mittaavat
 274 selvästi eri asioita. Toksisuustestauksen tyyppejä (Taulukko 1) ovat esimerkiksi lisääntymistoksikologian
 275 testit, ihon tai silmänärsytystestit ja näihin liittyvät testit, jotka arvioivat hypersensitiivisyyttä kemikaalille,
 276 fototoksisuustestit, jotka pyrkivät selvittämään auringonvalon aiheuttamia myrkyllisyyden muutoksia,
 277 käyttäytymistestit ja kehitystoksikologiset testit. Viime vuosina on enenevässä määrin ruvettu tekemään
 278 sedimenttitoksikologisia testauksia. Yksiselitteisten tulosten saaminen näistä on kuitenkin hyvin vaikeaa,
 279 koska kemikaalin biosaatavuus eri sedimenteistä vaihtelee suuresti. Perinteisten toksisuustestien sijasta on
 280 viime vuosina myös yritetty löytää keinoja, joiden avulla eläinten käyttöä testauksissa voisi vähentää. Täten
 281 esimerkiksi iho- ja silmä-ärsytyksen testauksen sijasta on ruvettu tekemään testejä soluviljelmillä. Erilaisia
 282 reportterimäärityksiä (näissä bakteeriin on ympätty geeni, joka tuottaa valoa kemikaalin vaikutuksesta) on
 283 kehitetty muun muassa metalleille ja hormonihäiritsijöille. Varsinaisen toksisuustestauksen sijasta
 284 käytetään myös ennustavia malleja. Niitä voi kuitenkin käyttää vain, jos ennustettavalle kemikaalille on
 285 voitu määrittää luotettava kvantitatiivinen rakenne-aktiivisuussuhde eli sukulaismolekyylien myrkyllisyys
 286 tunnetaan hyvin.

287
 288 Taulukko 1. Toksisuustestauksen päätyypit.

290		
291	akuutin toksisuuden testaus	yleensä selvitetään lyhytaikaista (24-96 h) tappavaa vaikutusta
292		
293	kroonisen toksisuuden testaus	useissa tapauksissa esim. 30 vuorokauden tappavan
294		myrkyllisyyden selvittäminen
295	osittainen elämänkiertotesti (elinkierto-	selvitetään myrkyllisyys herkeimmiksi arveltujen elämänkierron
296	testi	osalta
297		

298	elämänkiertotesti (elinkiertotesti)	myrkyllisyyden kartoittaminen eliön koko kehityskaaren ajan
299		hedelmäytyksestä sukukypsyyteen
300	lisääntymistoksisuuden testaus	selvittää eliön fertiliteettiä
301		
302	kehitystoksisuuden testaus	selvittää kehityksenaikaisen toksisiteetin ilmenemistä
303		
304	iho- ja silmänärsytyksen testaus	testaa erityisesti kosmetiikassa käytettävien aineiden
305		haitallisuutta
306	fototoksisuuden testaus	selvittää, miten aineen myrkyllisyys muuttuu auringonvalon
307		vaikutuksesta
308	käyttäytymistestaus	selvittää, miten kemikaali vaikuttaa valittuihin
309		käyttäytymispiirteisiin
310	sedimenttitoksisuuden testaus	selvittää sedimenttiin sitoutuneiden kemikaalien myrkyllisyyttä
311		
312	solutoksisuustestit	pyrkivät korvaamaan eläimillä tehtävän testauksen.
313		Huomattava kuitenkin on, että solutestaus ei pysty ottamaan
314		huomioon eri kudosten välisiä vuorovaikutuksia.

315

316

317

318 Ekotoksikologisen tutkimuksen yhteys kemikaalien riskinarviointiin on tiivis. Riskinarvioinnin päämääränä

319 on arvioida mahdollisuus, että arvioitava aine vaikuttaa ympäristöön. Riskien arvioinnissa on ensin

320 selvitettävä, mitkä ympäristössä esiintyvistä monista kemikaalista todennäköisimmin aiheuttavat haittoja.

321 Niiden pitoisuuksia ympäristössä verrataan toisaalta taustapitoisuuksiin ja toisaalta pitoisuuksiin, joiden on

322 aiemmin osoitettu aiheuttavan myrkkävaikutuksia. Riskien arvioinnissa lasketaan usein riskisuhde (risk

323 quotient=RQ), joka on arvioitu ympäristöpitoisuus/ympäristöpitoisuus, jonka ei arvella aiheuttavan haittaa

324 ($RQ = PEC/PNEC$; PEC=predicted environmental concentration ja PNEC=predicted no effect environmental

325 concentration). Mitä suurempi RQ:n lukuarvo on, sitä todennäköisempää on, että kemikaali aiheuttaa

326 ympäristöhaitan. Riskien arviointi pohjautuu pääasiassa toksisuustestauksiin ja niissä saataviin LC-arvoihin.

327 Yleensä PNEC saadaan jakamalla herkeimmän lajin kuolevuutta kuvaava LC50-arvo päätetyllä vakiolla. Vakion

328 arvo on yleensä 10, 100 tai 1000. Käytettävä kerroin riippuu pääasiassa kemikaalista olevasta

329 aikaisemmasta tietoudesta. Mitä enemmän myrkyllisyystietoa on olemassa, sitä pienempi kerroin on.

330 Perinteisesti myrkyllisyyden arvioinnissa on käytetty tappavia tasoja ja aineiden pitoisuudet tai eläimeen

331 joutuvat määrät on ilmoitettu ensi sijassa LC₅₀- tai LD₅₀ arvoina (ensimmäinen on lethal concentration –

332 ympäröivä pitoisuus, jota tulisi käyttää aina kun tunnetaan ympäristössä mitattava pitoisuus, muttei eliön

333 sisäistä ainemäärää, joka taas on jälkimmäinen = lethal dose). Käytännössä ero pitoisuuden (concentration)

334 ja määrän (dose) välillä on suhteellisen helppo tehdä: määrää (dose) voi käyttää, jos tietty ainemäärä on

335 injektoitu tai muuten saatettu eliöön, kun taas pitoisuutta olisi käytettävä aina kun tiedetään aineen määrä

336 tilavuusyksikössä ympäristössä (ilma, vesi yms.). LC₅₀ ja LD₅₀ riippuvat toksisuusmittauksen ajasta,

337 yleisimmin käytetyt ajat akuuteissa toksisuustesteissä ovat 24 ja 96 h. Mitä pitempi altistus on, sitä

338 myrkyllisempi aine yleensä on lähestyen asymptoottisesti jotakin myrkyllisyysarvoa. Perinteisten

339 letaalitasojen arvioinnin lisäksi on viime aikoina pyritty löytämään vasteita (biomarkerivasteet, ks. 11.9.),

340 joiden avulla pystyttäisiin aineiden subletaaleja vaikutuksia tutkimaan. Pelkkä myrkyllisyystieto ei

341 kuitenkaan riitä, sillä eliöiden väliset vuorovaikutukset (esim. peto-saalissuhteet) voivat merkittävästi

342 vaikuttaa eliön esiintymiseen kemikaalialtistuksen jälkeen. Esimerkiksi pienikin muutos siinä, miten

343 saaliseläin pystyy pakenemaan petoa, voi aiheuttaa saaliin täydellisen katoamisen eliöyhteisöstä.

344 Huomattava on myös se, että yleensä erilaisia myrkyllisyystutkimuksia tehdään yhteisöjen näkyvimmillä tai

345 taloudellisesti arvokkaimmilla lajeilla. Tämä lähtökohta olettaa, että vaikutukset muihin lajeihin (eli
 346 epäsuorat vaikutukset tutkittavaan lajiin) eivät vaikuta eliöön merkittävässä määrin.

347

348 1.4.2. Ympäristöetiikka

349 Kaikkeen toimintaan liittyvät eettiset näkökohdat. Ympäristöön liittyvien eettisten kysymysten käsittely on
 350 ympäristöetiikkaa. Eettinen näkökanta joudutaan ottamaan esimerkiksi silloin kun asuinalueen
 351 rakentaminen vaikuttaa jonkin eläimen reviiriin tai silloin kun asuinalue rakennetaan entisen kaatopaikan
 352 alueelle. Onko alue tarpeeksi puhdas? Ovatko kaatopaikoilla esiintyvät haitalliset kemikaalit poistuneet
 353 riittävästi? Samalla tavoin eettinen näkemys tulee olla mukana esim. kaivosten sijoittelussa,
 354 voimalaratkaisuissa, jätteiden käsittelyssä, liikennejärjestelyissä ja luonnonsuojelualueiden rakentamisessa.
 355 Ekotoksikologiaan yhteys tulee muun muassa sitä kautta, että kaikkien jätevesien puhdistaminen ja
 356 jätevesiputken sijoittaminen ovat eettisiä kysymyksiä samoin kuin esim. kalanviljelylaitoksien sijoittaminen
 357 tai maanviljelyyn liittyvien hajapäästöjen tarkastelu. Koska eettiset kysymykset ovat arvokysymyksiä, tulee
 358 ympäristöetiikalle hyvin läheinen yhteys ympäristöekonomiaan ja ympäristöpoliittisten ratkaisujen yhtenä
 359 kulmakivistä on oltava eettisen tarkastelun.

360

361 1.4.3. Ympäristöekonomia

362 Ympäristöekonomia on tiiviissä yhteydessä ekotoksikologiseen tutkimukseen. Kaikki kemikaalien poisto
 363 jätevesistä tai savukaasuista aiheuttaa kustannuksia. Yleensäkin jätteiden käsittely on kustannuskysymys.
 364 Ympäristöekonomian yhtenä päämääränä onkin laskea kustannukset, jotka ympäristön puhdistamisesta
 365 koituvat. Eräs merkittävimmistä ongelmista ympäristöekonomiassa on arvottaa ympäristö. Mikä on
 366 rahallinen arvo sille, että saa virvelillä taimenen tai sille, että auringon laskiessa kuulee kangasmetsässä
 367 kehrääjän? Ympäristöekonomia liittyy ekotoksikologian kaikkeen muuhun taloudelliseen toimintaan. Tätä
 368 kautta tulee suora yhteys ympäristöpolitiikkaan ja laajemmin koko poliittiseen päätöksentekoon.

369

370 1.4.4. Ympäristöpolitiikka

371 Ympäristöön liittyvät yleiset kysymykset voidaan ratkaista vain, jos ympäristöongelman tausta tunnetaan ja
 372 siihen liittyvät eettiset ja taloudelliset näkökohdat on arvioitu laajasti. Poliittisissa päätöksissä täytyy
 373 ratkaista, miten paljon taloudellinen toiminta saa aiheuttaa ympäristön muutoksia. Koska näin on,
 374 ekotoksikologian tutkijat eivät voi olla osallistumatta ympäristöpoliittiseen keskusteluun. Ongelmajätteiden
 375 käsittely on hyvä esimerkki siitä, miten poliittisen päätöksenteon on otettava huomioon useita näkökulmia.
 376 Varmaan kaikki ovat yhtä mieltä siitä, että ongelmajätteiden käsittelyyn tarvitaan erityiset laitokset.
 377 Yksimielisyys loppuu heti, kun laitoksen sijoituspaikkaa etsitään. Juuri kukaan ei hyväksy ongelmajätteiden
 378 käsittelypaikan tulevan lähelleen. Täten, jotta yleisen mielipiteen toiveet pystyttäisiin toteuttamaan,
 379 käsittelylaitos pitäisi rakentaa kauas ihmisasutuksesta. Tämä merkitsisi toisaalta aineiden kuljetukseen
 380 liittyvien riskien kasvamista: lisääntynyt onnettomuusriski poistaisi moninkertaisesti käsittelylaitoksen
 381 sijoittamiseen liittyvät hyötynäkökohdat. Ongelmajätteiden käsittelyyn liittyy yksi musta piirre Länsi-
 382 Euroopan ja Pohjois-Amerikan yritysten ja valtioiden toimissa. Vallankin 1980-luvulla mutta myös
 383 myöhemmin kuljetettiin laivalasteittain ongelmajätteitä käsiteltäväksi kehitysmaihin ilman valvontaa siitä,
 384 että niitä tosiaan käsiteltäisiin. Toinen esimerkki ympäristönäkökulmien tiiviistä liittymisestä poliittiseen
 385 päätöksentekoon ovat energiakysymykset – niin ydinvoima, maakaasun kuljetus, uusien energianlähteiden
 386 käyttö, turpeen poltto kuin muut näkökulmat. Äskettäin on keskusteltu noussut kaivostoiminta. Kuinka
 387 paljon kaivokset saavat aiheuttaa ympäristön pilaantumista?

388 2. Ympäristön pilaantumista aiheuttavat tekijät

389

390 2.1. Yleistä

391 Tietoisuus siitä, että ihmisen toiminta pilaa ympäristöä, on merkittävästi syntynyt vasta 1970-luvulla. Vasta
392 tämän jälkeen ympäristön kemikalisoitumisen on ymmärretty olevan riski koko biosfäärin toiminnalle (ja
393 ihmisen hyvinvoinnille). Kun kuitenkin näyttää siltä, ettei uutisointi ja poliittisten päättäjien mielessä olevat
394 asiat yleensä kattavat vain yhden kokonaisuuden, niin tällä hetkellä ovat ympäristön kemikalisoituminen ja
395 siihen liittyvät ilmiöt jääneet taka-alalle ilmastomuutoksen viedessä uutistilan. Kemikalisoituminen ja
396 ilmastomuutos eivät suinkaan ole toisistaan riippumattomia. Esimerkkeinä ovat muun muassa seuraavat
397 asiat: Yksi merkittävistä, mutta sangen usein unohdetuista, hiilidioksidinieluista on valtamerien
398 pintakerroksien yksisoluiset levät. Näiden kasvuun ja lisääntymiseen ovat viime aikoina vaikuttaneet niin
399 jätevesipäästöt kuin öljyn (ja myrkyllisten kemikaalien) laivakuljetusten lisääntyminen merenkulkuun
400 liittyvien tahattomien ja tahallisten päästöjen myrkyllisine vaikutuksineen. Lämpötilamuutokset vaikuttavat
401 useiden kemikaalien myrkyllisyyteen ja eri lämpötiloihin sopeutuneiden populaatioiden kemikaalitoleranssi
402 on erilainen, minkä seurauksena ilmastomuutos yhdessä kemikaalipäästöjenkin kanssa vaikuttaa eliöiden
403 levinneisyyteen.

404 Ennen ilmastomuutoksen tuloa suureksi uutisaiheeksi näkyvin ympäristöongelma oli otsonikato. Vaikka
405 otsonikato on suurelta osin hävinnyt uutisista, stratosfäärisen otsonin väheneminen napa-alueiden
406 läheisyydellä ei ole. Otsoniaukon synnyssä yhdistyy moni ilmakehän kemikalisoitumiseen liittyvä
407 periaatteellinen tekijä ja synnyn ja aukon vaikutusten selvittäminen on hyvä esimerkki ekotoksikologian
408 monitieteellisyydestä. Merkittävää on se, että otsonipitoisuuden nousu maan pinnan lähellä on vakava
409 ympäristöongelma. Otsoni, eräs reaktiivisista happimuodoista (ROS=reactive oxygen species), on tärkeä
410 oksidatiivisen stressin aiheuttaja kaikissa eliöissä ja korkeissa pitoisuuksissa tappaa eliöt. Tähän perustuu
411 otsonoinnin käyttö juomaveden puhdistuksessa ja uimahallien veden desinfioinnissa – niin bakteerit kuin
412 alkueläimet kuolevat otsonille altistuessaan. Lisäksi otsoni on mukana savusumun (smog)
413 muodostumisessa. Korkealla stratosfäärissä esiintyessään otsoni on kuitenkin maan elämälle hyödyllinen
414 molekyylä. Se vähentää ultraviolettisäteilyn pääsyä maan pinnalle vähentäen näin ihmisellä sekä säteilyn
415 aiheuttamia silmävaurioita että säteilystä johtuvaa ihosyöpää. Otsonin määrä stratosfäärissä vähenee sitä
416 enemmän mitä kylmempää on vallankin, jos otsoni voi tuolloin reagoida sille elektroneja luovuttavan
417 yhdisteen kanssa. Näistä yhdisteistä tärkeimpiä ovat nykyisin kielletyt CFC-yhdisteet (klorofluorihilivedyt;
418 freonit). Näitä käytettiin varhemmin suihkepullojen ponnekaasuina, kylmälaitteissa ja ilmastointilaitteissa.
419 Koska freonien elinikä on yleensä 50 vuodesta muutamaan sataan vuoteen, säilyy niiden aiheuttama
420 otsoniongelma joitakin vuosikymmeniä kiellon jälkeenkin. Freoneita korvaavat yhdisteet ovat useimmiten
421 voimakkaita kasvihuonekaasuja. Klooria sisältävien freoneiden lisäksi otsonikatoa aiheuttavat muun muassa
422 bromia sisältävät halonit ja typpioksiduuli (N_2O). Maan pinnan läheisyydessä käytettävät haitalliset
423 yhdisteet kulkeutuvat korkealle stratosfääriin ilmavirtauksien mukana.

424 Kaikki seuraavat tekijät vaikuttavat siihen, mikä aiheen merkitys saasteena on. 1. Päästön määrä. Tietysti
425 mitä enemmän ainetta pääsee ympäristöön sen haitallisempaa se on. Päästöjen määrien vertailu voi
426 kuitenkin olla hyvinkin merkityksellistä, sillä on mahdollista, että potentiaalisesti hyvin myrkyllisellä
427 kemikaalilla ei ole juurikaan merkitystä ympäristön pilaantumisen kannalta, jos aineen pääsy ympäristöön
428 rajoittuu hyvin vähäisiin määriin. Toisaalta vain vähän haitallinen aine voi aiheuttaa suuria
429 ympäristömuutoksia, jos sen pääsy ympäristöön on laajaa. Esimerkkeinä vain vähän haitallisista aineista,

joiden massiivinen kertyminen ympäristöön on aiheuttanut pahoja ympäristöongelmia ovat nitraatit ja fosfaatit, joiden päästöjen tuloksena suuri osa sisä- ja rannikkovesistä on rehevöitynyt. 2. Aineen vesiliukoisuus. Aineen vesi/rasvaliukoisuutta voi määrittää sen K_{ow} :n selvittämällä; suure on oktanoli-vesi jakautumiskerroin. Mitä pienempi sen arvo on sitä vesiliukoisempi aine on. Vesiliukoisuus vaikuttaa niin aineen jakautumiseen ympäristössä kuin sen kulkeutumisreittiin eliössä. Käytännössä vain rasvaliukoiset ympäristömyrkyt voivat väkevoitua ravintoketjussa (biokonsentroitua) ja niitä voi saada vain ravintoeliöissä. Parhaiten tunnettu rasvaliukoinen biokonsentroituva ympäristömyrkky on ilman muuta DDT (ja sen johdannaiset). Aineen rasvaliukoisuus määrää sen jakautumisen maaperään, organismeihin ja maaperän vesifaasiin sekä vesistöihin. Rasvaliukoiset aineet adsorboituvat maaperään ja vesistöjen pohjasedimentteihin tai kulkeutuvat organismeihin. 3. Aineen haihtuvuus (höyrystyminen). Kaikilla aineilla on höyrystymiskerroin. Joidenkin aineiden osalta se on mitättömän pieni, minkä takia äärimmäisen vähän siitä on kaasumaisessa olomuodossa. Jos tällainen aine esiintyy ilman saasteena, se on joko pienhiukkasina tai pisaroina. Toiset aineet taas höyrystyvät voimakkaasti, joten niiden määrät kaasufaasissa voivat nousta korkeiksikin. Haihtuvuuteen läheisesti liittyy aineen fugasiteetti (fugacity=pyrkimys paeta). Aineet siirtyvät faasista, jossa niiden osapaine ($\approx$ fugasiteetti) on korkea, faasiin, jossa osapaine on alhainen. Tasapainotilassa aineen eri faasien fugasiteetit ovat samat ja ne riippuvat aineen pitoisuudesta ja aineen fugasiteettikapasiteettivakiosta kussakin faasissa. 4. Aineen muuntuminen. Useat ympäristöön joutuvat kemikaalit eivät säily ympäristössä muuttumattomina, vaan sekä abioottiset että bioottiset tekijät voivat vaikuttaa niin, että jonkin ajan kuluttua päästöstä lähtöaineen määrä on vähäinen. Joskus muuntunut yhdiste on lähtöainetta paljon vähemmän myrkyllinen, toisinaan taas myrkyllisyys kasvaa muuntumisen tuloksena. Vaikka aineiden muuntumisen syitä on lukuisia, yksi yleinen abioottinen syy kannattaa tässä mainita: auringon UV-säteily vaikuttaa useiden kemikaalien rakenteeseen. 5. Aineen kompleksimuodostus. Jotkut ympäristöön joutuvat kemikaalit muodostavat komplekseja jo ympäristössä olevien aineiden kanssa tai eliöön jouduttuaan sitoutuvat esim. plasman proteiineihin kuten albumiiniin. Kompleksimuodostuksen seurauksena aineen myrkyllisyys voi olla paljon pienempi kuin sen puuttuessa. Kaikki yllä mainitut tekijät vaikuttavat aineen biosaattavuuteen (bioavailability), siihen miten eliö voi saada ainetta.

Kaikki aineet ovat myrkyllisiä, jos eliö saa niitä liikaa kuten Paracelsus sanoi jo 1500-luvulla. Tappava annos pystytään mittaamaan jopa vedelle. Annoksen suuruudesta riippuu onko aine hyödyksi vai haitaksi. Karkeasti voidaan tehdä jako aineisiin, joita tarvitaan vähän, mutta jotka ovat myrkyjä esiintyessään merkittävässä pitoisuuksissa ja aineisiin, joita ei tarvita, mutta joilla on myrkyvaikutuksia. Aineet voidaan myös jakaa toksiineihin, jotka ovat luonnon omia myrkyllisiä yhdisteitä ja toksikantteihin, jotka ovat pääasiassa ihmisen valmistamia ja levittämiä yhdisteitä, joita ei normaalisti luonnossa esiinny. Ksenobiootit on toinen sana, jota yleisesti käytetään luonnolle vieraista yhdisteistä puhuttaessa. Taulukossa 2 on esitetty pääasialliset tällä hetkellä ympäristöongelmia aiheuttavat tekijät. Alla selvitetään eri ympäristön pilaajien ominaisuuksia tarkemmin.

Taulukko 2. Merkittäviä ympäristösaasteita. Taulukossa esitettyjen kemikaalimuotoisten saasteiden lisäksi myös UV-säteily ja radioaallot sekä geenimuunnellut eliöt lasketaan yleisesti ekotoksikologiassa käsiteltävään alaan

Metallit	esimerkkeinä kadmium, lyijy, kupari, arseeni, elohopea, alumiini ym. Päästöjä on muun muassa asutusjätteissä, kaivostoiminnan seurauksena mukaan lukien
----------	---

473		metallisulatot ja –tehtaat, lannoitteissa ja kaivovedessä. Varhemmin
474		merkittäviä päästöjä on ollut esimerkiksi polttoaineista.
475	Organometalliyhdisteet	tärkeimpinä haitta-aineina ovat orgaaniset tinayhdisteet ja metyylielohopea.
476		Edellisiä pääsi vesistöön erityisesti laivojen ja veneiden pohjamaaleista kun
477		taas jälkimmäisien kertymistä tapahtuu myös luonnonoloissa
478	Ravinteet	Tärkeimpiä ovat nitraatit ja fosfaatit, joita varhemmin tuli ympäristöön
479		ennen kaikkea huonosti puhdistetuista asutusjätevesistä. Nykyisin suurimpina
480		lähteinä ovat maatalouden päästöt ja hajakuormitus. Fosfaatit olivat ennen
481		tärkeä osa pesuaineita, mutta niissä niiden käytöstä on suurimmaksi osaksi
482		luovuttu. Ammoniakkityppeä tulee ympäristöön ennen kaikkea intensiivisestä
483		kotieläintuotannosta.
484	Kasvihuonekaasut	Merkittävimmit ovat hiilidioksidi ja metaani. Hiilidioksidin lähteitä ovat kaikki
485		polttaminen, ja merkittävänä tekijänä tässä on eliöiden hengityksessään
486		tuottama hiilidioksidi. Metaanin lähteitä ovat kotieläinten suolikaasut ja soihin
487		varastoitunut kaasu. Metaania voi karata myös maakaasun käsittelyssä ja
488		huonosti toimivassa palamisessa.
489	Otsoni	Syntyy sähköpurkauksissa ja polttamisen yhteydessä. Maan pinnan lähellä
490		otsoni on merkittävä myrkky.
491	Otsonikadon aiheuttajat	Stratosfäärinen otsoni estää liiallisen ultraviolettisäteilyn pääsyn
492		maanpinnalle. Ilmastointi- ja jäähdytyslaitteissa sekä suihkeiden
493		ponnekaasuina varhemmin käytetyt freonit aiheuttavat stratosfääristä
494		otsonikatoa, jota myös kiihdyttävät mm. typpioksiduuli ja kasvihuonekaasut.
495	Rikkidioksidi	Aiheuttaa typen oksidien kanssa happosateen. Merkittävimmit lähteet
496		energiantuotannon ja liikenteen savukaasut. Rikkidioksidipäästöjen
497		vähentämiseksi on länsimaissa ruvettu edellyttämään savukaasujen
498		puhdistusta ja polttoaineiden rikkipitoisuudelle on asetettu tai ollaan
499		asettamassa yläraja.
500	Typen oksidit	Happosateen osatekijöitä ja liikenteen aiheuttaman savusumun
501		komponentteja. Päästöjen vähentäminen on paljon rikkidioksidin poistamista
502		vaikeampaa.
503	Radioaktiiviset aineet	Suomessa suurimmat päästöt ovat luontaisia ja johtuvat redon-kaasun
504		korkeista pitoisuuksista rapakivialueella. Radioaktiiviset päästöt ovat aluksi
505		aiheutuneet sotilaallisesta toiminnasta ja sitten onnettomuuksista
506		ydinvoimaloissa. Normaalioloissa suurin radioaktiivisten päästöjen aiheuttaja
507		nykyisin on hiilen poltto ja sen jälkeen uraanin kaivaminen ydinvoimaloiden
508		polttoaineeksi.
509	Öljy ja sen komponentit	Päästöjä syntyy sekä öljyn porauksen yhteydessä, öljyn kuljetuksessa että
510		tahallisissa ja vahingossa tapahtuneissa päästöistä käytön yhteydessä. Yksi
511		tärkeistä haitallisista vaikutuksista on pintajännityksen poisto ja lipidikalvojen
512		liuottaminen. Öljyn komponenteissa on muun muassa syöpää aiheuttavia
513		aromaattisia hiilivetyjä.
514	Pesuaineet	Ehkä merkittävin nykyinen ympäristöhaitta liittyy siihen, että pesuaineet
515		liuottavat pääosin rasvoista muodostuvia biologisia kalvoja.

516	Lääkeaineet	Koska päämääränä on tuottaa mahdollisimman pysyviä yhdisteitä, lääkeaineet
517		voivat kulkeutua muuntumattomina vedenpuhdistuksen läpi. Lisäksi ne voivat
518		tappaa biologisen jätevesipuhdistuksen bakteereja.
519	Halogenoidut yhdisteet	Merkittävin kloorattujen yhdisteiden päästölähde on pääosin poistunut
520		Pohjoismaissa, kun kloorivalkaisusta on lähes kokonaan luovuttu
521		sellu- ja paperiteollisuudessa (vapaata reaktiivista klooria ei käytetä lainkaan).
522		Tällä hetkellä puunjalostusteollisuuden entisten päästöjen kerryttämät veden
523		pohjien sedimentit voivat olla merkittävä klooriyhdisteiden lähde. Haitalliset
524		klooratut yhdisteet ovat ehkä parhaiten ekotoksikologisesti tunnettuja
525		ympäristömyrkköjä. Samaa ei voi sanoa polybromatuista yhdisteistä, joita
526		käytetään palonestoaineissa (tietotekniset piirilevyt mukaan lukien) tai useista
527		orgaanisista fluoriyhdisteistä.
528	Puunjalostuksen jätevedet	Kun klooratut yhdisteet ovat lähes poistuneet jätevesistä, tärkeimmät
529		jätevesikomponentit ovat puun luontaiset kemikaalit: Suomen puiden osalta
530		fenolit koivuissa ja hartsihapot (pihkan osaset) havupuissa.
531	Hormonihäiritsijät	Termi pitää sisällään useita erityyppisiä yhdisteitä. Yleisimmin puhutaan
532		hormonihäiritsijöistä, kun tarkoitetaan normaalia sukupuolihormonikiertoa ja
533		sen vaikutuksia häiritseviä yhdisteitä. Tärkeänä joukkona kemikaaleja ovat
534		erilaiset steroidit, jotka muistuttavat luontaisia sukupuolihormoneja.
535	Tuholaismyrkyt	Aineissa on suuri joukko erilaisia yhdisteitä. Tuholaismyrkkyyhin kuuluvat niin
536		hyönteis- kuin rotanmyrkyt, kasvinsuojeluaineet ja sienimyrkyt.
537	Nanomateriaalit	Nanomateriaaliksi määritellään aine, jonka jokin dimensio on alle 100 nm.
538		Niiden käyttö on räjähdysmäisesti lisääntymässä, esimerkiksi kastumisen
539		estäjinä vaatteissa. Nanomateriaalien myrkyllisyys tunnetaan vielä huonosti,
540		mutta kun sitä esiintyy, sen arvellaan johtuvan pääosin siitä, että
541		pienuudestaan johtuen nanomateriaalit pääsevät lähelle vaikutuskohtaansa.

542
543
544

545 2.2. Metallit, metalloidit ja organometalliyhdisteet

546 Metalleja on luonnostaan ympäristössä jonkin verran metallisessa olomuodossa mutta yleensä positiivisina
547 metalli-ioneina. Yleisimmät elollisessa luonnossa esiintyvät metallit (metalli-ionit) ovat natrium ja kalium,
548 joita molempia eliöiden elimistö tarvitsee. Näiden metalli-ionien riittävä saanti on välttämätöntä mm.
549 normaalin hermotoiminnan turvaamiseksi. Liian vähäinen natriumin saanti voi aiheuttaa esimerkiksi
550 kontrolloimatonta lihasten supistelua. Suureksi osaksi tämän takia porot ovat talvinen riesa suolatuilla
551 tiellä: ne nuolevat tieltä tarvitsemaansa suolaa. Teiden suolaus voi kuitenkin johtaa pohjaveden
552 suolapitoisuuden nousuun. Suomessa tällaista on havaittu erityisesti Etelä-Suomessa, mutta täälläkään
553 suolapitoisuuden kasvun ei arvioida aiheuttavan terveysriskejä ihmiselle. Suolaisen sulamisveden on
554 osoitettu vaikuttavan sammakon nuijapäiden uintikäyttäytymiseen. Natriumin ja kaliumin lisäksi elimistö
555 tarvitsee kalsiumia, magnesiumia ja pieniä määriä rautaa, kuparia ja sinkkiä. Kalsium on toisaalta tärkeä osa
556 luuta ja toisaalta yksi merkittävimmistä aineista solun sisäisessä viestinnässä. Raudan pääasiallinen tarve on
557 hemiyhdisteissä, erityisesti happea kuljettavassa hemoglobiinissa. Magnesium, kupari ja sinkki ovat
558 lukuisien entsyymien tai niiden kofaktoreiden osa. Näin ollen niiden saanti pienissä määrin on
559 välttämätöntä, mutta suuret määrät aiheuttavat merkittäviä myrkyvaikutuksia. Esimerkiksi
560 kuparipitoisuuden nousu Harjavallan kuparisulattamon alueella vaikutti varhemmin huomattavasti alueen

561 kirjosieppo- ja tiaispopulaatioihin. Viime vuosina tilanne on parantunut paljon savukaasujen tehostuneen
562 puhdistuksen ansiosta.

563

564 Pitkään on joistakin metalleista puhuttu nimellä raskasmetalli. Nimi on hyvin huonosti määritelty – sanaa
565 on käytetty kaikista muista metalleista kuin litium, natrium, magnesium, kalium ja kalsium. Tästä syystä
566 koko sanasta olisi syytä päästä eroon ja puhua vain metallikontaminaatiosta – IUPACin (International Union
567 of Pure and Applied Chemistry) suositusten mukaisesti. Silloin kun on tarpeen, voi kontaminaatiosta puhua
568 täsmällisesti spesifisen metallin mainiten.

569 Useat metallit voivat esiintyä eri varaustason ioneina. Esimerkiksi kupari voi olla joko yhden tai
570 kahdenarvoinen kationi ja rauta kahden tai kolmenarvoinen. Vanadiini esiintyy kolmen, viiden ja
571 kuudenarvoisena (esiintyen tällöin pääasiassa V_2O_3 ja V_2O_5 oksideina ja VO_4^{3-} ionina; vanadiini ei esiinny
572 lainkaan vapaana metallina tai metalli-ionina). Yleensä metallit esiintyvät alemmalla varaustasolla
573 pelkistävissä olosuhteissa (kuten vähähappiset olot) ja voivat tällöin toimia hapettavina (oksidatiivisina).
574 Luontaisen esiintymisensä lisäksi metallipäästöt tulevat kaivostoiminnan valumavesissä,
575 metallirikastamojen ja energiantuotannon (kivihiilen poltto) savukaasuissa ja jätevesissä, metalleja
576 jalostavien ja käyttävien tehtaiden päästöissä, kotitalouksien jätteissä (metalli-ionien vapautuminen
577 kaatopaikoilla). Milloin yksittäisten metallien päästöreitit poikkeavat näistä, ne on mainittu jäljempänä
578 toksikologisesti tärkeimpiä metalleja tarkasteltaessa. Metallien pääasiallisia käyttötarkoituksia on myös
579 mainittu.

580 Metallii-ionit muodostavat komplekseja vesiympäristössä esiintyessään. Vesistötoksikologian tutkimus on
581 pyrkinyt ottamaan tämän huomioon kehittämällä bioottisen ligandimallin (biotic ligand model). Malli, jota
582 erityisesti kanadalaiset tutkijat ovat kehittäneet, selvittää miten veden kovuus ja pH sekä siinä esiintyvät
583 humusaineet (liuennut orgaaninen hiili) vaikuttavat metallin saatavuuteen. Malli toimii erittäin hyvin
584 makeassa vedessä – jopa niin hyvin, että se on viranomaiskäytössä useissa maissa. Meriympäristössä ja
585 yleisemminkin suolapitoisuuden selvästi muuttuessa (kuten murtovesissä) bioottinen ligandimalli ei toimi
586 läheskään yhtä hyvin kuin makeassa vedessä, mikä johtunee pääasiassa siitä, että metalli-ionien sisäänotto
587 eläimeen tunnetaan suhteellisen huonosti murto- ja merivedessä, minkä vuoksi myös metalli-ionien
588 spesiaation merkitys on osittain vain spekulatiota. Bioottinen ligandimalli on kehitetty Pohjois-Amerikassa,
589 vastaavan tyyppinen Englannissa kehitetty malli on WHAM (Windermere Humic Aqueous Model)
590 muunneltuna.

591 Toksikologian kannalta tärkeimmät metallit ja metalloidit

592 Kupari: Pienet määrät kuparia ovat välttämättömiä eliöille, koska se on osa useiden entsyymien ja muiden
593 proteiinien aktiivista ryhmää. Esimerkkinä tästä on useiden selkärangattomien happea sitova pigmentti,
594 hemosyaniini, jossa happi sitoutuu kupari-ioniin. Kuparia käytetään erityisesti johdoissa ja putkissa helpon
595 työstettävyytensä takia. Se on usein myös osa metallisekoituksia ja viime vuosina kupari-ioneja on käytetty
596 veneiden pohjamaalien myrkyllisenä osana kun orgaaniset tinayhdisteet on kielletty. Kupari-ioni indusoi
597 metallotioniineja, valkuaisaineita, jotka poistavat vapaita kupari-ioneja elimistöstä. Vaikka
598 metallotioniineilla on nykyisin pääasiallinen tehtävä myrkyllisten metalli-ionien kompleksoimisessa, ne ovat
599 saattaneet olla alun perin keino, jolla metalleja on varastoitu, jotta myöhempi tarve entsyymien osana on
600 voitu varmistaa silloinkin kun metallin (lähinnä sinkin ja kuparin) saatavuus on rajallinen. Kupari esiintyy
601 yhden- ja kahdenarvoisena ionina: näistä yhdenarvoinen ioni on myrkyllisempi. Se on kuitenkin vähemmän
602 stabiili kuin kahdenarvoinen ioni. Yhdenarvoista ionia esiintyy pelkistävissä (yleensä vähähappisissa)

603 olosuhteissa, mutta joissakin eliöiden kudoksissa kahdenarvoinen ioni voi muuttua yhdenarvoiseksi. Tämän
604 vuoksi joissakin tapauksissa kuparin myrkyllisyys johtuu yhdenarvoisesta ionista, vaikka altistus olisi tehty
605 kahdenarvoisella ionilla.

606 Lyijy: Lyijy oli vain vähän aikaa sitten melkein pä tärkein Länsi-Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa
607 ympäristöongelmia aiheuttanut metalli, kun sitä oli autojen polttoaineessa nakutusta estävissä yhdisteissä
608 (pääasiassa organolyijy-yhdisteitä tetraetyyli- tai tetrametyyllilyijy). Tuloksena oli se, että tienvarsien
609 kasvillisuuden lyijypitoisuudet nousivat haitallisen korkeiksi. Erityisen korkeita lyijypitoisuuksia mitattiin
610 sienistä, joihin metallit yleisesti rikastuvat. (Tälläkin hetkellä suuressa osassa Afrikkaa, Aasiaa ja Etelä-
611 Amerikkaa käytetään lyijyä sisältävää bensiiniä.) Lyijyä on käytetty myös lyijyhauleissa, minkä tuloksena
612 riistalinnuilla on havaittu lyijymyrkytyksiä. Yleisesti lyijyä on pattereissa, putkissa, väriaineissa, keramiikassa
613 yms. Kaiken kaikkiaan lyijyn käyttö on hyvin laajaa, minkä vuoksi sillä on merkittäviä ympäristövaikutuksia.
614 Suurin osa ihmisen saamasta lyijystä tulee pölyssä ja pienhiukkasissa, mikä osoittaa varhemmin käytettyjen
615 lyijyä sisältävien maalien olevan edelleen tärkeä altistumisen syy. Koska lyijyn tiheys on suuri, sitä on
616 käytetty paljon painona mm. kalastusvälineissä, mikä on joissakin tapauksissa aiheuttanut vesilintujen
617 myrkyttymistä. Eräs lyijy-ionin spesifisimmistä vaikutuksista, jota on käytetty biomarkerina, on yhden
618 hemisynteesin entsyymien, ALA-D:n (delta-aminolevuliinihappo dehydrataasin), inhibitio. Elimistö ei näytä
619 tarvitsevan lyijyä: yhtään siitä riippuvaa entsyymiä ei ole tiedossa.

620 Kadmium: Kadmium on metalli, jolla ei ole osoitettua solufunktiota. Luonnossa se esiintyy aina yhdessä
621 sinkin kanssa ja on kaikkien sinkkiä sisältävien tuotteiden (esim. galvanoitu teräs) epäpuhtaus. Ihmiset
622 saavat kadmiumia ennen kaikkea vihanneksista, metallia kun esiintyy epäpuhtautena myös
623 fosfaattilannoitteissa. Lisäksi kadmiumia esiintyy epäpuhtautena kivihiilessä, minkä takia sitä pääsee
624 ympäristöön hiilenpolton savukaasuissa. Se on toksikologisesti erittäin paljon tutkittu metalli, joka
625 käyttäytyy usein sinkin mutta myös kalsiumin kaltaisesti. Kadmiumia käytetään mm. metallisekoituksissa,
626 galvanisaatiossa ja pattereissa. Kadmium on sangen voimakas metallotioniinien indusoija.

627 Sinkki: Alhaiset sinkkipitoisuudet ovat välttämättömiä kaikille organismeille, koska sinkki-ioni on osa
628 useiden entsyymien aktiivista ryhmää. Korkeat sinkkipitoisuudet ovat kuitenkin myrkyllisiä aiheuttaen
629 muun muassa hapenoton ongelmia kalojen kiduksissa. Sinkki on yleinen metalliseosten (mm. useat
630 teräslaadut) osa ja sitä tarvitaan metallien galvanoinnissa.

631 Rauta: Rautaa tarvitaan hemiproteiinien synteesissä. Erityisesti selkärankaisten hemoglobiinisynteesi
632 kaipaava riittävän raudan saannin. Sekä raudan imeytyminen, kuljetus että varastointi soluissa käyttää
633 spesifisiä proteiineja. Esimerkiksi pääosa raudasta kuljetetaan veriplasmassa erityiseen valkuaisaineeseen,
634 transferriniin, sitoutuneena ja otetaan soluihin tälle valkuaisaineelle spesifisten transferrinireseptoreiden
635 avulla. Vaikka rauta onkin välttämätön, se on myös myrkyllinen. Rauta voi esiintyä kahden- ja
636 kolmenarvoisina ioneina, joista kolmenarvoinen ioni on stabiilimpi. Metsiemme maaperälle ovat tyypillistä
637 korkeat rautapitoisuudet, minkä vuoksi Suomen metsien pikkujärvienkin rautapitoisuus on korkea.
638 Erityisesti happamissa vesissä se näyttää olevan hyvin tärkeä myrkyllinen metalli. Yksi, muttei suinkaan
639 ainut haitallinen vaikutus on, että rautaoksidi kiteytyy ja muodostaa hapen kulkeutumista hidastavaa
640 karstaa niin kalojen kidusten kuin mätimunien pinnalle.

641 Alumiini: Ympäristön happamoitumisen yhteydessä tulivat alumiinin myrkyvaikutukset erityisen selvästi
642 näkyviin. Alumiini on eräs yleisimmistä maankuoren alkuaineista. Se liukenee happamaan, muttei
643 neutraaliin tai emäksiseen veteen. Kolmenarvoisella alumiinilla, joka on erittäin happamassa (pH<5)

644 ympäristössä liukoinen, on vaikutuksia eläinten ionitasapainon säätelyyn. Korkeammissa pH:issa alumiini on
645 pääasiassa hydroksideina, jotka kiteytyvät eläinten hengityspinoille ja vaikeuttavat hengitystä.

646 Hopea: Hopea oli perinteisen valokuvauksen merkittävin ympäristöpäästö. Valokuvien negatiivien tärkein
647 komponentti oli hopea. Tämän takia filmien valmistajat olivat tärkeä hopean toksikologisen tutkimuksen
648 rahoittaja. Viime aikojen digitaalikuvausten lisääntymisen myötä filmien valmistuksessa ja kehityksessä
649 käytettävän hopean määrä on huomasti vähentynyt.

650 Arseeni: Arseeni on tärkein metallidi. Sitä on käytetty metalliseoksissa ja tuholaismyrkyissä. Arseenin
651 myrkyllisyys on suurelle yleisöllekin tuttu, kun sitä (arsenikki) käytetään salapoliisiromaaneissa usein
652 myrkyttämiseen. Arseeni ympäristöongelmana on erityisen tärkeä eräissä kehitysmaissa, koska kaivojen
653 veden arseenipitoisuus on usein myrkyllisen korkea. Esimerkkinä tästä ovat Bangla Deshin miljoonat kaivot,
654 joista pääosa kaivettiin Yhdistyneiden Kansakuntien tuella 1960-luvulta alkaen. Kaivojen rakentaminen
655 paransi väestön terveydentilaa aluksi merkittävästi, mutta myöhemmin – jopa 20 vuoden viiveellä –
656 areseenin haitalliset vaikutukset (mm. eräiden syöpien yleistyminen) rupesivat näkymään, kun kaivojen
657 veden arseenipitoisuus oli myrkyllisen korkea. Veden korkea arseenipitoisuus johtuu todennäköisesti siitä,
658 että se huuhtoo rautasulfidisedimenttejä, joissa arseenia esiintyy paljon. Arseenia on yleisesti
659 metallisulfidien yhteydessä, minkä vuoksi kulta-, lyijy-, kupari- ja nikkelimalmien käsittely johtaa yleisesti
660 arseenin vapautumiseen. Esimerkiksi Bulgariassa on raportoitu syntymävaurioiden kolminkertaistuminen
661 arseenin takia kuparisulattamon läheisyydessä.

662 Elohopea: Aikaisemmin elohopeaa käytettiin yleisesti lämpömittareissa, siementen pintapeittauksessa
663 sienten kasvua estämässä sekä estämässä varastoitavan puutavaran limoittumista ja lahottajasienten
664 toimintaa niissä (molemmissa tapauksissa käytössä on ollut organoelohopeayhdiste, ks. alla) ja sitä
665 käytetään edelleen loisteputkissa ja pattereissa/akuissa. Elohopean useita käyttömuotoja vähennettiin
666 Minamatakatastrofin seurauksena ja kun mittauksissa havaittiin elohopean kertyvän varsinkin paljon kalaa
667 syöviin ihmisiin. Lisäksi siementen peittauksen takia ainetta kertyi siemeniä syöviin lintuihin ja niitä syöviin
668 petoihin. Ympäristöongelmana elohopean merkitys ei kuitenkaan ole kokonaan poistunut, vaikka Länsi-
669 Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa päästöt ovatkin vähentyneet yli 90 %, koska kullan (ja hopean)
670 erottamisessa malmeista käytetään yleisesti elohopeaa. Tämä on johtanut kalakuolemiin muun muassa
671 Tonavalla ja Amazonasin alueella. Lisäksi brasilialaiset kultakaivostyöntekijät kärsivät yleisesti elohopean
672 aiheuttamista vakavistakin terveyshäiriöistä. Euroopassa mahdollisesti merkittäväksi elohopeaongelmaksi
673 nousee energiansäästölampujen (pienoisloisteputkien) sisältämä elohopea: jos rikkoutuneet lamput
674 kulkeutuvat normaaliin kaatopaikkajätteeseen, vapautuu elohopeaa kaatopaikoilta ympäristöön. Suuri osa
675 elohopean esiintymisestä ja vaikutuksista liittyy jäljempänä käsiteltäviin organoelohopeayhdisteisiin.

676 Muut metallit: Muita toksikologisesti tärkeitä metalleja ovat muun muassa nikkeli, mangaani, koboltti,
677 palladium-ryhmän metallit ja harvinaiset maametallit. Nikkeli on yleinen metalliseosten osa (mm.
678 terässeoksissa), ja joukko ihmisiä on sille hyvinkin allergisia. Mangaania on paljon metsien
679 humusmaaperässä. Koboltti on myös metalliseosten osa. Palladiumin suurin käyttö tällä hetkellä on autojen
680 katalysaattoreissa ja harvinaiset maametallit ovat tietotekniikan laitteiden komponenteissa käytettyjä
681 aineita. Johtuen laitteiden yleisyydestä sekä palladium että harvinaiset maametallit ovat viime vuosina
682 tulleet potentiaalisiksi ympäristöongelmaksi, minkä lisäksi niiden saatavuudessa on joskus ongelmia.
683 Uraani ympäristöongelmana liitetään yleensä radioaktiivisuuteen, mutta metalli sellaisenaan voi olla
684 ympäristölle haitallinen erityisesti avolouhosten lähistöllä. Vain hyvin pieni osa kaivettavasta uraanista on
685 radioaktiivista.

686

687 Organometalliyhdisteet

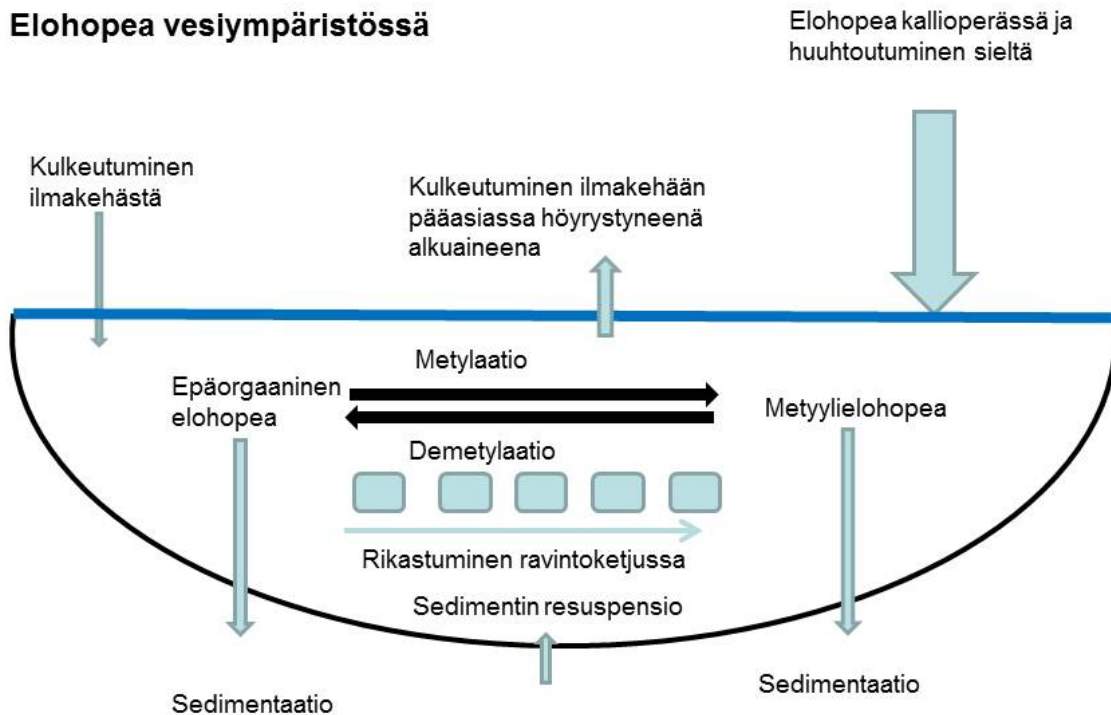
688 Tärkeimmät orgaaniset metalliyhdisteet ovat orgaaniset tinayhdisteet ja elohopean orgaaniset muodot.
689 Näiden lisäksi varsinkin varhemmin orgaaniset lyijy-yhdisteet olivat merkittäviä saasteita. Orgaanisia
690 tinayhdisteitä, erityisesti tributyyliä (TBT) käytettiin veneiden (ja laivojen) pohjamaalien ja muiden
691 vesissä käytettyjen maalien myrkyllisenä komponenttina. Päämääränä oli estää erityisesti levien ja
692 merirokon kasvu käsitellyillä pinnoilla. Täten myrkyn pitää vaikuttaa hyvin erityyppisiin eliöihin.
693 Rasvaliukoisina heikkoina happoina orgaaniset tinayhdisteet hävittävät tehokkaasti kaikkien eliöiden
694 kalvojen yli vallitsevat protonigradientit. Kun kaikkien aerobisten organismien energiantuotanto perustuu
695 protonigradienttien ylläpitoon, niiden häviäminen orgaanisten tinayhdisteiden vaikutuksesta on
696 mahdollinen yleinen myrkyvaikutus. Orgaanisten tinayhdisteiden havaittiin 1980-luvulla aiheuttavan
697 erityisesti simpukoiden lisääntymishäiriöitä venesatamien läheisyydessä. Pahimmillaan simpukkanaaraiden
698 maskulinisaatio ja valepenisten muodostuminen oli lähes täydellistä ja aiheutti osteriviljelmille huomattavia
699 taloudellisia tappioita. Nilviäisten lisäksi lisääntymisvaikutuksia havaittiin myös kaloissa. Kun orgaaniset
700 tinayhdisteet osoittautuivat hormonihäiritsijöiksi ympäristössä esiintyvissä pitoisuuksissa, niiden käyttö
701 useimmissa maissa kiellettiin aluksi pienveneissä mutta nyttemmin myös laivoissa. Kiellon uskottiin sängen
702 nopeasti poistavan niiden aiheuttaman ympäristöongelman, koska yhdisteiden hajoamis aika puhtaassa
703 hapekkaassa vedessä on korkeintaan muutamia kuukausia. Yllätyksenä on kuitenkin havaittu, että ongelma
704 säilyy vuosia. Yhdisteet ovat suhteellisen stabiileja (hajoamis aika vuosia-vuosikymmeniä) esiintyessään
705 hapettomissa sedimenteissä. Orgaanisten ryhmien määrä korreloi suoraan myrkyllisyyden kanssa. Näin
706 ollen tributyyli- tai trifenyylitinin hajotessa syntyvät di- ja monosubstituoidut yhdisteet ovat paljon
707 vähemmän myrkyllisiä kuin lähtöyhdiste.
708 Orgaaniset elohopeayhdisteet ovat puolestaan suurimmalta osalta luonnon omia yhdisteitä. Elohopean
709 kiertokulku on esitetty kuvassa 2. Tärkein orgaaninen elohopeayhdiste on metyylielohopea. Puiden
710 käsittelyssä käytettiin fenyylielohopeaa. Kun 1970-luvulla Lappiin perustettiin suuria tekoaltaita
711 (Porttipahta ja Lokka), suurimmaksi niistä koituvaksi ympäristöongelmaksi arveltiin metyylielohopean
712 kertymistä. Koska aine on rasvaliukoinen orgaaninen yhdiste, se rikastuu ravintoketjussa joten korkeimmat
713 elohopeapitoisuudet mitataan petokaloista kuten hauista pääasiassa niiden sisältämän metyylielohopean
714 vuoksi. Elohopean ja sen orgaanisten muotojen vaikutuksista valtaosa liittyy kalansyönttiin, saamastaan
715 elohopeasta ihminen saa keskimäärin yli 90 % kaloista.

716

717 Kuva 2. Elohopean kiertokulun periaatteet. Elohopean myrkyllisyys näkyy erityisesti vesiympäristössä ja
718 johtuu ennen kaikkea metyylielohopeasta, joka on rasvaliukoinen molekyyli ja tämän vuoksi kertyy
719 ravintoketjuissa petoihin. Metyloivat bakteerit muuntavat epäorgaaniset elohopea-ionit metyylielohopeaksi.

720

Elohopea vesiympäristössä



721

722 2.3. muut epäorgaaniset yhdisteet

723 Metallien lisäksi ympäristövaikutuksiltaan merkityksellisimmät muut epäorgaaniset yhdisteet ovat
 724 vetysulfidi, hiilidioksidi, fosfaatit, nitraatit, rikkidioksidi, typen oksidit ja reaktiiviset happimuodot (otsoni,
 725 vetyperoksidi, superoksidianioni ja hydroksyyliiradikaali). Rikkidioksidi ja typen oksidit ovat merkittäviä
 726 savukaasujen komponentteja. Erityisesti rikkidioksidia on muodostunut poltettaessa hiiltä tai rikkipitoista
 727 öljyä. Rikkidioksidista muodostuvat rikkihapoke ja rikkihappo ovat happosateen pääasialliset aiheuttajat.
 728 Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa on nyt parinkymmenen vuoden ajan vaadittu savukaasujen
 729 puhdistamista, joten tällä hetkellä happosateita esiintyy eniten Itä-Aasiassa Kiinan ollessa maailman suurin
 730 savukaasujen rikkiä huonosti puhdistavan hiilivoiman käyttäjä. Tässä onkin yksi kuluttajien ongelma: kun
 731 haluamme halpoja tuotteita, valmistus siirtyy suureksi osaksi paikkoihin, joissa ei ole lainkaan Länsi-
 732 Euroopan kaltaisia ympäristömääräyksiä ja valvontaa. Typpioksiduuli on otsonikadon osa-aiheuttaja.
 733 Hiilidioksidi on tärkein kasvihuonekaasuista. Antropogeeninen hiilidioksidin tuotanto on kuitenkin alle 10 %
 734 hiilidioksidin kokonaistuotannosta, joten liikenteen ja energiantuotannon päästöjen vähentämisen lisäksi
 735 mm. kotieläinten määrän pienentämistä tarvittaisiin, jotta hiilidioksidin tuotantoon voisi merkittävästi
 736 vaikuttaa. Eläimet ja ihminen muodostavat suuria määriä hiilidioksidia energiaa tuottaessaan. Esimerkiksi
 737 normaalipainoinen ihminen tuottaa suunnilleen 500 l puhdasta hiilidioksidia vuorokaudessa.
 738 Ilmastomuutokseen vaikuttaakin kasvihuonekaasujen päästöjen lisäksi merkittävästi niiden sitoutuminen
 739 kasveihin. Tämän vuoksi tärkeätä onkin, että kasvien hiilidioksidin kulutus voidaan pitää korkeana.
 740 Sademetsät ovat saaneet eniten huomiota, mutta eräs eniten vähenneistä hiilidioksidinieluista ovat merien
 741 pintakerroksien yksisoluiset levät. Merien saastuminen on voimakkaasti vähentänyt niiden määrää.
 742 Vety sulfidia on erityisesti vähähappisissa ja hapettomissa ympäristöissä. Fosfaatit ja nitraatit, jotka leviävät

743 ennen muuta lannoitteista, mutta myös asutusjätteistä mukaan lukien käymäläjätteet ja pesuaineet,
 744 aiheuttavat vesistöjen rehevöitymistä (Taulukko 3). Vielä parikymmentä vuotta sitten fosfaattipitoiset
 745 pesuaineet olivat hyvin tärkeä rehevöitymisen aiheuttaja, mutta osittain fosfaattien korvaus esim.
 746 silikaateilla ja osittain vedenpuhdistusmenetelmien kehittyminen ovat vähentäneet pesuaineista johtuvaa
 747 fosfaattikuormaa. Reaktiiviset happimuodot ovat yleisesti esiintyvän oksidatiivisen stressin pääasiallinen
 748 aiheuttaja. Yksittäisistä reaktiivisista happimuodoista merkittävin alailmakehän ympäristöongelma on
 749 otsoni (O₃), jota muodostuu mm. sähköpurkauksien yhteydessä kuten esimerkiksi sähköjunien jarruttaessa
 750 tai kiihdyttäessä.

751

752 Taulukko 3. Pääasialliset rehevöitymistä aiheuttavat kemikaalit ja rehevöitymiseen liittyvät
 753 ympäristöongelmat

754

755	Typpiyhdisteet	Tärkeimmät rehevöitymistä aiheuttavat typpiyhdisteet ovat ammoniumtyppi ja nitraatit. Niiden tärkeimpinä lähteinä ovat lannoitteet ja eläinten virtsa ja ulosteet. Urea ja ammoniakki leviävät ympäristöön erityisesti kotieläinten virtsasta ja tärkeimmät pistepäästöjen aiheuttajat ovatkin suursikalat ja –navetat.
756		
757		
758		
759		
760	Fosfaatit	Fosfori leviää myös pääosin lannoitteissa ja ulosteissa. Aikaisempi merkittävä fosfaattien lähde, pesuaineet, on saatu kuriin vähentämällä pesuaineissa sallittua fosfaattimäärää. Myös kalanrehut sisältävät useimmiten suhteellisen korkeita fosforipitoisuuksia, kun niissä on yhtenä osasena luujauhoa. Veteen leviävä kalanrehu voikin olla paikallista rehevöitymistä aiheuttava etenkin liikaruokinnan yhteydessä.
761		
762		
763		
764		
765		
766	Metaani ja muut orgaaniset hiiliyhdisteet	Eliöt käyttävät metaania ja muita orgaanisia hiiliyhdisteitä energiantuotannossaan. Ulosteet ovat merkittävien hiiliyhdisteiden lähde, mutta jonkin verran niitä pääsee ympäristöön epätäydellisessä öljyn palamisessa ja maakaasun päästöissä ympäristöön. Metaanilähteenä ovat myös märehijöiden suolikaasun vapautuminen röyhtäilyinä. Soihin on sitoutuneena suuret määrät metaania, jota vapautuu merkittävästi soiden lämpötilan noustessa, jos nykyisin pääosan vuodesta jäätyneenä oleva turve rupeaa sulamaan.
767		
768		
769		
770		
771		
772		
773		
774		
775	Sinileväkukinnat	Vesistöjen sinileväkukinnat ovat kiistämättä merkittävin rehevöitymiseen liittyvä ympäristöongelma. Sana on kaikin puolin virheellinen, koska sinilevät eivät ole leviä vaan bakteeriryhmä (syanobakteerit) ja kukinnat eivät suinkaan ole kukintoja vaan syanobakteerien massaesiintymistä. Massaesiintymisissä normaalisti yksin esiintyvät syanobakteerit voivat muodostaa rihmoja. Massaesiintymisiä esiintyy niin makeassa kuin murtovedessä: merivedessä esiintyvät haitalliset joukkoesiintymät ovat yleensä aitotumaisten eliöiden kuten dinoflagellaattien aiheuttamia. Useat syanobakteerilajit voivat muodostaa myrkkijä, joista tunnetuimmat ovat pääasiassa maksatoksinen mikrokystiini ja. Syanobakteereille on luonteenomaista, että ne pystyvät sitomaan ilmakehän tyyppiä joten ne tarvitsevat vain fosfaatteja rehevöittävästä kuormasta. Näin ollen massaesiintymiä voi esiintyä avovesilläkin. Lämpötilan nousu suosii massaesiintymiä.
776		
777		
778		
779		
780		
781		
782		
783		
784		
785		
786		
787		
788	Vähähappisuus	Kun kaikki rehevöitymiseen liittyvät ilmiöt aiheuttavat lisääntyvää hapenkulutusta, on sinileväkukintojen lisäksi merkittävä ympäristöongelma hapenpuute. Pahimmillaan tämä näkyy kevätalvisena kalojen joukkokuolemina, mutta vaikka tällaista näkyvää ilmiötä ei olisikaan, kalojen
789		
790		
791		

lajikoostumuksessa tapahtuu muutoksia. Lohikalat, kuha ja ahven häviävät kun taas ruutana, särki, lahna ja muut särkikalat hyötyvät.

2.4. Orgaaniset yhdisteet

Käytännöllisesti katsoen kaikki hiiliyhdisteet lasketaan orgaanisiksi yhdisteiksi, vaikka eliöt eivät tuota esimerkiksi halogenoituja yhdisteitä. Orgaanisia yhdisteitä ovat täten muun muassa suoraketjuiset alkaanit, suoraketjuiset kaksoissidoksia sisältävät alkeenit, renkaita sisältävät fenolit, bentseenirenkaan tai –renkaita sisältävät yhdisteet, yleensä bentseenirenkaita sisältävät halogenoidut yhdisteet yms. Johtuen yhdisteiden kirjon moninaisuudesta jäljempänä käsitellään yhdisteryhmiä paljolti niiden lähteen tai käyttötarkoituksen mukaan. Tyypillisesti orgaanisten yhdisteiden vesiliukoisuus on vähäinen mutta rasvaliukoisuus suuri. Tämän johdosta niiden pääasiallinen saantireitti on ruuan mukana ja ne rikastuvat usein ravintoketjussa, koska kerran eliöön jouduttuaan ne pääsevät ympäristöön vain vähäisissä määrin. Vesistöissä orgaaniset yhdisteet ovat paljolti kertyneet pohjasedimentteihin. Pohjasedimenttien yhdisteiden aiheuttama sisäinen kuormitus pitäisi esimerkiksi Itämeren tilan huonona useita kymmeniä vuosia, vaikka kaikki päästöt sinne loppuisivat. Eräs merkittävä ongelma Itämeren osalta on, että meren pohjaan on upotettu paljon erilaisia ympäristömyrkyjä eikä tarkoista upotuskohdista ole tietoa.

2.4.1. Öljy ja sen komponentit

Viime aikojen merkittävin ympäristökatastrofi on ollut BP:n öljynporauslautan räjähtäminen Meksikonlahdella. Öljylähteestä vuoti öljyä mereen useita kuukausia. Vahinko olisi ehkä voitu torjua öljynporauslautan turvaventtiilin avulla, joka olisi sulkenut öljyn virtauksen heti häiriön sattuessa. Turvaventtiilien asentamisesta on tietysti kustannuksia, mutta ne ovat jälkikäteen ajateltuna pieniä vahingon kustannuksiin verrattuna. Vaikka Meksikonlahden öljyvuoto onkin pitkään varmaan suurin ja näkyvin öljykatastrofi, öljypäästöjä eri suuruusluokissa on maailman merillä päivittäin. Kaikessa öljynporauksessa pääsee pieniä öljymääriä veteen. Ymmärrettävistä syistä erityisesti norjalaiset tutkijat ovat selvittäneet tällaisten päästöjen ympäristövaikutuksia. Alusten öljypäästöt vaihtelevat säiliöiden huuhtelun pilssivesistä kokonaisten öljytankkereiden jopa satojen tuhansien tonnien haaksirikkopäästöihin. Viime vuosikymmenten suurimmat öljypäästöt ovat aiheutuneet Exxon Valdezin haaksirikosta Alaskassa ja Prestige-tankkerin haaksirikosta Biskajanlahdella. Kaikkien öljypäästöjen yhteydessä näytetään tahriutuneita vesilintuja. Tämä onkin yksi ongelmista, koska öljyn tahriman linnun uudessa vesi pääsee sen ihoa vasten, mikä tahriutumattomilla eläimillä estyy. Kun lintujen ruumiinlämpö on veden lämpötilaa paljon korkeampi, veden pääsy ihoa vasten johtaa lämmönhukkaan ja vähitellen eläinten kuolemaan. Öljy ei tietenkään koostu yhdestä tai muutamasta yhdisteestä, vaan sisältää useita eri komponentteja, joiden hiilien määrä ja ominaispaino vaihtelevat paljon. Öljynjalostamoissa yhdisteet jaetaan kokoluokittain ja näin saadaan pienimmistä yhdisteistä suurimpiin bensiiniä, kevyttä polttoöljyä, raskasta polttoöljyä ja bitumia. Bensiinifraktiota kevyemmät komponentit kaasuntuvat ja muodostavat oman maakaasukokonaisuutensa, jota porataan ja käytetään pääasiassa teollisuuden energiantuotannossa ja lämmityksessä. Öljyn komponentit ovat myös tärkeimmät muovien raaka-aineet. Koska öljy on eloperäistä materiaalia, mikro-organismit hajottavat sitä. Hajotuksen tehokkuus riippuu lämpötilasta; mitä korkeampi lämpötila sitä tehokkaampaa hajotus on. Talvikauden alhaisen lämpötilan johdosta öljynhajotus Itämeressä on todennäköisesti hyvin hidasta. Tässä yhteydessä on kuitenkin syytä muistaa, että suurimpien öljynkäyttäjälueiden läheisyydessä valtamerien lämpötila on suhteellisen alhainen – yleisesti alle 15° C. Öljyn sisältämissä yhdisteissä on joukko erityisen myrkyllisiä komponentteja kuten yhden tai useampia bentseenirenkaita sisältävät yhdisteet. Kun yleisesti öljyvahinkoja käsitellään yhdisteillä, jotka hajottavat

837 öljylautat pienemmiksi pisaroiksi, näiden yhdisteiden biosaatavuus merien eliöstölle kasvaa merkittävästi.
 838 Öljylauttoja hajottavien yhdisteiden onkin osoitettu lisäävän öljyn myrkyllisyyttä – yhdisteiden sellaisenaan
 839 ei ole havaittu olevan ainakaan lyhytaikaisesti merkittävän myrkyllisiä.

840 2.4.2. Tuholaismyrkyt

841

842 Taulukko 4. Esimerkkejä yleisesti käytössä olevista tuholaismyrkyistä

843 Yhdiste	Kommentteja vaikutuksista
844 Tuhoeläinmyrkyt	
845	
846 <i>Hyönteismyrkyt</i>	
847	
848 Karbamaatit	Vaikutus perustuu kolinesteraasi-inhibiitioon ja tätä kautta
849	hermoimpulssien välitykseen erityisesti hermo-lihasliitoksissa
850 Organofosfaatit	Esim. klorpyrifos, malationi ja dimetioaatti. Organofosfaatit ovat
851	kolinesteraasi-inhibiittoreita ja vaikuttavat täten hermoston
852	impulssivälitykseen. Useiden ryhmän aineiden suhteellisen
853	pitkä pysyvyys ja vaikutukset muihin kuin kohdeorganismeihin
854	ovat aiheuttaneet käytön rajoituksia.
855 Pyretroidit	Myrkyllisyys nisäkkäille suhteellisen vähäistä, mutta aineet
856	voivat erittäin haitallisia esimerkiksi kaloille ja muille
857	vesieläimille. Ryhmän kemikaalien pysyvyys vaihtelee suuresti,
858	mutta yhteistä niille on kiinnittyminen orgaaniseen ainekseen.
859 Neonikotinoidit	Kloronikotinyylit ja tionikotinyylit ovat sangen uusia
860	hyönteismyrkkyjä. Ne säilyvät sangen pitkään kasveissa sen
861	jälkeen kun ovat siirtyneet niihin maaperästä.
862 Hyönteissairauksia aiheuttavat bakteerit	Biologisessa hyönteistorjunnassa käytetään hyönteissairauksia
863	aiheuttavia bakteereja, joista ehkä yleisimmin käytössä on
864	<i>Bacillus thuringiensis</i> , joka halvaannuttaa suoliston.
865	Jos hyönteinen ei käytä kasvien pintaa, mihin bakteeri saadaan,
866	vaikutusta ei ole.
867 Mikrobien erittämät insektisidit	Esimerkiksi abamektiini ja spinosad. Useimmat ovat maaperän
868	aktinomyseettien erittämiä yhdisteitä. Muun muassa
869	abamektiini voi olla hyvin myrkyllistä vesieläimille.
870	
871 <i>Rotanmyrkyt ja muut suuriin haittaeläimiin</i>	
872 <i>käytettävät aineet</i>	
873	
874 Kumariinit, 1,3-indandionit, difetialoni	Rotanmyrkyt ovat yleensä antikoagulantteja. Näin ollen kaikki
875	verenvuodot jatkuvat pitkään ja helposti aiheuttavat kuoleman.
876 <i>Molluskisidit (etanamyrkyt)</i>	
877	
878 Metallisuolat	esim. rauta(III)fosfaatti ja alumiinisulfaatti. Myrkyllisyys on
879	suhteellisen vähäinen.
880 Metaldehydi	
881 Myös useita kolinesteraaseihin vaikuttavia hyönteismyrkkyjä käytetään molluskisideinä.	
882	
883 Rikkakasvimyrkyt	

884	(Herbisidit)	Päämääränä on hävittää rikkakasvit esim. nurmikoilta tai viljapelloilta tai hävittää puiden lehdet
885		
886		
887	2,4-D (2,4-dichlorophenylic acid)	Maailman yleisimmin käytetty rikkakasvimyrkky. Synteettinen auksiini (kasvihormoni) kaltaisesti toimiva yhdiste. Käytetään
888		leveälehtisten kasvien myrkyttämiseen viljapelloilla
889		(ruohokasviviljelmillä). Epäpuhtautena dioksiineja.
890		
891	Atratsiini (Atrazine)	Triatsiiniherbisidi, joka tuhoaa leveälehtisiä kasveja. Halpa
892		mutta hyvin pysyvä (erityisesti jos maaperä on neutraali tai
893		alkalinen). Vaikutus perustuu fotosysteemi II:n inhibitioon.
894	Clopyralidi	Ruohikkomyrkky, jota käytetään leveälehtisten kasvien
895		myrkyttämiseen. Ongelmana pysyvyys. Synteettinen auksiini.
896	Dicamba	Ruohikkomyrkky. Synteettinen auksiini.
897	Diuron (Bauerin tuotemerkki;	Euroopan eniten käytetty kasvinsuojeluaine. Fotosynteesin
898	(3-(3,4-dichlorophenyl)-1,1-dimethylurea)	inhibiittori.
899	Fluroksipyr	Selektiivinen herbisidi, jota käytetään leveälehtisten
900		rikkaruohojen myrkyttämiseen viljapelloilla. Synteettinen
901		auksiini.
902	Glyfosaatti (tuotemerkki esim. Roundup)	Epäselektiivinen kasvinsuojeluaine, jonka käyttö perustuu
903		siihen, että samaan aikaan myydään geneettisesti
904		modifioituja siemeniä, joista itää myrkyä sietäviä kasveja.
905		Estää tiettyjen aminohappojen (tryptofani, fenyyialaniini,
906		tyrosiini) synteesiin osallistuvan EPSP entsyymin toiminnan.
907	Imazapic	Selektiivinen kasvimyrkky, joka estää joidenkin aminohappojen
908		(valiini, leusiini ja isoleusiini) synteesin. Käytetään erityisesti
909		ruohikkojen hoidossa.
910	Linuroni	Epäspesifinen fotosynteesin inhibiittori.
911	Metolakloori	On ruvettu viime aikoina käyttämään aratsiinin asemesta.
912	Paraquat	Epäselektiivinen herbisidi, joka on myrkyllisempi eläimille kuin
913		mikään muu paljon käytetyistä kasvinsuojeluaineista. Ei enää
914		myynnissä Euroopan Unionin alueella.
915	Picloram	Pyrimidiiniryhmän kasvinsuojeluaine, jota käytetään erityisesti
916		estämään puiden kasvua niityillä.
917		
918		
919	Sienimyrkyt	
920	(Fungisidit)	Käytön päämääränä on estää sienien (mukaan lukien homeet)
921		kasvu ja sienitaudit ennen kaikkea kasveissa.
922		
923	Bentsimidatsolit	Estävät sienisolujen mitoottista jakautumista
924	Ditiokarbamaatit	Estävät sienien kasvun esim. siementen pinnalla
925		myrkkyyvaikutuksensa ansiosta
926	Famoksadonit	Estävät sienien mitokondriaalisen energiantuotannon
927		inhiboimalla kinonien toimintaa
928	Fenamidonit	Estävät sienien mitokondriaalisen energiantuotannon
929		inhiboimalla kinonien toimintaa
930	Kloronitriilit	Estävät sienien kasvun esim. siementen pinnalla
931		myrkkyyvaikutuksensa ansiosta
932	Kupari	Estää sienien kasvun esim. siementen pinnalla
933		myrkkyyvaikutuksensa ansiosta
934	Rikki	Estää sienien kasvun esim. siementen pinnalla
935		myrkkyyvaikutuksensa ansiosta

936	Strobiluriinit	Estävät sienien mitokondriaalisen energiantuotannon
937		inhiboimalla kinonien toimintaa
938	Triatsolit	Inhiboivat C14-demetylaasientsyymiä, jota tarvitaan sterolien
939		tuotannossa.
940		

941 Tuholaismyrkyt voidaan karkeasti jakaa pestisideihin (jolla tässä tarkoitetaan tuhoeläinmyrkkijä – ryhmä
 942 sisältää myös rotanmyrkyt) ja herbisideihin (rikkakasvimyrkyt). Lisäksi fungisidit (tuholaissienimyrkyt),
 943 muiden muassa homeenestoaineet, ovat tärkeä joukko yhdisteitä. Taulukossa 4 on esitelty yleisimpiä
 944 pestisidi-, herbisidi- ja fungisidiryhmiä. Tuholaismyrkyistä on useita verkkosivuja, esimerkiksi
 945 www.pesticideinfo.org. Hyönteismyrkkijien yleisin vaikutus perustuu hermoimpulssien johtumisen
 946 muutoksiin, erityisesti siihen, miten impulssi siirtyy synapseissa solusta toiseen. Synapsien ionikanaviin
 947 vaikuttavia hyönteismyrkkijä ovat muun muassa DDT ja muut organokloriinihyönteismyrkyt. Niiden käyttö
 948 on nykyisin pääosin kielletty. Poikkeuksen muodostavat esim. erityisen vaikeat malaria-alueet. Huomattava
 949 tosikin on, että hyönteisille kehittyi sangen nopeasti – 10-20 vuodessa – DDT:lle ja sen johdannaisille
 950 resistenttejä kantoja. Monessa suhteessa DDT oli ideaali hyönteismyrkky. Esimerkiksi sen akuutti
 951 myrkyllisyys nisäkkäille on paljon alhaisempi kuin nykyisin käytettävien parationin ja malationin sekä niiden
 952 johdannaisten. Organokloriinit kuten DDT hajoavat hitaasti ja ovat rasvaliukoisia. Tämän takia ne kertyvät
 953 (biokonsentroituvat) ravintoketjussa (Kuva 3). Suurin osa rotanmyrkyistä on antikoagulantteja (veren
 954 hyytymisen estäjiä). Useat herbisidit vaikuttavat fotosynteesiin. Euroopassa eniten käytetyt herbisidiryhmät
 955 ovat tällä hetkellä kloro-s-triaatsinit, substituioidut fenyyliliureat ja kloroasetanilidit. Yksittäisistä yhdisteistä
 956 ja tuotemerkeistä Euroopassa eniten käytetty on diuron (Bayerin tuotemerkki, yhdiste on DCMU (3-(3,4-
 957 diklorofenyyli)-1,1-dimetyyliurea)). Pohjois-Amerikassa merkittävin käytössä oleva herbisidi on
 958 tuotenimeltään Roundup (glyfosaatti). Ehkä kaikkein tunnetuimmat kasvinsuojeluaineet ovat 2,4-D ja 2,4,5-
 959 T, joiden sekoitusta, agent orangea, käytettiin Vietnamin sodassa tuhoamaan viidakon kasvien lehtiä. Agent
 960 orangen epäpuhtauksina sisältämät dioksiinit aiheuttivat kaikkien aikojen huomattavimman ihmisten
 961 dioksiinialtistuksen, kun viidakkoa myrkytettäessä kylien asukkaat saivat päälleen myrkyä. Kaikkien
 962 tuholaismyrkkijien käyttöön liittyy kaksi ongelmaa: ensinnäkin ne ovat haitallisia myös muille kuin
 963 kohdeorganismeille ja toiseksi ne leviävät erityisesti vesistöihin. Esimerkkinä haittavaikutuksista selvästi
 964 muille kuin kohdeorganismeille on se, että atrasiini-kasvinsuojeluainetta pidetään yhtenä mahdollisena
 965 syynä sammakkokantojen romahtamiseen. Esiintyvät ympäristöpitoisuudet ovat riittävän korkeita
 966 häiritsemään sammakkojen varhaista seksuaalista kehitystä. Eräät yhdisteet ovat myös paljon
 967 myrkyllisempiä muille kuin kohdeorganismeille (Taulukko 5). Rikastuminen ravintoketjuissa on ongelma
 968 ennen kaikkea rasvaliukoisten, hitaasti hajoavien yhdisteiden osalta, mistä syystä tuholaismyrkkijien
 969 nopeaan hajoavuuteen on viime vuosina kiinnitetty huomiota.

971 Taulukko 5. Esimerkkejä aineen (hyönteismyrkky malationi) akuutin tappavan myrkyllisyyden eroista eri
 972 eliöryhmillä. Pitoisuudet otettu www.pesticideinfo.org verkkosivuilta.

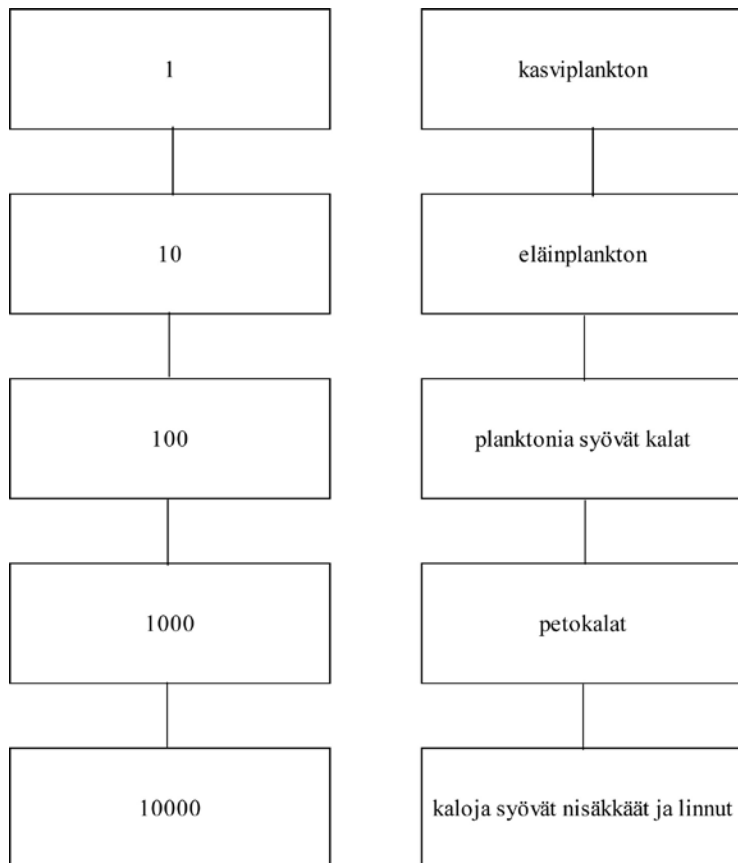
973

974	eliö	LC50 (mikrog/l)
975	Tetrahymena (mikrolevä)	12600
976	Kirjolohi	n. 100
977	Vesikirppu (<i>Daphnia magna</i>)	n. 4
978	Sammakko (<i>Rana hexadactyla</i>)	1,2

979

980

981 Kuva 3. Rasvaliukoisen ympäristömyrkyr rikastuminen vesiympäristön ravintoketjussa. Rikastumisen
 982 tehokkuus riippuu kemikaalin ominaisuuksista kuten sen rasvaliukoisuudesta ja pysyvyydestä
 983



984

985 2.4.3. Halogeeneja sisältävät yhdisteet

986 Halogeeneja sisältävät orgaaniset yhdisteet ovat yleensä sitä myrkyllisempiä mitä useamman halogeenin ne
 987 sisältävät. Aikaisemmin puunjalostusteollisuus oli tärkein kloorattujen hiilivetyjen lähde, kun klooria
 988 käytettiin paperin valkaisuun. Kloorivalkaisusta on paljon siirrytty otsonivalkaisuun. Tämä luonnollisesti
 989 vähentää ympäristöön joutuvien klooriyhdisteiden määrää, mutta on lisännyt paperintuotannon
 990 energiankulutusta. Kloorattujen hiilivetyjen myrkyllisyys kasvaa myös yhdisteen sisältämien
 991 (bentseeni)renkaiden määrän lisääntyessä. PCB-yhdisteet (polychlorinated biphenyls) ovatkin eräs
 992 tärkeimmistä ja haitallisimmista ympäristömyrkkryhmistä. Niitä on jopa 200 eri muotoa (congeners) .
 993 PCB:itä käytettiin eri sekoituksina muun muassa voiteluaineina ja muuntajissa sähköä johtamassa. Vaikka
 994 PCB:t on nykyisin kokonaan kielletty, hitaan hajoamisensa takia ne ovat edelleen ympäristöongelma. On
 995 kuitenkin huomattava, että niiden (ja muiden pysyvien orgaanisten saasteiden; POP=persistent organic
 996 pollutants) taso esimerkiksi Itämeressä on laskenut huomasti huippuvuosistaan 1970-luvun alussa.
 997 Merkittäviä saasteita ovat furaanit ja dioksiinit. Myös nämä yhdisteet esiintyvät lukuisina eri muotoina,
 998 joiden myrkyllisyys vaihtelee suuresti kuten PCB:idenkin. Tämän vuoksi aineiden myrkyllisyys arvioidaan
 999 tavallisesti dioksiiniekvivalenteina. Dioksiineja pidetään supermyrkkyyinä, mutta niiden akuutti myrkyllisyys
 1000 vaihtelee 10000-kertaisesti esimerkiksi eri rottakantojen välillä. Aineet ovatkin pääasiassa kehitykseen
 1001 vaikuttavia ja teratogeenisiä (kasvaimia aiheuttavia) yhdisteitä. Furaaneja ja dioksiineja ei ole spesifisesti
 1002 tuotettu, vaan niitä esiintyy toisaalta kasvinsuojeluaineiden (herbisidit) ja PCB:iden sekä fenolisten
 1003 yhdisteiden epäpuhtauksina ja toisaalta syntyy (furaanit) paperin kloorivalkaisussa ja yleisesti
 1004 epätäydellisessä palamisessa. Itämeren dioksiineista on tullut huomattava uutisaihe, kun silakan ja lohien

1005 pitoisuus usein ylittää EU:ssa asetetut raja-arvot. Raja-arvojen mielekkyys on kyseenalainen, kun ne eivät
 1006 ota huomioon ruuan saantimäärää. Raja-arvot ovat täsmälleen samat maidolle, jota keskimääräinen
 1007 suomalainen nauttii noin kaksi kiloa viikossa ja Itämeren lohelle, jonka saanti on keskimäärin alle kaksi kiloa
 1008 vuodessa – eli vuosittainen altistus maidosta on yli 50-kertainen loheen verrattuna, jos myrkkypitoisuus on
 1009 sama.

1010

1011 Klooria sisältävät yhdisteet on myrkyllisyytensä vuoksi pääosin kielletty. Halogeeniyhdisteistä bromia
 1012 sisältävät palonestoaineet ovat levinneet viime vuosina erityisesti vesistöihin. Kaiken kaikkiaan bromia
 1013 sisältäviä palonestoaineita on noin 70 erilaista. Niistä vanhimmat ovat osoittautuneet myrkyllisiksi ja niiden
 1014 valmistus ja käyttö on kielletty – tällaisia ovat esimerkiksi polybrominoidut bifenolit, polybrominoiduista
 1015 difenyylieettereistä (PBDE) OctaBDE ja PentaBDE ja heksabromosyklododekaani (HBCD). Yleisimmin tällä
 1016 hetkellä käytetty brominoitu palonestoaine on DecaBDE, jonka myrkyllisyyttä pidetään tällä hetkellä
 1017 vähäisenä. Toinen paljon käytetty yhdiste, erityisesti tietotekniikan piirilevyissä, on tetrabromobisfenyyli A
 1018 (TBBPA). Vaikkakin yhdiste on etenkin vesieliöille sangen myrkyllinen, sen uskotaan leviävän ympäristöön
 1019 niin vähän, ettei myrkyvaikutuksia ole. Orgaanisten fluoriyhdisteiden (esimerkiksi perfluoroalkyylihapot)
 1020 leviäminen, pysyvyys ja myrkyllisyys tunnetaan huonosti. Alun perin niiden uskottiin olevan suhteellisen
 1021 haitattomia, kun niiden ajateltiin olevan inerttejä ja pysyvän siellä, mihin ne on laitettu. Kuitenkin 1990-
 1022 luvulla tehdyissä tutkimuksissa on havaittu yhdisteiden leviävän ympäristöön.

1023

1024 2.4.4. Hormonihäiritsijät

1025 Vaikka hormonihäiritsijöiden tulisi kattaa kaikkien hormonien toimintaa häiritsevät ympäristömyrkyt, on
 1026 yleiseksi käytännöksi muodostunut, että käsitettä käytetään sukupuolihormonien toimintaan vaikuttavasta
 1027 kontaminaatiosta. Täten hormonihäiritsijät usein jaetaan estrogeeniagonisteihin ja –antagonisteihin,
 1028 androgeeniagonisteihin ja –antagonisteihin, estrogeeni- ja androgeenireseptoreihin vaikuttaviin yhdisteisiin
 1029 ja sukupuolihormonien tuotantoon tai hajotukseen vaikuttaviin yhdisteisiin (Taulukko 6). Täten monet
 1030 erityyppiset yhdisteet voivat olla hormonihäiritsijöitä. Luonnossa on havaittu sekä eläinten feminisaatiota
 1031 että maskulinisaatiota. Ehkä laajin hormonihäirinnän tulos on ollut orgaanisten tinayhdisteiden aiheuttama
 1032 simpukoiden maskulinisaatio. Luonnonvesissä on myös esiintynyt kalojen feminisaatiota, jota on tutkittu
 1033 paljon selvittämällä yleensä vain naaraiden maksassa esiintyvän vitellogeniinin induktiolla.

1034

1035 Taulukko 6. Sukupuolihormonien toimintaan vaikuttavien hormonihäiritsijöiden ryhmät ja ryhmien
 1036 pääasialliset vaikutukset. Estrogeenisia aineita ovat taulukossa mainittujen lisäksi mm. useat
 1037 organokloriinihyönteismyrkyt, muoviteollisuuden ftalaatit ja nonyyliifenoli sekä dioksiinit, furaanit ja PCBt.
 1038 Androgeenisia aineita ovat varmasti orgaaniset tinayhdisteet TBT (tributyylitina) ja TPT (trifenyylitina)

1039

1040 Estrogeeniagonistit Sitoutuvat luontaiseen estrogeenireseptoriin aktivoiden sitä.
 1041 Ryhmään kuuluu luontaisia estrogeenejä
 1042 (naarassukupuolihormoneja), ehkäisy pillereiden keinotekoisia
 1043 hormoneja, kasviestrogeenejä, kosmetiikkaa ja aurinkosuojien
 1044 kemikaaleja.

1045

1046 Androgeeniagonistit Sitoutuvat androgeenireseptoriin sitä aktivoiden. Ryhmässä on
 1047 luontaisia miessukupuolihormoneja ja tiettyjä kosmetiikan ja
 1048 aurinkosuojien kemikaaleja

1049

1050	Estrogeeniantagonistit	Sitoutuvat estrogeenireseptoriin vähentäen sen aktivoitumista
1051		estrogeenien vaikutuksesta.
1052		
1053	Androgeeniantagonistit	Sitoutuvat androgeenireseptoriin vähentäen sen aktivoitumista
1054		androgeenien vaikutuksesta. Mm. DDE toimii näin.
1055		
1056	Kemikaalit, jotka vaikuttavat luontaisten hormonien muuhun metaboliaan	
1057		
1058	Kemikaalit, jotka vaikuttavat hormoni-	Yksi tärkeä vaikutuskohta on aromataasientsyymi, joka
1059	tuotantoon ja hajotukseen	toimii androgeenien muuntamisessa estrogeeneiksi
1060		
1061	Kemikaalit, jotka vaikuttavat hormonireseptorien määrään	
1062		
1063		

1064 2.4.5. lääkeaineet ja henkilökohtaisen hygienian hoitotuotteet

1065 Lääkeaineiden pääsy ympäristöön on noussut viime vuosina huomion kohteeksi paristakin syystä.
1066 Ensinnäkin lääkkeiden päämääränä on olla stabiileja ja huonosti hajoavia. Tämän vuoksi ne voivat mennä
1067 muuttumattomina jätevesien puhdistuksen läpi. Toiseksi antibioottiset yhdisteet tappavat myös jätevesien
1068 puhdistuksessa tärkeitä selkeytysaltaiden bakteereja huonontaan vedenpuhdistuslaitosten
1069 toimintatehokkuutta. Henkilökohtaisen hygienian hoitotuotteista erityisesti aurinkovoiteet, jotka
1070 vesistöihin joutuessaan muuntuvat auringon ultraviolettisäteilyn vaikutuksesta vesieliöille haitallisiksi, ovat
1071 toksikologisen kiinnostuksen kohteena. Useissa henkilökohtaisen hygienian hoitotuotteissa on
1072 hormonihäiritsijöitä.

1073
1074 Halpatuotantomaiden edullisuus tuotannossa perustuu alhaisten palkkakustannusten lisäksi esimerkiksi
1075 siihen, että teollisuuden jätevesiä ei usein mitenkään puhdisteta. Tämän vuoksi maailman korkeimmat
1076 ympäristön lääkeainepitoisuudet on mitattu Intian lääketeollisuuskeskittymien lähistöllä. Pitoisuudet ovat
1077 jopa niin korkeita, että lasillinen vettä lääketeollisuuden lähiympäristöstä riittäisi antamaan päivän
1078 antibioottiannoksen lääkekuurilaiselle. Lääkeainepäästöjen seurauksena on eräiden Intian alueiden
1079 sammakkojen luonnonpopulaatioissa havaittu selvä epämuodostumien esiintymisen lisääntyminen. Kun
1080 tällä hetkellä kustannussäästöjen saavuttamisen nimissä suomalainenkin lääketeollisuus on siirtämässä
1081 toimintojaan Intiaan, tulisi miettiä, mitkä ovat palkkojen alemman tason lisäksi muut syyt, joiden vuoksi
1082 kustannukset ovat alhaisia.

1083
1084 Lääkeaineiden leviäminen ympäristöön teollisuuden päästöissä luo tilanteen, jossa maaperän bakteereihin
1085 kehittyä esimerkiksi antibioottiresistenttejä kantoja. Kun lisäksi lääkeainepäästöjä hyvin sietävien
1086 bakteerien evoluutiossa niiden geenien siirtyminen muihin bakteereihin on tehostunut, ympäristön
1087 saastuminen lääketeollisuuden vaikutuksesta voi vähitellen johtaa siihen, että teollisuuden tuottamat
1088 lääkkeet eivät enää tepsii bakteereihin, joita niiden on tarkoitus tappaa. Antibioottiresistenttien bakteerien
1089 uhka onkin nousemassa tärkeäksi terveydenhuollon ongelmaksi, mitä ei lainkaan helpota viime aikoina
1090 lisääntynyt ”terveydenhuoltomatkailu” Intiaan. Euroopasta tehdään nykyisin paljon matkoja, joiden
1091 pääasiallinen tarkoitus on halvan kosmeettisen leikkauksen tekeminen. Pahimmassa tapauksessa tuliaisena
1092 on Euroopalle uuden antibioottiresistentin bakteerin leviämisen alkua.

1093

1094 2.4.6. Pesuaineet (detergentit)

1095 Lika ja tahrat vaatteissa, tiskin lika ja lika ihollamme ovat pääasiassa rasvoja tai rasvaliukoisia aineita.
1096 Tämän vuoksi kaikkien saippuoiden ja pesuaineiden tärkeimpänä osasena ovat aineet, jotka vähentävät
1097 rasvojen pintajännitystä niin, että rasvapallukoista tulee pieniä misellejä (pinta-aktiiviset aineet). Kun
1098 kuitenkin kaikkien solujen kalvot ovat pääasiassa rasvoja, voivat detergentit olla hyvinkin haitallisia eliöille
1099 liuottaessaan kalvoja ja lisäten solujen ja soluorganellien läpäisevyyttä. Haittana voi mm. olla
1100 energiantuotannon häiriintyminen, kun mitokondrioiden läpäisevyys muuttuu.

1101

1102 2.4.7. Puunjalostusteollisuuden jätevedet

1103 Verrattuna 1970-luvun tilanteeseen Suomen ja Ruotsin puunjalostusteollisuuden myrkylliset
1104 jätevesipäästöt ovat vain pari prosenttia, vaikka esimerkiksi paperin tuotanto on selvästi kasvanut. Suurin
1105 muutos, mikä selluloosan ja paperin valmistuksessa on tapahtunut, on kloorivalkaisun merkityksen
1106 vähentyminen. Tämä muutos on vähentänyt jätevesien myrkyllisyyttä merkittävästi ja aikaisemmin
1107 jätevesissä paljon esiintyneet PCB:t ovat lähes kokonaan poistuneet. Kloorivalkaisun lisäksi klorofenolien
1108 käyttö estämässä puuaineksen sinistymistä on loppunut. Suomen puunjalostusteollisuus käyttää nykyisin
1109 uudestaan kirkkaasti yli 90 % vedestään, mikä edellyttää tehokasta vedenpuhdistusta. Tällä hetkellä
1110 haitallisimpia ympäristöön pääseviä yhdisteitä ovat puiden luontaiset yhdisteet: havupuissa hartsihapot,
1111 jotka ovat pihkan pääasialliset osaset. ja lehtipuissa esimerkiksi fenolit. Nykyisiä päästöjä haitallisempaa
1112 voikin olla vesistöjen pohjasedimentteihin kertynyt aikaisempi jäte, jossa on paljon kloorattuja yhdisteitä.
1113 Puunjalostusteollisuuden jätevesienkin osalta vaatimukset mm. Kiinassa poikkeavat huomasti siitä, mitä
1114 Euroopassa ollaan valmiita hyväksymään. Kuten täällä 1960-luvulla, siellä lasketaan tälläkin hetkellä
1115 jätevedet puhdistamattomina vesistöihin ja kloorivalkaisu on yleistä.

1116

1117 2.5. Nanomateriaalit

1118 Eräs merkittävimmistä uusista ympäristöön joutuvista aineryhmistä ovat nanomateriaalit. Määritelmänä
1119 nanomateriaalille on, että jokin dimensio on alle 100 nm. Vaikka nanomateriaalien ei tällä hetkellä
1120 tiedetäkään olevan erityisen myrkyllisiä, johtopäätökset voivat olla ennenaikaisia. Tätä nykyä
1121 nanomateriaalien toksikologia onkin ehkä eniten tutkittu uusi alue. Pelkistetysti useimmat nanomateriaalit
1122 ovat metalli-ionien ja hiilen nanoputkien tai vastaavien muodostamia kokonaisuuksia. Ehkä tärkein
1123 nanomateriaalien myrkyllisyyden arvioinnin epävarmuutta aiheuttava tekijä on, että materiaalien
1124 ympäristöön joutuvat partikkelikoot tunnetaan huonosti. Lisäksi varsinkin alkuvaiheiden tutkimukset
1125 kartoittivat huonosti nanomateriaalien, erityisesti metallisten nanopartikkeleiden, koon ja myrkyllisyyden
1126 yhteyttä tai sitä, missä määrin havaitut kokonaisvaikutukset johtuvatkin vapaista metalli-ioneista. Yksi
1127 nanomateriaalien potentiaalinen vaikutustapa on, että koska nanopartikkelit ovat pieniä, niiden välityksellä
1128 aineet pääsevät lähelle vaikutuskohdettaan. Tämänhetkiset tutkimustulokset ovat sangen ristiriitaisia –
1129 esiintyy sekä tuloksia, joiden mukaan myrkyllisyys selittyy suurimaksi osaksi nanomateriaaleista liukenevista
1130 metalli-ioneista että havaintoja, joiden mukaan metalli-ioni nanomateriaalissa on myrkyllisempi kuin
1131 vastaava vapaa metalli-ioni. Yksi mahdollinen syy ristiriitaisiin havaintoihin on, että varmasti aineen
1132 kulkeutumisreitti vaikuttaa sen myrkyllisyyteen. Lisäksi tehdyissä tutkimuksissa on viime aikoina ruvettu
1133 kiinnittämään huomiota sekä siihen, miten eliöt vaikuttavat nanopartikkeleihin että siihen, mikä merkitys
1134 luontaisilla ympäristömuutoksilla (lämpötila, UV-säteily yms.) on nanomateriaalien myrkyllisyyteen. Yksi
1135 yleinen nanomateriaaleihin liitetty myrkyllisyyden mekanismi on, että ne aiheuttaisivat oksidatiivisia
1136 stressejä.

1137

1138 2.6. Säteily

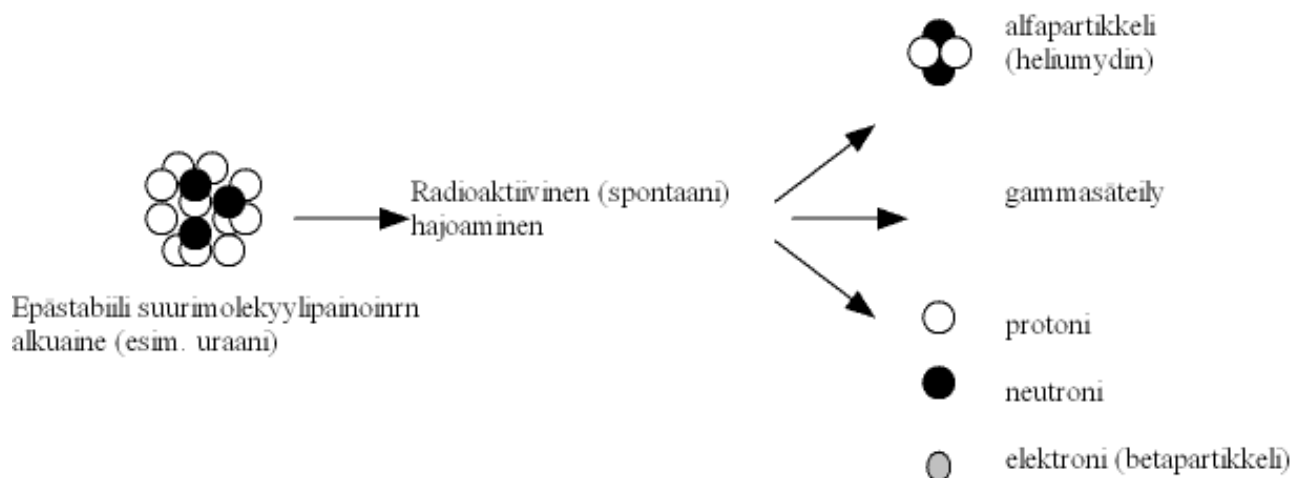
1139 2.6.1. Radioaktiivinen säteily

1140 Radioaktiivista säteilyä on kolmea tyyppiä: α -, β - ja γ -säteily (Kuva 4). α -säteily (joka on helium-ytimien
1141 kulkeutumista) on korkea-energiaisinta, mutta johtuen pääasiassa säteilevien partikkelien suuresta koosta,
1142 sen läpäisevyys on vähäistä. Käytännössä jo ihon paksuus on riittävä este läpäisylle. Kuitenkin α -säteilyn
1143 partikkelien suuruus ja korkea energia aiheuttavat sen, että soluihin päästessään, kuten tapahtuu jos
1144 radioaktiivista pölyä hengitetään tai radioisotooppien kontaminoimaa ruokaa syödään, se aiheuttaa
1145 useimmiten kromosomivaurioita ja johtaa helposti syöpään ja kehityshäiriöihin. Tämän vuoksi esimerkiksi
1146 plutonium on erityisen myrkyllistä. β -säteily on elektronien (tai niiden positiivisten vastineiden,
1147 positronien) kulkeutumista. Kulkeutumisenergia vaihtelee suuresti ollen hyvin pientä tritiumin,
1148 radioaktiivisen rikin ja hiilenkin tapauksessa, mutta kohtuullisen suurta esim. radioaktiivisen fosforin ja
1149 natriumin osalta. Kaikkia näitä säteilijöitä käytetään yleisesti biologisissa laboratorioissa. Suojautumisessa
1150 β -säteilyltä käytetään usein pleksilasista tehtyjä esteitä. γ -säteilyn energia on alhainen, mutta säteilyn
1151 läpäisevyys suuri. Todennäköisyys, että säteily aiheuttaa soluvaurioita on pieni, mutta johtuen siitä, että
1152 kulkeutumismatka on pitkä, joku/jotkut elimistön solut voivat vaurioitua. γ -säteilyltä suojaudutaan yleisesti
1153 esim. lyijytiiliä käyttäen. Ehkä yleisimmät ja haitallisimmat γ -säteilyn lähteet ovat jodin isotoopit. Nämä
1154 kertyvät kilpirauhaseen lisäten syövän todennäköisyyttä. Radioaktiivisen säteilyn tyypin ja energian lisäksi
1155 radioisotoopin puoliintumisaika on merkittävä muuttuja säteilyn haitallisuuden arvioinnissa.
1156 Puoliintumisaika (aika, joka kuluu siihen, että lähteestä tuleva säteily vähenee puoleen) vaihtelee sekunnin
1157 murto-osista satoihin tuhansiin vuosiin. On ilman muuta selvää, että kahdesta muuten samankaltaisesta
1158 isotoopista haitallisempi on se, jonka puoliintumisaika on pitempi.

1159 Kuva 4. Radioaktiivisen säteilyn tyypit. Alkuaine, jonka molekyylipaino on korkea, on usein epästabiili ja
1160 hajoaa spontaanisti (radioaktiivinen hajoaminen). Hajoamistuotteita ovat alfapartikkelit (heliumytimet),
1161 betapartikkelit (elektronit, joskus myös vastaavat positiivisesti varautuneet partikkelit, positronit), tuman
1162 neutronit ja protonit sekä alkuperäistä alhaisemman molekyylipainon omaavan alkuaineen ydin. Lisäksi
1163 vapautuu gammasäteilyä, jonka partikkelit ovat äärimmäisen pieniä fotoneita. Gammasäteily voidaan
1164 selittää myös aaltoliikkeenä.

1165

1166



1167

1168

1169 Radioaktiivisuuden lähteitä ovat olleet ensinnäkin sotilaalliset ydinkokeet, joita alkuvaiheessa tehtiin
1170 ilmakehässä. Tämän seurauksena muun muassa arktisen alueen jäkäliin ja poroihin kertyi sangen paljon
1171 radioaktiivisia isotooppeja. Ihmisen merkityksen isotooppien leviämisessä pystyy osoittamaan siitä, että
1172 kertyneiden aineiden joukossa on cesiumin isotooppeja, joita syntyy vain ihmistoiminnan tuloksena. Kun

1173 ydinkokeet aluksi siirrettiin maanalaisiksi ja niistä sittemmin pääosin luovuttiin, merkittävimmäksi
1174 päästöjen sotilaalliseksi lähteeksi ovat nousseet ydinpolttoaineen käsittelylaitokset, joissa ydinaseissa
1175 käytettävä plutonium tuotetaan. Näiden läheisyydessä ympäristön radioaktiivisuus on yleisesti kohonnut ja
1176 joidenkin (mm. Sellafield Iso-Britanniassa) päästöt ovat selvästi saastuttaneet lähialueita. Toinen
1177 sotilaallisen toiminnan riski ovat ydinasevarastot ja aseiden sisältämän materiaalin kulkeutuminen
1178 asiaankuulumattomiin käsiin. Käyttämällä suhteellisen pieniä määriä plutoniumia (vain pari kiloa
1179 vesijohtoverkkoon levitetynä) voisivat terroristit saastuttaa jopa miljoonien ihmisten asuin ympäristön.
1180 Ydinasevarastojen onnettomuudet voivat vapauttaa suuria määriä radioaktiivisuutta ympäristöön. Näin on
1181 tapahtunut entisessä Neuvostoliitossa, missä pahimmillaan useiden kymmenien tuhansien ihmisten
1182 ympäristö tuli asuinkelvottomaksi.

1183
1184 Normaali ydinvoimaloiden toiminta energiantuotannossa ei aiheuta merkittäviä radioaktiivisia päästöjä.
1185 Esimerkiksi hiiltä, öljyä ja turvetta polttoaineenaan käyttävien voimaloiden radioaktiiviset päästöt voivat
1186 olla suurempia. Ydinvoiman vastustus perustuukin kahteen asiaan: ensinnäkin riskiin onnettomuudesta ja
1187 toiseksi käytetyn radioaktiivisen polttoaineen lopulliseen sijoitukseen niin, ettei säteilyä voi päästä
1188 ympäristöön. Useimpien ydinvoimaloiden toiminnanaikaisten radioaktiivisten päästöjen kohoamisen
1189 todennäköisyys on pieni. Tästä poikkeuksen muodostavat Tsernobyli-tyyppiset voimalat, joissa tapahtuvien
1190 ketjureaktioiden tuloksena suuretkin määrät radioaktiivisuutta voivat päästä ympäristöön. Näin tapahtuikin
1191 toistaiseksi suurimmassa ydinvoimalaonnettomuudessa Tsernobyli 1986. Tämän tyyppisistä voimaloista
1192 on niihin liittyvien riskien vuoksi pyritty pääsemään eroon. (Pääasiallinen syy Tsernobyli-tyyppisten
1193 voimaloiden rakentamiseen oli, että niitä käyttäen ydinpolttoainetta voitiin helposti rikastaa sotilaalliseen
1194 käyttöön. Näin tehtiin erityisesti Neuvostoliitossa). Ydinvoimalaonnettomuuksien ja niihin liittyvien riskien
1195 todennäköisyys tietysti suurenee, jos voimalat sijaitsevat maanjäristysalueella kuten Japanin ydinvoimalat.
1196 Voimaloiden tuottaman radioaktiivisen jätteen loppusijoitus on herättänyt suuria tunteita. Suomessa on
1197 päädytty ratkaisuun, että jäte sijoitetaan umpinaisissa astioissa syvälle peruskallioon. Ajatuksena on, että
1198 peruskalliossa ei tapahdu jäteastioiden murtumista aiheuttavia liikkeitä niin kauan kun jätteessä on
1199 merkittävää aktiivisuutta.

1200
1201 Suomessa on suuri radioaktiivisuuteen liittyvä luontainen ympäristöongelma. Erityisesti rapakivialueilla on
1202 paljon radioaktiivista radon-kaasua. Sitä voi olla tuulettamattomassa huoneilmassa jopa niin, että
1203 epidemiologiset tutkimukset osoittavat syöpäriskin kasvaneen. Huoneilman radonpitoisuudet kasvoivat,
1204 kun energiasäästön vuoksi uuden ilman ottoa taloihin vähennettiin.

1205 1206 2.6.2. UV-säteily

1207 Ultraviolettisäteily on lyhytaaltoisempaa kuin näkyvä valo. Haitallisuus perustuu osittain siihen, että säteily
1208 aiheuttaa soluissa palovammoja ja vahingoittaa erityisesti näkösoluja ja osittain siitä, että säteilyn
1209 vaikutuksesta reaktiivisten happimuotojen (ROS) määrä kasvaa, mikä toisaalta aiheuttaa eliöissä
1210 oksidatiivista stressiä ja toisaalta ympäristön kemikaalien muuntumista.

1211 1212 2.6.3. Muu lyhytaaltainen säteily

1213 Matkapuhelinten lyhytaaltainen radiosäteily on viime aikoina nostettu esiin mahdollisena aivo- ja muiden
1214 kasvainten aiheuttajana. Tähän mennessä tehdyt tutkimukset eivät ole kuitenkaan ole varmistaneet
1215 vaikutusta. Huomattava on, että useat eläimet aistivat elektromagneettista säteilyä – magneettiaistin
1216 olemassaolo on havaittu kaikilla selkärangaisryhmillä ja useilla selkärangattomilla. Muun muassa useat
1217 muuttolinnut käyttävät magneettiaistia suunnistaessaan. Tämän vuoksi esimerkiksi voimalinjat ja

1218 matkapuhelinten tukiasemat, jotka molemmat vaikuttavat ympäristönsä elektromagneettisiin kenttiin,
1219 voivat häiritä lintujen normaalia muuttoa.

1220

1221 2.7. Geenimuuntelu

1222 Muunneltujen geenien toiminta on täsmälleen samanlaista riippumatta siitä, johtuuko uudenlainen
1223 toiminta geenitekniikan avulla tehdystä keinotekoisesta muuntelusta tai perinteisestä jalostuksesta.
1224 Geenimuuntelusta tekee erityisen vahvan menetelmän se, että sitä käyttäen saadaan eliöihin sellaisia
1225 ominaisuuksia, joiden tuleminen eliöihin jalostuksen avulla olisi epätodennäköistä. Geenimuuntelun avulla
1226 on vaikutettu mm. kasvien kylmänkestoon ja luotu entistä paremmin tuholaisia sietäviä lajikkeita.
1227 Muunneltujen geenien osalta keskustelun pitäisi pohtia paremminkin, miten geenin toiminnalla voi olla
1228 vaikutuksia ympäristöön eikä niinkään sitä, millä menetelmällä geenimuunnos on aikaansaatu. Koska eri
1229 geenituotteet poikkeavat toiminnoiltaan merkittävästi, ei tätä voida käsitellä yhtenä geenimuunteluun
1230 liittyvänä asiana vaan jokaisen muunnellun geenin toiminnan mahdolliset ympäristövaikutukset on
1231 käsiteltävä erikseen.

1232 Geenimuunteluun liittyviä yleisiä ympäristöriskejä on ensinnäkin se, että yleisesti käytetään
1233 antibioottiresistenssigeeniä osoittamassa, että geenin siirto on onnistunut. Vain ne organismit, joissa
1234 geeninsiirto on onnistunut, onnistuvat kasvamaan antibioottien läsnä ollessa. Tämä lisää
1235 antibioottiresistenssin muodostusmahdollisuutta luonnossa. Suurimittakaavainen geeninsiirto toteutetaan
1236 yleensä siten, että siirrettävän geenin tarkkaa paikkaa genomissa ei myöhemmin tiedetä. Näin ollen jää
1237 mahdolliseksi, että esimerkiksi jonkun säätelygeenin toiminta häiriintyy. Siirretyn geenin hyppääminen
1238 lähisukuisiin luonnonlajeihin on myös mahdollista. Muuntogeenisten eliöiden karkaaminen ja leviäminen
1239 ekosysteemissä täytyy ottaa huomioon. Tämä on pyritty estämään esimerkiksi kalankasvatuksessa
1240 tekemällä muuntogeeniset kalat steriileiksi. Kasvien tekeminen tuholaisia tappavaksi tai paremmin
1241 tuholaismyrkyjä sietäviksi voi vaikuttaa kahdella tavalla. Ensinnäkin kuolleiden eliöiden jäämät siirtyvät
1242 niitä syöviin eläimiin ja voivat aiheuttaa niissä toimintahäiriöitä. Toiseksi tuholaiden myrkkujen sieto voi
1243 kasvaa sukupolvi sukupolvelta – itse asiassa tämä voi olla hyvä esimerkki evoluutiosta, joka yleisesti on sitä
1244 nopeampaa mitä lyhyempi eliön sukupolviväli on. Lisäksi geenimuunneltujen kasvilajikkeiden ja esimerkiksi
1245 tiettyjen herbisidien myynnin välillä on kytkeykauppaa. Sama suuryritys, joka tuottaa ja myy paljon käytettyä
1246 epäspesifistä rikkakasvimyrkyä myy myös tälle myrkylle resistentiksi geenimuuntelun avulla tehtyjä
1247 hyötykasveja.

1248 3. Kemikaalien kulkeutuminen ympäristössä

1249

1250 3.1. Tärkeimmät kemikaalien päästölähteet

1251 Kemikaalit kulkeutuminen ympäristöön riippuu niiden käyttötarkoituksesta. Joidenkin kemikaalien kuten
1252 hyönteismyrkkujen ja kasvinsuojeluaineiden päästöt ovat tahallisia samoin kuin vesistöjä rehevöittävien
1253 lannoitteiden. Koska aineiden päästöt ovat käyttötarkoitukseensa välttämättömiä, tulee
1254 ympäristönsuojelun tehtäväksi minimoida aineiden pääsy muualle kuin tarkoitettuun käyttökohteeseensa.
1255 Varsinkin hyönteismyrkkujen osalta tämä ei ole täysin mahdollista, koska myös muut eläimet kuin
1256 myrkytettäväksi tarkoitetut lajit altistuvat kemikaalille. Joskus tällä on epätoivottuja vaikutuksia, varsinkin
1257 jos muut kuin kohdelajit ovat myrkylle hyvin herkkiä. Tästä esimerkkinä on horkkasääskien myrkyttäminen
1258 DDT:llä Borneossa 1960-luvulla YK:n ohjelmassa. Malariaa levittävät sääsket kyllä kuolivat, mutta niin
1259 kuolivat eräät loisampiaisetkin, jotka pitivät kurissa tietyt hyönteiset, joiden toukat söivät viidakkokylien
1260 asumusten ruohokatot. Nämä lajit eivät olleet DDT:lle yhtä herkkiä kuin loisampiaiset, minkä seurauksena

1261 kattoja syövien toukkien määrä lisääntyi räjähdysmäisesti. Lannoitteiden pääsyä vesistöihin voi vähentää
1262 niin lannoituksen ajoituksella kuin vesistöjen rantojen suojavaöhykkeitä käyttämällä.

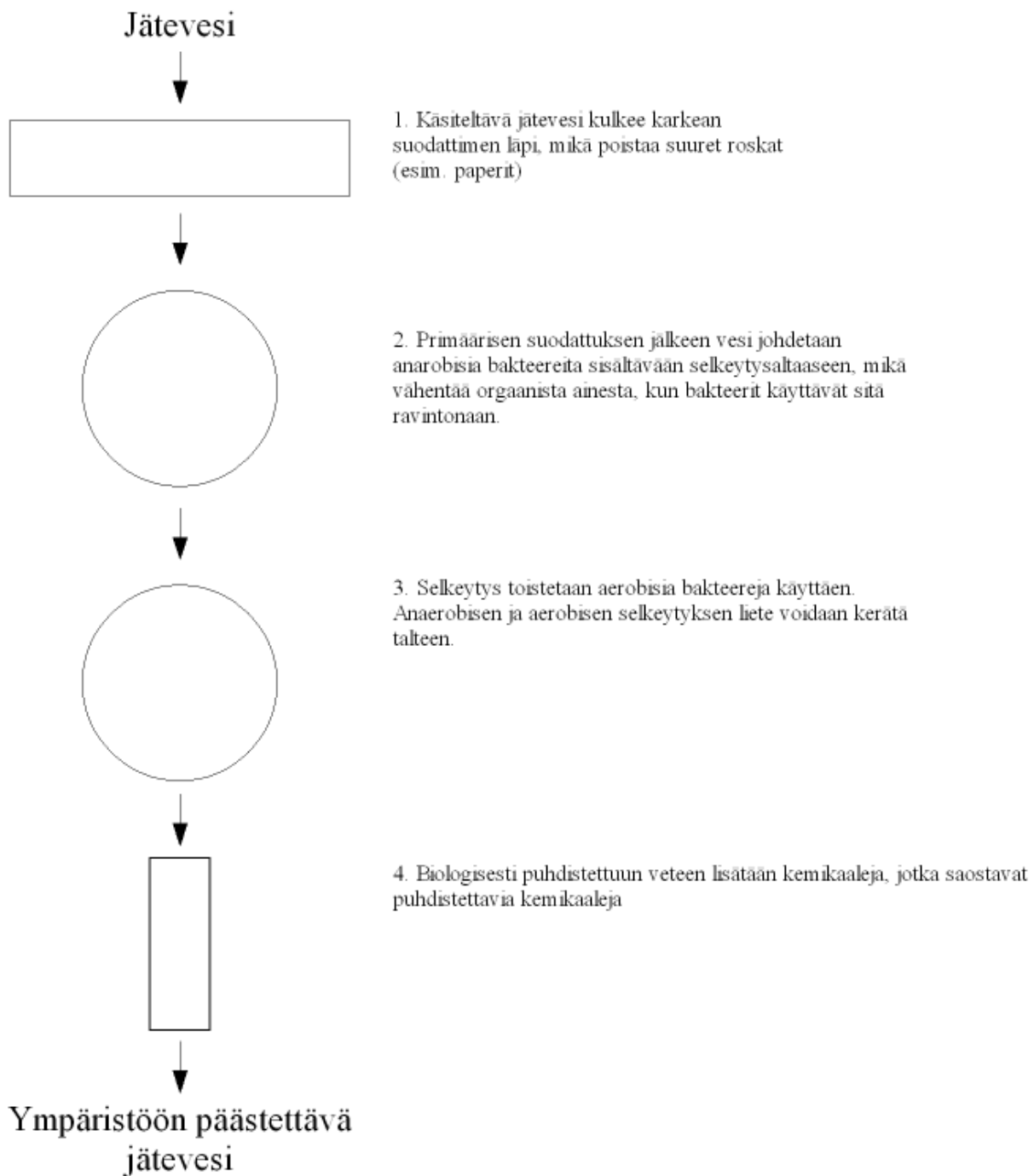
1263

1264 Useimmat kemikaalit joutuvat ympäristöön joko asutus- tai teollisuusjätevesissä. Molempien jätevesien
1265 puhdistus on parantunut merkittävästi Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa viimeisen viidenkymmenen
1266 vuoden aikana. Käytännöllisesti katsoen kaikkien taajamien ja teollisuuslaitoksien jätevedet kulkeutuvat
1267 puhdistamojen kautta. Kuvassa 5 on esitetty jätevesien puhdistuksen peruseriaatteet. Jätevesien
1268 puhdistuksen merkittävänä tuloksena on mm. se, että Thames- ja Rein-joissa on elinvoimaisia kalakantoja
1269 alajuoksulta alkaen. Puhdistamattomat jätevedet ovat tätä nykyä ongelma Aasiassa, Afrikassa ja osittain
1270 Etelä-Amerikassa. Melko ainutlaatuinen puhdistustoimiin liittyvä ongelma on suomalainen: kun taajamissa
1271 asustavat ihmiset siirtyvät kesäasumuksilleen, he samalla usein siirtyvät vedenpuhdistuksen ulkopuolelle.
1272 Kun kesäasumusten tason halutaan nykyisin olevan samanlainen kuin talviasumusten suihkuineen,
1273 vessoineen ja juoksevine vesineen, sadattuhannet kesäasukkaat aiheuttavat kesäaikaan huomattavasti
1274 suuremman, pääasiassa rehevöittävän, ympäristökuorman kuin mitä heidän toimistaan koituu talvisin. Osa
1275 jätteestä toki imeytyy maaperään, mutta kaikkiaan kesäasutuksen rantoja rehevöittävä vaikutus lienee
1276 suurempi kuin paljon parjatun kalanviljelyn. Kalanviljelyn päästöt ovat toki paikallisesti näkyviä, mutta
1277 Itämeren kokonaiskuormituksesta vain mitätön osa. Jotta kalanviljelyn näkyvä rehevöittämisvaikutus
1278 pienenisi, on laitoksien sijoittelua suunniteltava entistä paremmin: sekä pyrkimys sijoittaa
1279 verkkokassiviljelmät paikoille, joissa virtaus on suuri, että päämäärä sijoittaa viljelylaitokset kuivalle maalle
1280 tehtyihin altaisiin, joiden jätevedet voidaan puhdistaa, ovat kaikin puolin kannatettavia, mutta varsinkaan
1281 jälkimmäinen ei ole ilmaista. Tässä tullaankin taas ympäristöeettiseen, -ekonomiseen ja -poliittiseen
1282 kysymykseen: onko parempi hyväksyä kalanviljelyn aiheuttama rehevöityminen kuin sallia ylikalastus
1283 maailman merillä tai tuoda lentokoneilla Vietnamin kasvatettuja kaloja ruokapöytiiimme?

1284

1285 Kuva 5. Veden puhdistuksen periaatteet.

1286



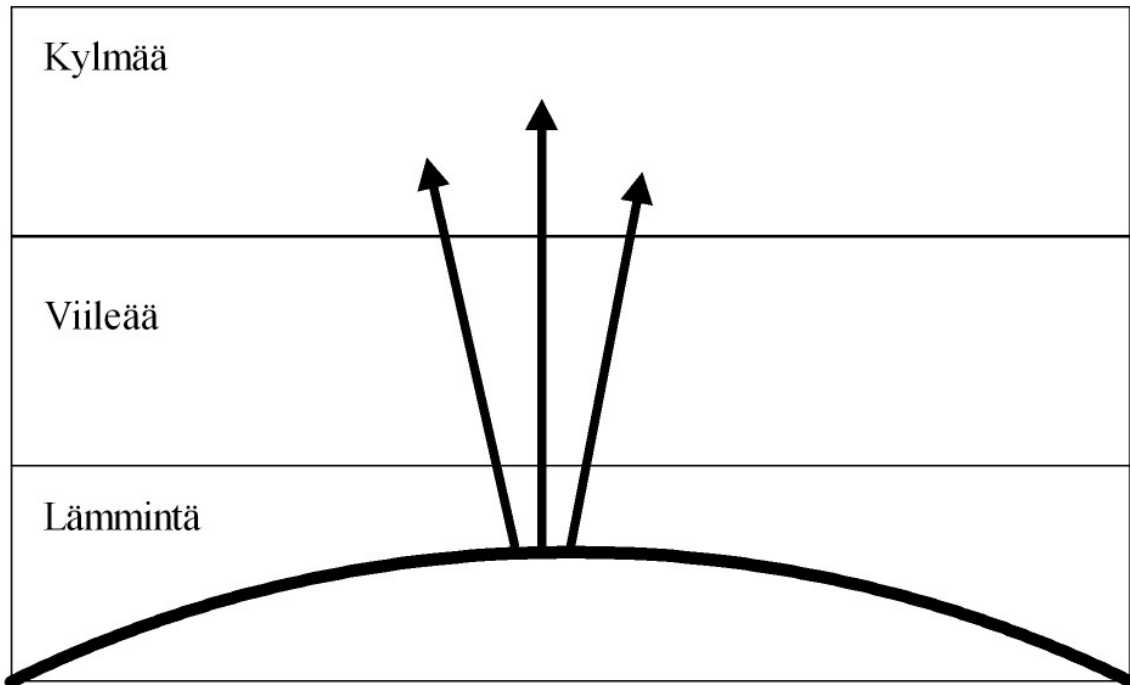
1287
1288

1289 Tärkeimmät päästölähteet maalla ovat savukaasut ja liikenteen päästöt. Molempien puhdistus on nykyisin
1290 Länsi-Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa sangen hyvin toimivaa. Muun muassa autojen katalysaattorit ovat
1291 vähentäneet liikenteen aiheuttamaa ympäristökuormaa merkittävästi. Dieselmoottorien
1292 pienhiukkassuodattimien yleistymisen ja polttoaineiden rikki- ja hiilidioksidipitoisuuksien rajoittaminen säädöksiin
1293 vähentävät edelleen ilman saastumista lähialueillamme. Ilman laadun ongelmat ovatkin siirtyneet
1294 Euroopasta ja Pohjois-Amerikasta Kaukoitään. Savusumua, jonka muodostumisen periaatteet on esitetty
1295 kuvassa 6, esiintyy nykyisin vain harvoin Los Angelesissa mutta yleisesti Pekingissä.

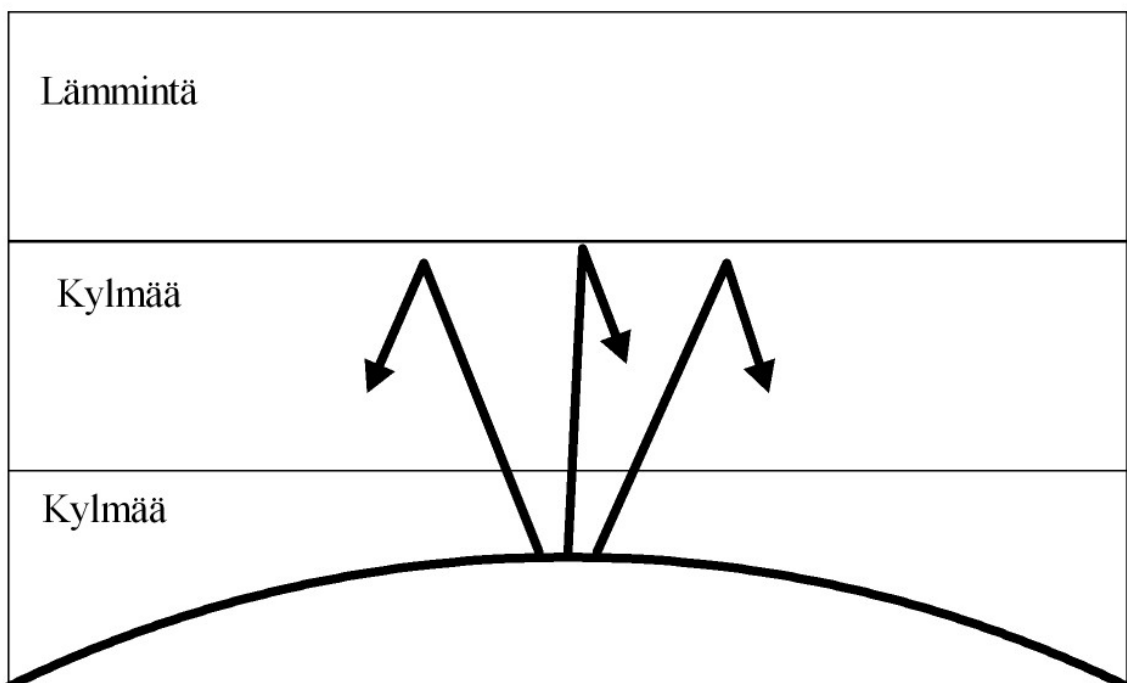
1296

1297 Kuva 6. Savusumun (smog) synty. Normaalityltilanteessa ilma viilenee alhaalta ylöspäin siirryttäessä, minkä
1298 ansiosta kemikaalit pääsevät poistumaan. Joskus esiintyy kuitenkin inversiota, jolloin lämmin ilma on
1299 ylempänä kuin kylmä ja tämän johdosta savusumua aiheuttavat kemikaalit jäävät alailmakehään.
1300

Normaali tilanne



Savusumun (smog) muodostuminen - inversio



1301

1302 3.2. Kemikaalien kaukokulkeutuminen.
1303 Uutisten kertomukset ihmisen valmistamien kemikaalien löytymisestä niin Antarktikselta kuin Grönlannista,
1304 kaukaa kemikaalien valmistus- ja käyttöpaikoilta osoittavat kemikaalien kaukokulkeutumisen olevan
1305 todellisuutta. Kulkeutuminen on mahdollista sekä merivirtojen että ilman virtauksien mukana. Sen lisäksi,
1306 että aineet voivat kulkea vaakatasossa, ilman ja veden virtaukset mahdollistavat sen, että merenpinnan
1307 tasolla käytetty ilmastointilaitteen jäähdytysnesteen komponentti tuhoaa stratosfäärin otsonikerrosta
1308 muutaman kymmenen kilometrin korkeudessa joitakin vuosia myöhemmin.

1309 4. Ekotoksikologian tärkeimmät tutkimuseliöt ja koejärjestelyt

1310
1311 4.1. Mallieliöt ekotoksikologiassa
1312 Ekotoksikologian käyttämät tutkimusorganismit riippuvat paljolti siitä, pyritäänkö työssä selvittämään
1313 ympäristömyrkkujen aiheuttamia elintoimintojen häiriöitä vai luonnonympäristössä esiintyviä ongelmia.
1314 Ensimmäisessä tapauksessa soveltuvat yleisesti käytössä olevat mallieliöt mittaushetkeiksi kun taas
1315 jälkimmäisessä tapauksessa tutkimuseliöiden on luonnollisesti kuuluttava tutkittavan alueen eliöstöön. Yksi
1316 toksikologian tutkijoiden päämäärästä on ollut mahdollisimman hyvin yhdistää nämä kaksi näkökulmaa ja
1317 löytää lajeja, joita voisi käyttää yleisinä malliorganismeina ekotoksikologisessa tutkimuksessa. Jos kyseessä
1318 olisi vain lauhkea vyöhyke, muutamat lajit kelpaisivatkin tällaisiksi: tutkimuksen kohteena voisivat olla
1319 esimerkiksi vesikirppu (*Daphnia*), *Lemna*-suvun vesikasvit, *Lumbricus*-lierot kuten kastemato ja onkiliero,
1320 hyppyhäntäiset, kaloista kolmipiikki ja sinisimpukka. Trooppisen ja lauhkean ilmastoinnin raja jakaa kuitenkin
1321 lajistoa: trooppista makean veden kalalajia, seeprakalaa, ei esiinny luontaisesti lauhkealla vyöhykkeellä,
1322 ympäristömuutoksien kartoittamisen kannalta tärkeät korallit ovat levinneisyydeltään rajoittuneet
1323 trooppisiin meriin (esiintyvien kylmän veden korallien toksikologisia häiriöitä ei tunneta vielä juuri lainkaan)
1324 ja *Daphnia* vesikirput esiintyvät vain lauhkean vyöhykkeen vesissä. Samoin lauhkean ja arktisen vyöhykkeen
1325 lajirajat ovat jyrkät ja koska arktisten alueiden kontaminaatiota ei ole pidetty maailmanlaajuisena
1326 ongelmana, kylmien alueiden lajeja ei ole yleisesti käytettävien mallieliöiden joukossa.
1327 Kun tutkitaan ympäristömyrkkujen aiheuttamia elintoimintojen häiriöitä molekyyli-, solu- tai
1328 organismitasolla, sopivat yleiset malliorganismit tutkimuksissa käytettäväksi. Perinteisen nisäkkäisiin
1329 (ihmiseen) painottuvan näkökulman ohella kasvien, selkärangattomien ja vesiselkärankaisten käyttö
1330 laajentaa paljon yleistä ymmärrystä ympäristömyrkkujen todennäköisistä vaikutuskohteista. Luonnollisesti
1331 tehtävän tutkimuksen tulee ottaa huomioon sekä vaikuttavan aineen että tutkittavan eliön erityispiirteet:
1332 jos on todennäköistä, että vaikutus kohdistuu hermosolujen väliseen viestintään, tutkimusta on jokseenkin
1333 turha tehdä levillä. Tärkeimmät malliorganismit, joilla on merkittävää ekotoksikologista käyttöä, ovat muun
1334 muassa *Daphnia* vesikirput, seeprakala, medaka, eräät sinilevät, eräät *Chlorella* ja *Chlamydomonas*-sukujen
1335 levät, *Lemna*-suvun vesikasvit, *Arabidopsis* ja *Lumbricus* lierot. Ekotoksikologiassa yleisesti käytettävät
1336 malliorganismit ovat selvästi painottuneet vesieliöihin; erityisesti tutkimuksen käyttämissä maaeläimissä on
1337 vain vähän malliorganismeja. Malliorganismien käytön hyötyinä on muiden muassa se, että niistä on paljon
1338 aikaisempaa tietämystä mukaan lukien useimmiten se, että niiden genomi on kokonaan sekvensoitu, joten
1339 niiden geenit tunnetaan. Tähän liittyykin yksi suurimmista yllätyksistä, joita genomien tutkimuksessa on
1340 viime vuosina havaittu: kun *Daphnia pulex*in genomi sekvensoitiin, niin peräti 1/3 sen geneista oli aiemmin
1341 tuntemattomia. Lisäksi nämä geenit reagoivat paljon aiemmin tunnettuja geenejä useammin
1342 ympäristömuutoksiin. Edellä oleva esimerkki on yksi suurimmista malliorganismien käytön vahvuuksista:
1343 vastaavanlaista johtopäätöstä ei olisi millään saavutettu eliöllä, jota tutkii vain muutama ryhmä
1344 maapallolla.

1345

1346 4.2. Tärkeimmät koeasetelmat eliöiden vasteita tutkittaessa

1347 Jos selvitetään kemikaalien vaikutusmekanismeja puhtaita aineita ja ennalta tiedettyjä pitoisuuksia/määriä
1348 käyttäen, kokeet on ilman muuta paras tehdä laboratorio-oloissa, jolloin kaikki olosuhteiden muutokset
1349 ovat tutkimuksen tekijän hallittavissa. Tällöin oikeastaan suurin kemikaalin käyttöön liittyvä ratkaisu on se,
1350 miten se annostellaan eliöön. Useimmiten luonnonmukaisin tapa on joko määrittää, mikä kemikaalin
1351 pitoisuus ympäristössä on ja altistaa eliö tälle ympäristön pitoisuudelle tai antaa kemikaali ruuan mukana.
1352 Kumpaa käytetään, riippuu pääosin kemikaalin biosaatavuudesta. Joskus joudutaan käyttämään injektioita
1353 joko intraperitoneaalisesti tai suoraan suoneen. Tällöin aineen siirtyminen ympäristöstä eläimeen jää pois,
1354 minkä vuoksi kemikaali voi olla paljon myrkyllisempi kuin luonnonmukaisemmassa altistuksessa.

1355

1356 Jos halutaan selvittää, miten ympäristön pilaantuminen vaikuttaa eliöihin, mittaukset on tehtävä
1357 luonnonympäristössä. Vaikutusten mittauksien lisäksi pitäisi aina selvittää todennäköisesti tärkeimpien
1358 ympäristön saasteiden pitoisuudet, jotta havaitut vaikutukset voidaan yhdistää ympäristön pilaantumiseen.
1359 Riippumatta koeasetelmasta täytyy mittauksia tehdä myös puhtaassa ympäristössä (kontrollinäytteet).
1360 Lukuun ottamatta ympäristön pilaantumista kontrollialueen ominaisuuksien on oltava samankaltaisia kuin
1361 pilaantuneen ympäristön. Jos näin ei ole, on jokseenkin mahdotonta sanoa, johtuuko havaittu muutos
1362 saastumisesta vai muista eroista näytteenottopaikkojen välillä. Käytettävät eliöt voivat olla joko paikallisia
1363 tai puhtaasta ympäristöstä tuotuja (puhtaassa ympäristössä kasvatettuja). Molempiin vaihtoehtoihin liittyy
1364 sekä puutteita että etuja ja riippuukin työn tarkoituksesta, kummanlaisia eliöitä käytetään. Jos halutaan
1365 selvittää, millä tavoin eliö reagoi ympäristön saastekuormaan, kannattaa käyttää tuotuja eliöitä. Tuotujen
1366 eliöiden altistumisaika ympäristöön tunnetaan täsmällisesti ja täten voidaan saada selville sekä välittömät
1367 (akuutit) että pitempiaikaiset (krooniset) ympäristövasteet. Toisaalta on hyvin vaikeaa selvittää,
1368 sopeutuvatko eliöt geneettisesti uuteen ympäristöönsä. Tuoduilla eliöillä tämä on mahdollista vain, jos
1369 sukupolven kesto on lyhyt. Käytettäessä paikallisia eliöitä, ei altistuksen kestoa yleensä tiedetä. (Se
1370 tunnetaan vain, jos eliö on syntynyt alueella ja syntymisaika tiedetään). Mahdollista on, että eliöt ovat
1371 altistuneet ympäristösaasteille useiden sukupolvien ajan, joten niille on voinut kehittyä geneettisiä
1372 sopeutumia muuttuneeseen ympäristöön tai vain ne eliöt, joilla on muuttuneessa ympäristössä selviämisen
1373 mahdollistava ominaisuus, ovat säilyneet hengissä. Tämänkaltaisia muutoksia voidaan selvittää vain
1374 käyttäen paikallisia eläimiä, joita tulee verrata saman lajin puhtaasta ympäristöstä otettuihin eliöihin.
1375 Esimerkkinä tavasta, jolla saavutetaan sangen hyvä paikallisten eliöiden kokoelma, on biofilmien
1376 (mikroskooppisten prokaryoottien, sinilevien ja levien) kertyminen lasilevyille, joita pidetään tutkittavassa
1377 ympäristössä ennalta määritetty aika.

1378

1379 4.3. Mikro- ja mesokosmokset

1380 Kemikaalien yhteisövaikutuksia tutkitaan yleisesti mikro- ja mesokosmoksissa. Nämä ovat kooltaan
1381 vaihtelevia eliöyhteisöjä, joiden koostumus tunnetaan täysin. Näin ne muodostavat jatkumon puhtaista
1382 laboratoriokokeista, joista yleensä bioottiset vuorovaikutukset puuttuvat, kenttätutkimuksiin, joissa ei
1383 tunneta yhteisöjen alkuperäisiä rakenteita eikä altistuksen ominaisuuksia. Yksinkertaisimmillaan
1384 mikrokosmoksien yhteisöissä on vain pari trofiatasoa, esimerkiksi kasviplankton, kasviplanktonia syövää
1385 eläinplanktonia ja eläinplanktonia syövää eläinplanktonia. Mesokosmokset ovat mikrokosmoksia suurempia
1386 ja monipuolisempia. Yksi ongelma kaikissa keinotekoisissa eliöyhteisöissä on se, että niiden tasapainotila
1387 voi poiketa huomattavasti monipuolisempien luonnonyhteisöjen tasapainotilasta, minkä seurauksena myös
1388 häiriöt, joita ympäristömuutokset aiheuttavat, voivat olla luonnonyhteisöistä poikkeavia. Toinen ongelma
1389 on se, että mikro- ja mesokosmosten lajivalikoimasta väkisinikin jäävät pois pitkäikäiset ja suuret eliöt.

1390 Mikäli esimerkiksi pitkäikäisten ja suurten petojen merkitys ekosysteemin toiminnalle on suuri, kosmosten
1391 antama informaatio on vähäinen. Kolmas mikro- ja mesokosmoksiin liittyvä ongelma on niiden tilan ja
1392 tutkimusten keston rajallisuus. Tilaan liittyvään rajallisuuteen yhdistyy usein se, että erityisesti
1393 mikrokosmoksen muodostavan astian seinämiin kertyy eliöitä, jotka eivät varsinaisesti kuuluisi tutkittavaan
1394 eliöyhteisöön. Ajan rajallisuudessa vaikuttavana tekijänä on muun muassa se, että tutkittavat ilmiöt voivat
1395 riippua hyvinkin paljon tutkimusten vuodenajasta, ja se, että joissakin tapauksissa systeemi saavuttaa
1396 tasapainotilansa vasta käytettävissä olevan ajan päättymisen jälkeen.

1397

1398 Kahta pääasiallista tapaa käytetään mikro- ja mesokosmoksien eliöyhteisöjen aikaansaamiseksi.
1399 Ensimmäisessä vaihtoehdossa lisätään laboratoriokasvatettuja, standardoituja eliöitä tietty määrä kaikkiin
1400 mikro- ja mesokosmoksen toistoihin. Tämä takaa sen, että kaikkien kontrolli- ja käsiteltyjen yksiköiden
1401 yhteisöt ovat alussa samankaltaisia. Toisaalta yhteisön ekologinen relevanssi on pieni. Toisessa
1402 vaihtoehdossa otetaan luonnon ekosysteemistä lähtökohta ja annetaan yhteisön kehittyä ja saavuttaa
1403 tasapaino. Tämä vaihtoehto on ekologisesti relevantimpi kuin laboratoriokasvatettujen eliöiden käyttö,
1404 mutta siihen liittyy joitakin ongelmia. Ensinnäkin, tasapainon saavuttamiseen menee aikaa. Toiseksi,
1405 saavutettu tasapaino voi poiketa luonnonyhteisön tasapainosta ja olla lisäksi erilainen eri toistoissa.
1406 Kolmanneksi jo se, että alun perin otetaan materiaali luonnonyhteisöstä, aikaansaa vaihtelua toistojen
1407 välillä.

1408

1409 4.4. Ekosysteemimanipulaatiot

1410 Ekosysteemimanipulaatioita on tehty erityisesti makean veden ekosysteemeissä. Muun muassa
1411 happamoitumisen ja pH:n kalkitsemalla nostamisen vaikutuksia on tutkittu siten, että pienehköjä järviä on
1412 jaettu: toinen puoli on kalkittu ja toista puolta ei. Tämän jälkeen eliöitä on seurattu molemmilla puolilla ja
1413 erot tulkittu kalkitsemisesta johtuviksi. Vastaavanlaisia vesistön manipulaatioita on tehty myös muiden
1414 ympäristömuutoksien osalta. Toisistaan rippumattomien toistojen tekeminen on vesibiologiassa yleisesti
1415 vaikeaa, koska eri vesistöt poikkeavat veden ominaisuuksien osalta toisistaan ja ominaisuuksien erot
1416 vaikuttavat aineiden myrkyllisyyteen, mutta lähes aina joudutaan tutkimuksissa käyttämään yhtä
1417 vesilähdettä. Vesien ominaisuuksien erot ovat esimerkiksi syynä siihen, että BLM (biotic ligand model) on
1418 kehitetty. Kun vesibiologian tutkimuksissa käytetään yleensä yhtä vettä, vapaassa vedessä elävien eliöiden
1419 osalta samat. Näin ollen tärkeimmän eliöihin vaikuttavan muuttujan osalta $n=1$. Kuitenkin yleisenä
1420 kritiikkinä vesibiologian tutkimuksissa on esimerkiksi se, että allasvaikutusta ei ole otettu huomioon –
1421 vaikutusta, joka vapaan veden eliöillä voi pahimmillankin vaikuttaa saataviin tuloksiin vain vähän eri vesien
1422 ominaisuuksien eroihin verrattuna. Vesibiologisessa tutkimuksessa joudutaankin yleensä hyväksymään se,
1423 että tulokset pitävät varmasti paikkaansa vain tutkitussa vesistössä.

1424

1425 Myös maaympäristössä tehdään ekosysteemikokeita. Useimmiten nämä tehdään siten, että tietty alue
1426 rajataan. Jotta pystytään ottamaan alueen heterogeenisyys huomioon, täytyy rajattuja alueita olla useita ja
1427 niistä valita käsittelyyn ja kontrolleiksi alueet sattumanvaraisesti. Tärkeänä erona toisaalta mikro- ja
1428 mesokosmoskokeiden sekä toisaalta ekosysteemimanipulaatioiden välillä on se, että
1429 ekosysteemimanipulaatioissa eliöiden immigraatio on mahdollista. Lisäksi paljon suurempien eliöiden
1430 mukanaolo on mahdollista ekosysteemimanipulaatioissa kuin mikro- ja mesokosmoksissa. Keinot, joilla
1431 käytettävät alueet rajataan, vaikuttaa sekä immigraatioon että mukana olevien eliöiden kokoon.
1432 Erityistapauksena ekosysteemimanipulaatioista voi ottaa saarien manipulaation; niissä manipuloidun
1433 alueen rajat muodostuvat luontaisesti saaren rajoista ja sekä immigraatio että emigraatio ovat suhteellisen
1434 rajoittunutta.

1435

1436 4.5. Pääasialliset ekotoksikologian tutkimusalat

1437 Ehkä suurin ekotoksikologisten selvityksien ongelma on se, että mitä ekologisesti relevantimpi selvitettävä
1438 asia on, sitä pitkäkestoisempaa työ on ja sitä vaikeampaa on yksiselitteisesti osoittaa ympäristövaikutuksen
1439 syy. Kun lisäksi vielä eri alojen asiantuntijat usein käyttävät oman alansa termistöä ja tutkimustapoja, on
1440 todellinen perinteiset tutkimusalojen rajat ylittävä työ sangen harvinaista: vaikka saman työn tulisi parhaan
1441 tuloksen saavuttamiseksi käsittää niin molekyylibiologian, biokemian, fysiologian, ekologian,
1442 ympäristökemian kuin ympäristöfysiikan asiantuntemusta, vain harvoissa tapauksissa tähän
1443 ideaalitalanteeseen päästään. Hyvinkin tyypillistä on, että tutkimusalat elävät omaa elämäänsä ilman
1444 kaikkien kannalta hyödyllistä vuorovaikutusta.

1445

1446 Tyypillisesti ekotoksikologinen tutkimus jakautuu terrestriseen ja vesistötoksikologiaan. Terrestrisessä
1447 toksikologiassa erityisenä alana voidaan pitää maaperätoksikologiaa ja vesistötoksikologiassa
1448 sedimenttitoksikologiaa. Maaperä- ja sedimenttitoksikologialle on yhteistä se, että kemikaalien kertyminen
1449 riippuu suurelta osin maalajin/sedimentin orgaanisen aineksen ominaisuuksista. Onkin mahdollista
1450 laskennallisesti esittää kemikaalin todennäköinen jakaantuminen maaperän ja muun ympäristön välillä.
1451 Kaikki toksikologia pilkkoutuu myös molekyyli-, solu- ja organismitason mekanistiseksi tutkimukseksi ja
1452 ekologisiksi ympäristötutkimukseksi, joka selvittää toksikologisesta näkökulmasta populaatioiden ja
1453 yhteisöjen toimintaa. Kun vielä mikrobiologinen, kasvi- ja eläintutkimus säilyvät ekotoksikologiassakin
1454 suhteellisen erillisinä, voi hyvin ymmärtää, että lähtökohdistaan riippuen ekotoksikologit muodostavat
1455 tutkimusalojensa mukaisia ryhmiä. Suurimmaksi osaksi mikrobiologien mutta lisäksi myös tekniikan alan
1456 asiantuntijoiden tutkimusalana on bioremediaatio, jonka tarkoituksena on entistää ja puhdistaa esimerkiksi
1457 kaatopaikkojen tai muuten saastunut maaperä.

1458 5. Kemikaalien biosaatavuuteen vaikuttavat tekijät

1459 Aineiden pääseminen eliöihin riippuu niiden biosaatavuudesta. Tämän takia biosaatavuuteen vaikuttavat
1460 tekijät määräävät paljolti aineiden myrkyllisyyttä. Biosaatavuuteen vaikuttavat tekijät riippuvat
1461 suurimmaksi osaksi siitä, mikä on kemikaalin pääasiallinen saantitapa. Kemikaalin rasvaliukoisuus määrää
1462 pääasiallisen saantimuodon. Mitä rasvaliukoisempi aine on, sen todennäköisemmin sitä saadaan ravinnon
1463 mukana. Yhdisteiden oktanoli-vesi jakautumiskerrointa onkin käytetty karkeana aineen saatavuustavan
1464 indikaattorina. Mitä suurempi oktanoli-vesi jakautumiskerroin on, sitä todennäköisemmin aine saadaan
1465 ravinnossa koska kaikkien organismien koostumuksessa rasvoilla mm. kalvojen pääosina on suuri merkitys.
1466 Rasvaliukoiset aineet kertyvätkin organismeihin ja muualla ympäristössä, esim. vedessä, niitä on vähän.
1467 Oktanoli-vesi jakautumiskerroin annetaan yleensä logaritmisena pK_{ow} :nä. Pelkistetysti kaikilla orgaanisilla
1468 yhdisteillä on suhteellisen korkea rasvaliukoisuus ja ne saadaan ravinnossa. Toisaalta metallit ja niiden ionit
1469 saadaan suurimmaksi osaksi veden mukana – vesieläinten tapauksessa ympäröivästä vedestä, ilmaa
1470 hengittävien eläinten kyseessä ollen pääosin ravinnon vedestä, hengitysilman pienhiukkasista ja juodusta
1471 vedestä sekä kasvien tapauksessa pääosin maaperän sisältämästä vedestä. Ionit pääsevät eliöihin
1472 merkittävässä määrin vain, jos niille on spesifinen kantajaproteiini tai jos ne muodostavat komplekseja
1473 rasvaliukoisten aineiden, esimerkiksi humusaineiden kanssa. Kompleksinmuodostus onkin tärkeä
1474 kemikaalien biosaatavuuteen vaikuttava tekijä. Muodostuva kompleksi voi sekä lisätä (jos aine itsessään
1475 pääsee huonosti organismiin, mutta kompleksi kulkeutuu joko kalvojen läpi tai voi olla ravinnon osa) että
1476 vähentää (jos aine kulkeutuu hyvin, mutta kompleksin suurempi koko tai sopimattomuus kantajaan
1477 heikentää kulkeutumista) biosaatavuutta. Aineiden saatavuuteen liittyen bioottinen ligandimalli (Biotic

1478 Ligand Model; BLM) on yleisesti käytetty erityisesti metallien kertymistä kuvaava laskentamalli, joka ottaa
1479 huomioon vesien orgaanisen aineen määrän. BLM sopii käytettäväksi erityisesti makean veden
1480 metallimyrkyllisyyden arvioinnissa, jolloin metallit saadaan pääasiassa kidusten kautta. Koska
1481 meriympäristössä merkittävä suolojen saantireitti on ruuansulatuskanava ja kulkeutumisen affiniteetti voi
1482 olla kiduksista selvästi poikkeava, ei BLM vielä tällä hetkellä sovi erityisen hyvin käytettäväksi
1483 meriympäristössä.

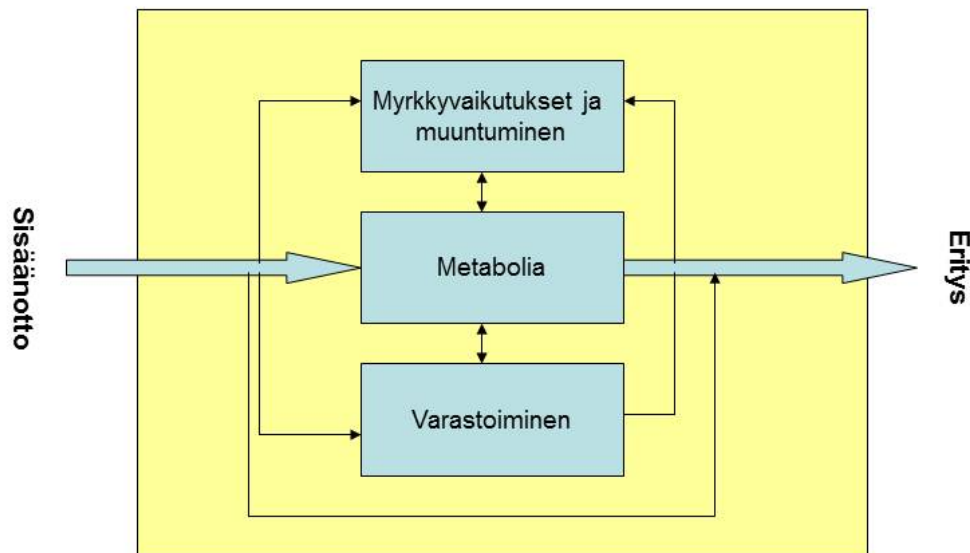
1484 Kemikaalien ympäristövaikutuksia tutkittaessa yksi merkittävä ongelma on niiden haihtuminen,
1485 sitoutuminen, muuntuminen tai kulkeutuminen pois tutkittavasta ympäristöstä. Tästä johtuen
1486 ekotoksikologisen tutkimuksen yleisenä toiveena on, että havainnot perustuisivat mitattuihin
1487 kemikaalipitoisuuksiin eivätkä nominaalisiin pitoisuuksiin. Joissakin tapauksissa jopa yli 90 % toksisuuden
1488 mittauksessa käytetystä kemikaalista ei ole eliöiden saatavilla olevassa muodossa. Esimerkiksi useat
1489 vesiympäristössä vaikuttavat myrkyt adsorboituvat akvaarioiden lasiin tai muoveihin. Tällaisen adsorption
1490 seurauksena kemikaalin myrkyllisyys näyttää todellista paljon pienemmältä, jos myrkyllisyys arvioidaan
1491 nominaalisen eikä mitatun pitoisuuden perusteella. Adsorptiota pyritään usein estämään käyttämällä
1492 materiaaleja, joihin kemikaalit eivät tartu. Tutkijat ovat myös kehittäneet menetelmiä, joiden avulla
1493 kemikaalipitoisuus saadaan pidetyksi vakiona altistuskammiossa. Yhtenä tällaisena keinona on, että
1494 kemikaali on sitoutunut hartsiin, josta vapautuu, kun ympäristön pitoisuus laskee hartsin ja kemikaalin
1495 välistä tasapainovakiota alemmaksi.

1496 6. Kemikaalien kulkeutuminen eliöihin

1497 Se, miten paljon kemikaalia on eliössä, riippuu sen kulkeutumisesta, pysyvyydestä ja varastoitumisesta
1498 kudoksiin sekä erityksestä. Tämän kokonaisuuden selvittämistä sanotaan toksikokinetiikaksi (Kuva 7).
1499 Kemikaalien kulkeutumiseen vaikuttaa ennen kaikkea niiden olomuoto. Pääasialliset reitit kemikaalien
1500 kulkeutumiselle eläimiin ovat joko ravinnon tai hengitysväliaineen mukana. Yllä on jo sanottu, että ravinnon
1501 mukana eläimiin kulkeutuvat erityisesti rasvaliukoiset aineet, erilaiset orgaaniset molekyylit. Sen lisäksi,
1502 että rasvaliukoiset kemikaalit kulkeutuvat ravinnon mukana, niille on tyypillistä että aineiden pitoisuus
1503 kasvaa ravintoketjussa (biokonsentraatio; biomagnifikaatio) ollen alhaisimmillaan esimerkiksi
1504 vesiekosysteemien ravintoketjun alkupään kasviplanktonissa ja korkeimmillaan lihaa syövissä pedoissa
1505 kuten hylkeet ja merikotka. Esimerkki biomagnifikaatiosta on DDT:n kertyminen (Kuva 3); sen määrä
1506 painoyksikköä kohden on merikotkassa jopa 100000-kertainen verrattuna kasviplanktoniin. Ilman saasteet
1507 kulkeutuvat joko pienhiukkasina tai pisaroina. Mitä pienempiä hiukkaset ovat sitä todennäköisemmin ne
1508 pääsevät eliöön. Merkittäviä pienhiukkasten lähteitä ovat niin dieselmoottorien päästöt kuin katupöly.
1509 Molemmissa on öljyn haitallisia renkaita sisältäviä tai pitkäketjuisia komponentteja (jälkimmäisessä
1510 tapauksessa asfaltista irronneina), jotka pienhiukkasista voivat siirtyä elimistöön. Viime aikoina onkin
1511 lisääntyvässä määrin ruvettu edellyttämään dieselautoissa hiukkassuodattimia. Ehkä kaikkein parhaiten
1512 tunnettu ja pelätty pienhiukkasten lähde on asbesti. Asbestipöly aiheuttaa keuhkorakkuloiden tulehdusta ja
1513 pitkälinen altistus aiheuttaa kroonista keuhkojen toimintavajasta (asbestoosi) ja keuhkosyöpää. Tämä
1514 esimerkki osoittaa, että joskus aineen ei tarvitse päästä varsinaisesti eliön sisään aiheuttaakseen haittoja.

1515
1516
1517
1518
1519
1520

1521 Kuva 7. Toksikokinetiikan periaatteet. Toksikokinetiikka selvittää aineiden sisäänottoa, metaboliaa,
1522 varastoitumista ja eritystä.
1523



1524
1525 Yhdisteet pääsevät eläimiin hengityselimien pintojen kautta, koska hengityskaasujen kuljetuksen
1526 mahdollistamiseksi veren ja hengitysväliaineen välinen etäisyys on keuhkoissa ja kiduksissa lyhyt,
1527 esimerkiksi ihmisen keuhkorakkuloissa ilman ja veren välillä on vain alle μm ja parhaiten tutkitun kalan,
1528 kirjolohen, kiduksien kiduslehdyköissä epiteelin paksuus on vain 1-2 μm . Kun lisäksi hengitysepiteelin
1529 pinnan laajuus on useimmiten huomattavasti yli 50 % koko eläimen pinta-alasta (joka esimerkiksi ihmisellä
1530 on noin 500 m^2 erityisesti hengityselimistön ja suoliston poimuttumisen vuoksi), aineiden kulkeutuminen
1531 hengityspintojen kautta eläimeen on todennäköistä. Hengityselimien lisäksi kemikaalit kulkeutuvat eläimiin
1532 erityisesti ruuansulatuselimistön kautta. Suolessahan tapahtuu yleisesti aineiden absorptio ja kuten
1533 hengityselimissäkin, suolessa on tiheä hiussuoniverkosto, johon päästyään kemikaalit leviävät tehokkaasti
1534 eläimien kudoksiin. Eliöiden muu pinta läpäisee aineita useimmiten huonosti. Ihon tarkoituksena eläimillä
1535 onkin vähentää vieraiden aineiden kulkeutumista elimistöön, joten imeytymistä tapahtuu oikeastaan vain
1536 silloin, kun ihossa on haavautumia. Monisoluisiin kasveihin kemikaalit pääsevät ilmasta pääosin vihreiden
1537 lehtien (tai neulasten) ilmarakojen kautta tai juurien imeytymispintojen kautta. Ympäristömyrkköjen
1538 kulkeutuminen yksisoluisiin eliöihin riippuu niiden yleisestä läpäisevyydestä.

1539 7. Kemikaalit eliöissä – aineiden kudostakautuminen ja siihen vaikuttavat 1540 tekijät

1541 Eliöiden kudokset jaetaan usein kemikaalien varastointiin käytettäviin kudoksiin ja kudoksiin, joissa
1542 yhdisteen aineenvaihdunta tapahtuu (Kuva 8). Rasvaliukoiset yhdisteet kertyvät erityisesti rasvakudokseen.
1543 Sieltä ne voivat lähteä liikkeelle, jos energian saanti ei ole riittävä ja kertynyttä rasvaa joudutaan
1544 käyttämään energiantuotannossa. Verenkiertoon vapautuneet rasvaliukoiset aineet kuten DDT,
1545 polyklooratut bifenyylit, dioksiini ym. voivat aiheuttaa viivästynyttä myrkyllisyyttä – silloin kun eliö niitä sai,
1546 ne eivät aiheuttaneet myrkytystä, koska varastoituivat rasvakudokseen. Myrkytys seuraa vasta kun aineet
1547 vapautuvat kudoksesta eläimen laihutuessa. Muuten aineet kertyvät kudoksiin, jos ne käyttäytyvät kudoksen
1548 tärkeiden komponenttien tavoin. Täten esimerkiksi luuhun kertyy metalleja, jotka muistuttavat kalsiumia.
1549 Tällaisia ovat esimerkiksi lyijy ja strontium. Jälkimmäisen radioaktiivinen isotooppi, strontium-90, on ollut
1550 huomattavan pelon aiheuttaja, kun sitä vapautui mm. ydinkokeissa ja se voi aiheuttaa luusyöpää. Aine voi
1551 kertyä kudoksiin myös, jos se muodostaa komplekseja kudoksissa esiintyvien yhdisteiden kanssa.
1552 Esimerkiksi useiden metallien määriin vaikuttaa niiden kompleksinmuodostus metallotioniinien kanssa.
1553 Jotkin metallit myös varastoituvat solun sisäisiin varastorakkuloihin. Useat yhdisteet sitoutuvat
1554 albumiineihin: esimerkiksi sekä tärkeiden puunjalostusteollisuuden jätevesikomponenttien, hartsihappojen,
1555 että orgaanisten tinayhdisteiden myrkyllisyys on paljon pienempi albumiinia sisältävässä liuoksessa kuin
1556 puhtaassa suolaliuoksessa. Vähentynyt myrkyllisyys johtuu yhdisteen sitoutumisesta albumiiniin ja muihin
1557 solujen ja verenkierron valkuaisaineisiin.

1558
1559 Kuva 8. Tärkeimmät kudokset, joihin aineet varastoituvat. Tietyillä kemikaaleilla voi olla rikastumiseen
1560 erityisiä kudoksia (esim. kilpirauhanen jodille).

1561



1562
1563

1564 Yllä oleva teksti kuvaa tilannetta eläimillä. Kasvien solut poikkeavat eläinten solusta siinä mielessä, että
 1565 niillä on suuret solun sisäiset vakuolit, jotka saattavat olla jopa 90% solun tilavuudesta. Vakuolit ovat solun
 1566 sisäisiä nestesäiliöitä, jotka kalvo eristää solulimasta. Näin vakuoliin siirretyt aineet ovat eristyksissä solun
 1567 metabolisista reaktioista, eivätkä haittaa solun elintoimintoja. Kasvit voivat näin varastoida haitallisia
 1568 aineita vakuoleissa. Tämän johdosta kasvin eri osissa saattaa olla hyvinkin korkeita myrkyllisten aineiden
 1569 pitoisuuksia ilman, että sillä on vaikutusta kasvien normaaliin toimintaan. Kasvit käyttävät vakuoleja myös
 1570 puolustautuessaan kasvisyöjiä vastaan. Kasvit tuottavat myrkkyjä ja siirtävät ne vakuoleihin, joista
 1571 herbivori (kasvisyöjä) saa myrkyllisen yhdisteen jauhaessaan kasvisolut. Kasvien tuottamista myrkyistä
 1572 tunnetuin on varmaan tupakkakasvien nikotiini, jota kasvi tuottaa pitääkseen hyönteiset loitolla, mutta
 1573 josta on tullut paljon kansanterveydellistä haittaa aiheuttava ihmisen nautintoaine. Useita
 1574 nikotiinijohdannaisia (neonikotinoidit) käytetään hyönteismyrkkyinä ja kasveista on eristetty ja
 1575 molekyyleistä edelleen kehitetty myös useita muita hyönteismyrkkyjä.

1576 8. Biotransformaatio

1577 Biotransformaatiolla käsitetään yleensä orgaanisten yhdisteiden käsittelyä aroylihiilivetyreseptorin (AhR)
 1578 aktivoiman reitin kautta (Pääperiaatteet on esitetty kuvassa 12). Tärkeimmät yhdisteet, jotka menevät
 1579 biotransformaatioreittiin ovat bentseenirenkaita sisältävät planaariset yhdisteet. Näistä tunnetuimmat ovat
 1580 dioksiinit, jopa niin, että Ah-reseptoria on usein kutsuttu dioksiinireseptoriksi. Kuitenkin reseptori esiintyy
 1581 kaikilla eläimillä ja kun dioksiinit ovat vain alle sata vuotta vanhoja yhdisteitä, reseptorilla täytyy olla
 1582 endogeenisiä aktivaattoreita, jotka tunnetaan edelleen suhteellisen huonosti. Tämänhetkisen tietämyksen

1583 mukaan AhR-reitin endogeenisia aktivaattoreita ovat ainakin indolihdisteitä sisältävät ravintoaineet sekä
1584 hemoglobiinin hajoamistuotteet bilirubiini ja biliverdiini. Toksikologisesta roolistaan riippumatta
1585 aryylihiilivetyreseptorilla näyttää olevan suuri merkitys hermoston kehityksessä. Kun AhR:n esiintymistä eri
1586 eläinten kehityksen aikana on tarkasteltu, on kaikissa tutkituissa lajeissa *Caenorhabditis* nematodista
1587 nisäkkäisiin havaittu hermokudoksessa korkeita AhR määriä.

1588

1589 Toksikologiaan liittyvässä biotransformaatioissa orgaaniset aineet muutetaan helpommin eritettävään
1590 polaariseen muotoon. Biotransformaatio muodostuu kahdesta osasta, faaseista 1 ja 2.

1591

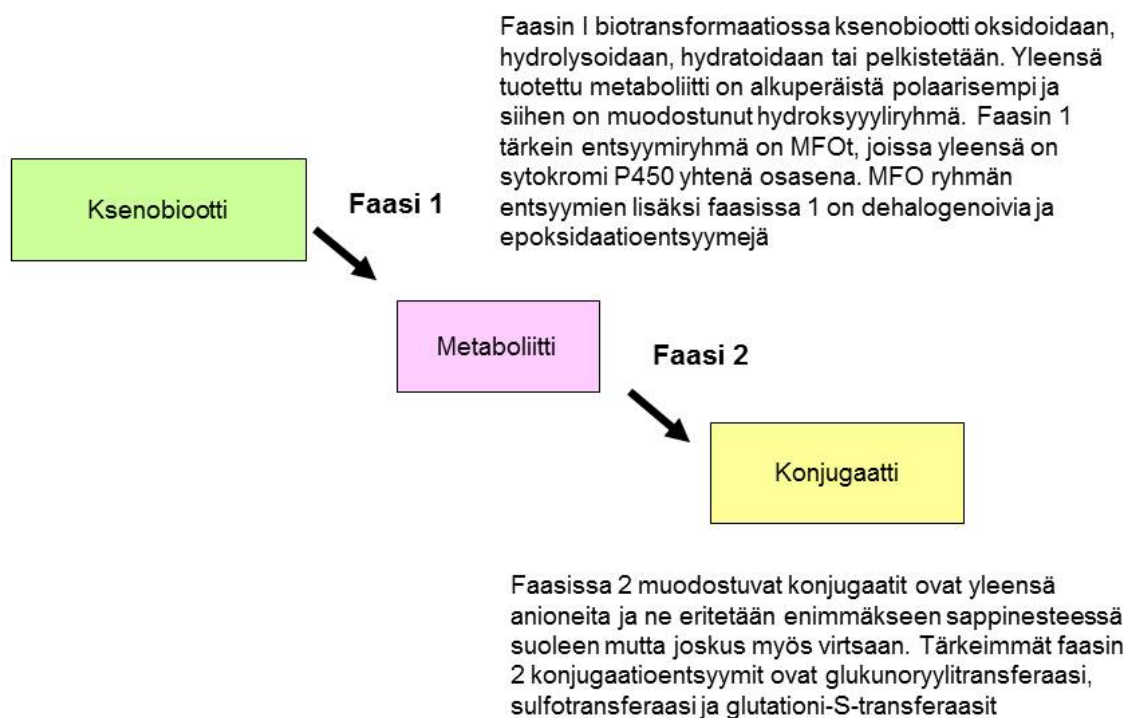
1592 8.1. Faasi 1

1593 Biotransformaation faasi 1 on esitetty kuvassa 9. Tärkeimmät faasi 1:n reaktiot ovat sytokromi P450 (CYP)
1594 mono-oksigenaasientsyymien katalysoimia. CYP entsyymejä on useita perheitä (tärkeimpinä CYP1-3),
1595 entsyymejä on enimmillään pitkälti toistasataa. Erityisesti CYP1 ja CYP2 ryhmän entsyymit reagoivat
1596 xenobiootteihin. CYP3 ryhmän entsyymit toimivat pääasiassa steroidihormonien metaboliassa.
1597 Aryylihiilivetyreseptorin (AhR) aktivaatio kiihdyttää yleensä CYP-geenien transkriptiota ja entsyymien
1598 tuotantoa. Usein AhR-reitin ja sitä seuraavaa CYP-entsyymien aktivaatiota tutkitaan joko CYP-geenien
1599 mRNA:n ja CYP proteiinien tasoja tai EROD-entsyymien (etoksiresorufiini-O-deetylaasi) aktiivisuutta
1600 mittaamalla. Kokonaiskuvan saamiseksi olisi parasta, että sekä mRNA että proteiinitasot ja
1601 entsyymiaktiivisuus selvitetäisiin. Tällöin pystytään sanomaan, onko AhR reitti aktivoitunut, aiheuttaako
1602 kemikaali translaation muutoksia tai aiheuttaako se entsyymiaktiivisuuden muutoksia muuta kautta.
1603 Oksidoivien CYP entsyymien lisäksi faasissa 1 voi olla sytokromi b₅ reduktasi entsyymi, flaviini mono-
1604 oksygenaasi ja epoksidi hydroksylaaseja. Faasin 1 tärkeimpänä päämääränä on muuntaa kemikaaleja siten,
1605 että niistä tulee sopivia substraatteja faasin 2 reaktioihin. Joskus faasissa 1 muodostuvat välituotteet ovat
1606 haitallisempia kuin alkuperäinen kemikaali. Esimerkiksi usein muodostuu reaktiivisia happimuotoja
1607 moninaisine haittavaikutuksineen. Faasin 1 biotransformaatioon vaikuttavat muun muassa eläinten kokema
1608 lämpötila sekä niiden kehitysvaihe, paino ja sukupuoli. Lisäksi on tyypillistä, että luontaisesti esiintyvien,
1609 esimerkiksi steroidihormonien aineenvaihdunta vaikuttaa faasin 1 CYP entsyymien aktiivisuuksiin.

1610

1611 Kuva 9. Biotransformaatio. Yleensä biotransformaatiokäsitettä käytetään orgaanisten, Ah-reseptorin
1612 aktivoivien kemikaalien transformaatiosta eritettävään, vesiliukoisempaan muotoon.

1613



1614

1615 8.2. Faasi 2

1616 Biotransformaation faasi 2 on esitetty myös kuvassa 9. Faasin 2 tärkeimmät reaktiot ovat
 1617 konjugaatioreaktioita, joissa faasissa 1 muodostuneeseen välituotteeseen liitetään yksi kolmesta
 1618 pääasiallisesta ryhmästä. Näiden konjugaatioreaktioiden tuloksena saadaan orgaaninen yhdiste polaariseen
 1619 tai ionimuotoon, mikä edesauttaa erityistä virtsassa ja ulosteissa. Glukuronidaatiossa endoplasmakalvoston
 1620 UDP-glukuronosyyliitransferaasi (UDP-GT) katalysoi glukuronihapon liittämisen elektrofiilisiin faasin 1
 1621 välituotteisiin tai alkuperäisiin orgaanisiin yhdisteisiin. Glutathioni-S-transferaasit (GST) liittävät yhdisteisiin
 1622 glutathionin, solujen yleisimmän hapetus-pelkistystasoa puskuroivan yhdisteen. GST-entsyymit ovat pääosin
 1623 sytosolissa. Kolmas tärkeä faasin 2 entsyymiryhmä on sulfotransferaasit, jotka ovat pääasiassa sytosolissa
 1624 tai Golgin laitteessa. Ne lisäävät kemikaaliin sulfonihapon.

1625 9. Kemikaalien erityis selkärankaisista

1626

1627 9.1. Kemikaalin modifiointi eritettävään muotoon

1628 Pelkistetyksi voi sanoa, että biotransformaation ensisijainen päämäärä on muuntaa orgaaninen kemikaali
 1629 eritettävissä olevaan muotoon. Biotransformaatiassa muunnettavien yhdisteiden lisäksi kaikki muutkin
 1630 eritettävät aineet joko muunnetaan eritettävään muotoon tai eritetään sellaisenaan kuten metalli-ionit.
 1631 Kaiken kaikkiaan maaeläimillä erityis tapahtuu joko virtsassa tai sappinesteessä. Virtsan mukana eritetään
 1632 pienimolekyylliset kemikaalit ja sappinesteessä suurimolekyylliset. Jonkin verran pienimolekyyllisiä
 1633 kemikaaleja eritetään myös keuhkojen kautta. Vesieliäimillä kidukset ovat lisäksi merkittävä erityisreitti.
 1634 Erityisesti metalli-ionit ja ammoniakki eritetään kidusten kautta. Metallionien erityykseen ei yleensä liity

eritystä helpottavia modifikaatioita. Sen sijaan eritettävä ammoniakki tulee usein kiduksen tai munuaisten soluihin aminohappojen aminoryhmänä ja eritetään deaminaation jälkeen.

1637

1638 9.2. erityys virtsassa

1639 Mitä pienimolekyyliisempi eritettävä aine on sitä todennäköisempää on sen erityys virtsassa. Jos kemikaalin
1640 molekyylipaino on alle 300, se eritetään maaeläimistä jokseenkin pelkästään virtsassa. Vesieläimissä useat
1641 pienimolekyylliset aineet kuten metalli-ionit ja ammoniakki eritetään kiduksien kautta. Suurin osa aineista
1642 kulkeutuu virtsaan siirtymällä verestä munuaiskeräsen kautta passiivisesti munuaisputken onteloon. Jos
1643 niitä ei aktiivisesti siirretä primäärivirtsasta pois, niitä esiintyy lopullisessa virtsassa veden erityksen tai
1644 talteenoton määräämänä pitoisuutena. Koska kulkeutuminen perustuu pääosin passiiviseen
1645 kulkeutumiseen munuaiskeräsessä, jossa määräävänä tekijänä on ennen kaikkea kulkeutuvan molekyylin
1646 koko, on syy pienimolekyyllisten kemikaalien pääasialliseen eritykseen virtsassa selvä.

1647

1648 9.3. erityys sappinesteessä ja muuten ruuansulatuskanavan kautta

1649 Sappinesteen eritettävät kemikaalit tulevat osaksi ulosteita. Sappineste erittyy ohutsuolen alkuosaan
1650 suunnilleen samaan kohtaan kuin haimaneste. Sappinesteen komponenteista tärkeimmät ruuansulatuksen
1651 kannalta ovat sappihapot, jotka toimivat detergentteinä hajottaen rasvapallukoita pieniksi miselleiksi.
1652 Nämä kulkeutuvat ruuansulatuskanavien seinämiin ja sitä kautta rasvaliukoiset aineet voivat imeytyä
1653 elimistöön koko ruuansulatuskanavan matkalla. Näin kävisi myös biotransformaation lopputuotteille, jos
1654 niitä ei biotransformaatioissa olisi muutettu varautuneiksi tai vähintään polaariseksi yhdisteiksi, joiden
1655 kulkeutuminen kalvojen läpi on epätodennäköistä. Esimerkkinä siitä, miten hitaasti varautuneet molekyylit
1656 kulkeutuvat kalvojen läpi, on kloridin kulkeutuminen nahkiaisen punasolukalvon läpi – kalvolla kun ei ole
1657 anionien kulkeutumista nopeuttavaa kantajaa. Tällöin jopa pienimolekyyllisen kloridin kulkeutuminen
1658 kalvon läpi kestää pari tuntia. Täten biotransformaatioissa on tärkeää muuttaa lipofiiliset aineet polaariseksi
1659 tai varautuneiksi siitäkin syystä, jottei niitä saman tien absorboitaisi takaisin elimistöön.

1660

1661 9.4. Haitallisten kemikaalien poisto muita reittejä käyttäen

1662 Eläinten on mahdollista varastoida kemikaaleja karva- tai höyhenpeitteeseensä. Tällöin kemikaaleista
1663 päästään eroon sulkasadon tai turkinvaihdon yhteydessä. Munivien eläinten saamista kemikaaleista osa
1664 siirtyy muodostuviin muniin ja näin ollen emojen kemikaalikuorma pienenee jonkin verran munimisen
1665 yhteydessä.

1666 10. Kemikaalien erityys muista organismeista

1667 Useimmilla selkärangattomilla eläimillä on munuaisia ja maksaa muistuttavia elimiä, joissa erityys tapahtuu
1668 samoin kuin selkärangaisissa: pienimolekyylliset molekyylit virtsassa ja suurimolekyylliset
1669 ruuansulatuskanavan kautta. Vastaavasti kuorenvaihto ja muninta mahdollistavat kemikaalikuorman
1670 pienentämisen. Yksisoluisilla eläimillä on erityysorganellejä, joista erityys tapahtuu. Kasveilla merkittävä keino
1671 päästä eroon haitallisista aineista perustuu siihen, että ne voivat organisoidusti poistaa osiaan. Kun
1672 kemikaalin pitoisuus nousee riittävän korkeaksi, osa kasvista kuolee, minkä ansiosta se pääsee eroon
1673 pääosasta haitallisista aineista. Vilkkaasti liikennöityjen väylien varrella kasvaneet puut ovat hyviä
1674 esimerkkejä siitä, kuinka kasvi voi selviytyä pitkään hyvinkin myrkyllisessä ympäristössä. Kuitenkin puiden
1675 ilmasun selkeä poikkeaminen puhtaassa ympäristössä kasvaneiden vastaavasta osoittaa, että myrkyllisten
1676 aineiden vaikutuksen välttäminen tällä mekanismilla haittaa kasvin kehitystä ja pitkäaikaista selviytymistä.
1677 Toinen vain maakasveille mahdollinen erityiskeino on, että sateet huuhtovat lehvästöstä myrkyllisiä aineita.

11. Kontaminaation vaikutukset eliöihin. Bioindikaattorit ja biomarkkerit

11.1. Geneettiset vaikutukset, ekotoksikogenomiikka ja proteomiikka

Useilla ympäristöön joutuville aineilla on geneettisiä vaikutuksia. Tällöin ne vaikuttavat eliöiden DNA:n rakenteeseen siten, että muutoksilla on vaikutus joko tulevien sukupolvien yksilömäärään tai ominaisuuksiin. Tavallisesti mikä tahansa DNA vaikutus otetaan mukaan genotoksikologiaan, vaikka täsmällisesti tarkasteltuna yllä oleva määritelmä ei toteutuisikaan. Ympäristömyrkyt voivat aiheuttaa DNA-ketjujen katkeamista. DNA-ketjujen katkeaminen voi tapahtua joko vain yhdessä DNA-molekyylin ketjussa tai molemmissa DNA-ketjuissa. Esimerkiksi happiradikaalit aiheuttavat usein ketjujen katkeamista. Tätä tutkitaan tavallisesti nk. Comet assaylla (yksittäisten solujen elektroforeesi), jossa komeetan pyrstön muodostuminen ja piteneminen osoittaa DNA:n lisääntyvää pilkkoutumista. Toisinaan ympäristömyrkyt aiheuttavat kromosomien paritumisen häiriytymistä, mikä nähdään mikronukleustestillä, jossa lasketaan normaalista tumasta irrallaan olevien mikronukleusten osuutta. Jotta mikronukleuksien osuuden muutokset voivat johtua häiriöistä solunjakautumisesta eikä esimerkiksi muutoksista solujen hajotuksessa, on ympäristömyrkyaltistuksen oltava riittävän pitkäkestoinen, jotta tutkittava solutyyppi on ehtinyt jakautua altistuksen aikana. Näin ollen esimerkiksi käytettäessä punasolujen mikronukleustestiä ympäristömyrkyaltistuksen osoittajana, on altistuksen keston oltava vähintään viikon, koska tätä lyhyemmässä ajassa uusia punasoluja, jotka olisivat jakautuneet altistuksen aikana, ei ehdi tulla verenkiertoon. Eräät ympäristömyrkyt aiheuttavat DNA adduktien muodostumista. Nämä kemikaalit sitoutuvat erityisesti guaniini- ja sytosiinitähteisiin ja näkyvät kun DNA:n emästen näennäinen molekyylipaino mitataan. Ympäristön pilaantuminen voi lisätä myös esiintyvien mutaatioiden määrää. Geneettinen sopeutuminen voi johtua joko positiivisesti vaikuttavien mutaatioiden kertymisestä tai siitä, että vain ne eläimet onnistuvat lisääntymisessään hyvin, joilla on ympäristöön kelpoinen ominaisuus. Tällöin tätä ominaisuutta kantavien eläinten osuus nousee räjähdysmäisesti.

Menetelmien kehittymisen myötä myös ekotoksikologiassa on ruvettu käyttämään kvantitatiivista PCR:ää ja geenilastuja, joiden avulla voidaan selvittää ympäristön pilaantumisen vaikutuksia geeniluentaan. Lisäksi muun muassa uuden sukupolven sekvensointia on ruvettu käyttämään genomisten vaikutusten osoittamisessa. Genomiikan menetelmien käyttöä ekotoksikologiassa on ruvettu nimittämään ekotoksikogenomiikaksi. Yleensä mittausmenetelmillä selvitetään geenien transkription (geeniluennan) muutoksia eli kemikaalien vaikutuksia lähetti RNA:n (mRNA:n) tasoon. Tällöin vaikutukset ovat yhdenmukaisia toimintojen muutosten kanssa vain silloin kun toiminnallisten muutosten takana on pääosin transkription muutos. Muissa tapauksissa on mahdollista, että kemikaali vaikuttaa esim. vähentäen valkuaisaineen aktiivisuutta (molekyyliä kohden). Jotta tällaista muutosta ei tulisi valkuaisaineen kokonaisaktiivisuudessa, sitä koodaavan geenin transkriptio ja valkuaisaineen tuotanto lisääntyy. Ympäristömyrky voi myös vaikuttaa translaation (lähettiRNA:n muuntuminen valkuaisaineeksi) tehokkuuteen tai joko lähettiRNA:n tai muodostuneen proteiinin stabiilisuuteen. Tämän vuoksi on tärkeää muistaa genomiikan rajoitukset ja mahdollisuudet toksikologisia selvityksiä tehtäessä. Viime aikoina on myös proteomiikan menetelmiä (pääasiassa kaksisuuntainen geelielektroforeesi ja sitä seuraava massaspektrometria valkuaisaineiden tunnistamiseksi) enenevästi ruvettu käyttämään toksikologiassa. Proteomiikka mahdollistaa sen, että useiden valkuaisaineiden suhteelliset määrät ja niiden muutokset pystytään mittaamaan. Kuitenkaan määrän muutosten tietäminen ei mahdollista johtopäätöksiä toiminnan muutoksista, joihin kaikki toksikologiset vasteet perustuvat. Onhan esimerkiksi mahdollista, että valkuaisaineen määrän muutokset johtuvat siitä, että kemikaali vaikuttaa valkuaisainemolekyylin toiminnalliseen aktiivisuuteen, minkä seurauksena toiminnan säilyttämiseksi ennallaan proteiinin määrän

1723 on muututtava. Sekä genomiikan että proteomiikan yhteinen tämänhetkinen ongelma on, että menetelmät
1724 ovat suhteellisen kalliita, minkä vuoksi ne soveltuvat huonosti rutiinikäyttöön. Tilanne voi kuitenkin
1725 muuttua nopeastikin, koska menetelmien käyttö on halventunut nopeasti ja jyrkästi.

1726

1727 11.2. Vaikutukset lisääntymiseen

1728 Veneiden ja laivojen pohjamaalien sisältämät orgaaniset tinayhdisteet aiheuttivat todistettavasti ostereiden
1729 maskulinisaation satamien lähiviljelmissä. Useiden, varsinkin englantilaisten jokien kalat feminisoituvat.
1730 Itämeren lohen ja joidenkin Pohjois-Amerikan järvien lohikalojen ruskuaispussipoikasten kuolleisuus on
1731 koholla. Aikaisemmin, kun jätevedet, tärkeimpänä puunjalostusteollisuuden päästöt, laskettiin huonosti
1732 puhdistettuina vesistöihin, muun muassa Itämeren hylkeiden lisääntyminen häiriintyi merkittävästi –
1733 eläinten kohtu oli usein epämuodostunut estäen sikiön kehittymisen. Näiden vesistövaikutuksien ohella
1734 ihmisen ja muiden maaselkärankaisten siittiöiden laadun on havaittu viime vuosikymmeninä huonontuneen
1735 niin että niiden lisääntymismenestyksen arvioidaan heikentyneen. Vaikkakaan siittiöiden laadun
1736 huononemisen syytä ei vielä ole yksiselitteisesti onnistuttu selvittämään, yhtenä tärkeistä tekijöistä
1737 pidetään ympäristön kemikalisoitumista.

1738

1739 Koska lisääntymismuutoksia on havaittu sekä maa- että vesiympäristössä ja koska joissakin tapauksissa on
1740 pystytty osoittamaan selvä yhteys lisääntymisen ja ympäristön kemikaalikuorman välillä, ei ole ihme, että
1741 lisääntymistoksikologia on ehkä ekotoksikologian suurin tutkimusala. Erityisesti hormonihäiritsijöiden
1742 (Endocrine Disrupting Chemicals; EDC, ks. Taulukko 6) tutkimus on laajaa, vaikka sukupuolihormonien
1743 säätelyn lisäksi lisääntymismenestykseen vaikuttaa moni muukin tekijä. Esimerkiksi DDT:n linnuille
1744 aiheuttamat lisääntymisongelmat johtuivat munan kuoren ohentumisesta kalsiummetabolian häiriön
1745 vuoksi.

1746

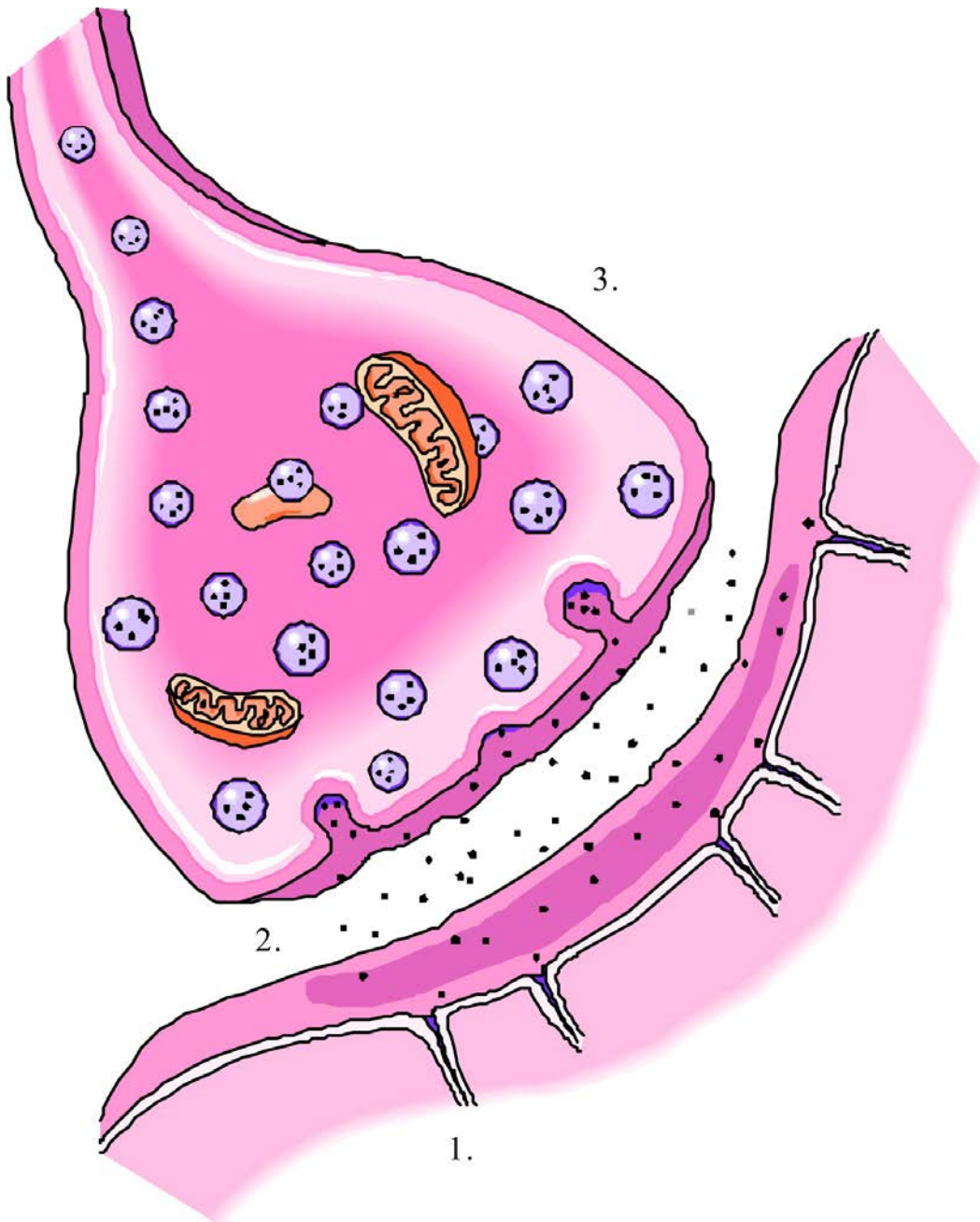
1747 Hormonihäirinnän syynä voivat olla: 1. Kemikaali toimii naarassukupuolihormonien (estrogeenit)
1748 agonistina vaikuttaen tällöin samansuuntaisesti kuin estrogeenit tai antagonistina vähentäen estrogeenien
1749 vaikutusta. Vaikutus voi välittyä estrogeenireseptorin kautta. 2. Kemikaali toimii koirassukupuolihormonien
1750 (androgeenit) agonistina tai antagonistina. Vaikutus välittyy usein androgeenireseptorin kautta. 3.
1751 Kemikaali vaikuttaa muuten sukupuolihormonien tuotantoon. Yhtenä tärkeistä mekanismeista ovat
1752 vaikutukset aromataasientsyymien aktiivisuuteen, entsyymi kun katalysoi androgeeni-estrogeenikonversiota.

1753

1754 11.3. Neurotoksisuus

1755 Usein neurotoksiset vaikutukset liittyvät suoraan kemikaalien käyttötarkoitukseen. Useimpien
1756 tuholaismyrkkujen vaikutukset perustuvat niiden aiheuttamiin muutoksiin hermoimpulssien välityksessä
1757 (kahden eri solun välillä eli synapsien toimintaan; ks. 2.4.2.). Tällöin niiden haitallisiksi vaikutuksiksi
1758 tulkitaan vaikutukset muihin kuin kohdeorganismeihin. Hermoimpulssien välitykseen tuholaismyrkyt
1759 vaikuttavat erityisesti kahdella tavalla, joiden periaatteet on esitelty kuvassa 10. Useat kemikaalit
1760 vaikuttavat postsynaptisten solujen ärtyvyyteen muuttamalla niiden ionikanavien ominaisuuksia.
1761 Pääasialliset vaikutuskohteet ovat postsynaptisten solujen natrium- ja kloridikanavat. Kun synapsin
1762 jälkeisten solujen natriumin sisäänvirtaus tai kloridin ulosvirtaus kiihtyy, ärtyy solu ja hermoimpulssi voi
1763 jatkaa siinä kulkuaan. Mikäli kemikaali häiritsee natriumin tai kloridin liikkeitä kanavissa, hermoimpulssin
1764 kulkeutuminen häiriintyy. Toinen merkittävä suoran neurotoksisuuden mekanismi on
1765 hermostonvälittäjäaineita hajottavien entsyymien, erityisesti asetyylikoliiniesteraasin, toiminnan
1766 täydellinen tai osittainen esto. Asetyylkoliini on erityisen tärkeä hermo-lihasliitoksien synapsien
1767 välittäjäaine. Mikäli sen hajotus estyy, on asetyylikoliinia käyttävien synapsien aktiivisuus jatkuvasti korkea.

1768 Kuva 10. Neurotoksisuuden mekanismit. Kemikaalit vaikuttavat yleensä hermoimpulssien välitykseen
 1769 synapseissa. 1. Usein vaikutus kohdistuu postsynaptisiin soluihin, joiden ärtvyvyys muuttuu kun kemikaali
 1770 vaikuttaa ärtvyvyyden aiheuttavien kanavien natrium- tai kloridiläpäisevyyksiin. 2. Monesti kemikaalit
 1771 vaikuttavat asetyylikoliiniesteraasiaktiivisuuteen. Asetyylikoliini on hermostonvälittäjäaine, jonka
 1772 sitoutuminen postsynaptisten solujen ionikanaviin aiheuttaa ioniläpäisevyyden muutoksen ja sitä
 1773 seuraavan impulssin siirtymisen. Asetyylikoliiniesteraasi hajottaa asetyylikoliinin ja täten estää
 1774 postsynaptisten solujen ylenmääräisen ärtvyvyyden. Kun kemikaali vähentää
 1775 asetylkoliiniesteraasiaktiivisuutta, hermostovälityksestä tulee yliaktiivista. 3. Joskus kemikaali vaikuttaa
 1776 hermoston välittäjäaineiden vapautukseen presynaptisten solujen vesikkeleistä.
 1777



1778 11.4. Vaikutukset energia-aineenvaihduntaan
 1779 Useimmat energiantuotantoa häiritsevät yhdisteet vaikuttavat hapesta riippuvaan eli aerobiseen
 1780 energiantuotantoon, erityisesti oksidatiiviseen fosforilaatioon. Aerobinen energiantuotanto perustuu
 1781

1782 siihen, että mitokondrioiden sisäpuolen ja sisä- ja ulkokalvon välisen tilan välille kehittyy protonigradientti.
1783 Sisä- ja ulkokalvon väliseen tilaan kertyneet protonit virtaavat pitoisuuseronsa mukaisesti protonipumpun
1784 kautta mitokondrion sisälle. Pitoisuuseron potentiaalienergia vapautuu tällöin ja käytetään hyväksi ATP:hen
1785 sidotun energian tuottamiseksi. Kemikaalien vaikutukset perustuvat joko siihen, että elektroninsiirtoketjun
1786 toimintaa häiritään niin, että elektroneja ei siirry ja protonigradienttia ei synny, tai siihen, että
1787 protonigradientti hävitetään. Ensimmäisen ryhmän myrkkijä ovat muun muassa syanidi ja rotenoni ja
1788 toisen ryhmän myrkkijä kaikki rasvaliukoiset heikot hapot, jotka kuljettavat protoneita mitokondrioiden
1789 kalvojen läpi. Tämän tyyppisiä yhdisteitä ovat esimerkiksi fenolit ja orgaaniset tinayhdisteet (tributyyli- ja
1790 trifenyylitina).

1791

1792 11.5. Vaikutukset kalvoihin

1793 Kalvovaikutukset voivat olla kahta tyyppiä: kemikaalit vaikuttavat joko kalvon valkuaisaineisiin muuttaen
1794 niiden ominaisuuksia ja tätä kautta esimerkiksi kalvoläpäisevyyttä tai kalvolipideihin toimien mm.
1795 detergentteinä tai kuten energia-aineenvaihdunnan osalta yllä on kuvattu, protonoforeina tai muina
1796 ionoforeina. Täten rasvaliukoisten kemikaalien liittyminen kalvoihin estää aktiivisesti ylläpidettyjen protoni-
1797 tai ionigradienttien muodostumisen. Jos kemikaali vaikuttaa kalvon kantajaproteiineihin, vaikutukset ovat
1798 useimmiten proteiinispesifisiä.

1799

1800 11.6. Apoptoosi ja nekroosi

1801 Apoptoosilla tarkoitetaan ohjelmoitua solukuolemaa ja nekroosilla solujen yleistä kuolemaa. Ohjelmoidussa
1802 solukuolemassa solu aluksi kutistuu ja sen DNA fragmentoituu. Tämä nähdään DNA tikkaina (DNA
1803 laddering) kun näyte ajetaan elektroforeettisesti. Solut hejoavat sitten apoptoottisiksi kappaleiksi.
1804 Apoptoosille on luonteenomaista, että siihen ei liity tulehdusreaktioita, joita taas tyypillisesti esiintyy
1805 nekroosin yhteydessä. Apoptoosissa aktivoituvat kaspasientsyymit, jotka spesifisesti toimivat tiettyjen
1806 solurakenteiden hajotuksessa. Useat kemikaalit aiheuttavat apoptoosia ja silloin kun pitoisuus on tappava
1807 kaikki yhdisteet aiheuttavat nekroosia. Nekroosissa tuma aluksi kondensoituu ja muuttuu basofiiliseksi
1808 minkä jälkeen se hajoaa. Nekroottisten muttei apoptoottisten solujen sytoplasma on terveitä soluja
1809 happamampi ja solun valkuaisaineet voivat koaguloitua. Nekroosin yhteydessä solun proteolyytiset
1810 entsyymit vapautuvat hallitsemattomasti ja hajottavat myös lähisoluja.

1811

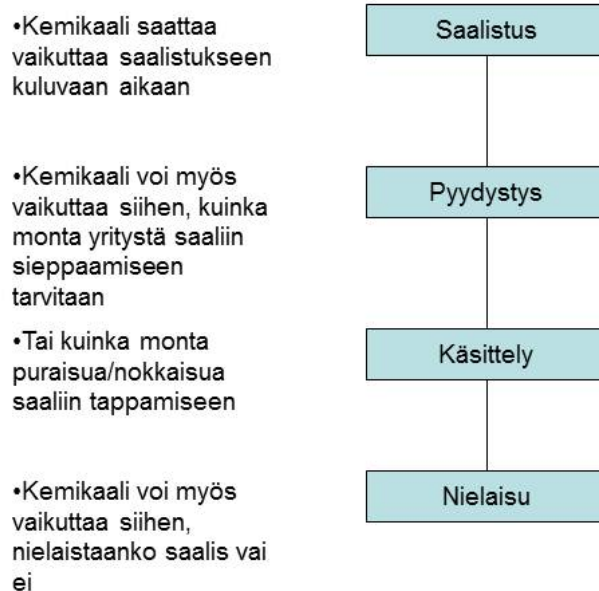
1812 11.7. Kehitysvaikutukset

1813 Käytännössä kemikaalien kaikki vaikutukset kohdistuvat eri kehitysvaiheissa oleviin organismeihin. Täten
1814 usein on mahdotonta puhua kehitysvaikutuksista irrallisina muista vaikutuksista. Usein kemikaalien
1815 aiheuttamat haitat heijastuvat epänormaalina kehityksenä, minkä vuoksi esimerkiksi epämuodostumien
1816 esiintymistä kehittyvissä poikasissa käytetään mitattavana suureena. Yleisenä lähtökohtana pidetään sitä,
1817 että kemikaalit vaikuttavat alhaisemmissa pitoisuuksissa alkionkehitykseen kuin eliöiden muihin
1818 kehitysvaiheisiin. Vaikka tämä onkin yleinen piirre, se ei aina pidä paikkaansa, joten tutkittaessa
1819 kemikaalivaikutuksia, asia pitää varmistaa. Johtuen siitä, että kemikaalit voivat vaikuttaa eri tavoin ja eri
1820 pitoisuuksissa eliöiden elämänsäkaaren eri vaiheissa, käytetään aineiden toksisuuden testauksessa
1821 elämänsäkiertotestejä (elinkiertotestejä), joista täydelliset ulottuvat hedelmöittyneestä munasolusta
1822 lisääntymiseen asti. Osittaisissa testeissä seurataan vain niitä vaiheita, joiden arvellaan olevan herkimpiä
1823 kemikaalille kuten alkionkehitys. Kehitysvaikutuksissa sekä kasvainten ja syöpien synnyssä tärkeinä syinä
1824 ovat useiden kemikaalien aiheuttamat häiriöt solusykliissä. Kun solunjakautuminen on kiivasta, kuten
1825 varhaisessa kehityksessä, kertyvät häiriöt ja näkyvät eliöiden kehityksenaikaisissa ilmiöissä.

1826

1827 11.8. Käyttäytymisvaikutukset
 1828 Melkein kaikki toimintaan vaikuttavat yhdisteet muuttavat eläinten käyttäytymistä. Esimerkiksi niin
 1829 energia-aineenvaihduntaan kuin hermoston toimintaan vaikuttavat kemikaalit muuttavat eliöiden
 1830 liikkumista, piiloutumista, ravinnonhankinta- ja lisääntymiskäyttäytymistä. Muun muassa
 1831 asetyylikoliiniesteraasin hajotuksen estyminen korreloi hyvin eläimen aktiivisuuden kanssa. Kun hajotus
 1832 estyy, esimerkiksi kalojen uintiaktiivisuus kiihtyy. Käyttäytymisvaikutukset liittyvät erityisesti eliöiden
 1833 välisiin vuorovaikutuksiin. Mikäli ruuanhankintaan ja piiloutumiseen kuluva aika muuttuu, näkyy se peto-
 1834 saalis vuorovaikutuksien muutoksina. Ravinnon hankintakäyttäytymisen mahdolliset muutokset on esitetty
 1835 kuvassa 11.

1836
 1837
 1838 Kuva 11. Ravinnonhankintakäyttäytyminen ja siihen mahdollisesti kemikaalien vaikutuksesta tulevat
 1839 muutokset. Oikealla kaavio ravinnonhankinnan ajallisesta sekvenssistä ja vasemmalla esimerkkejä
 1840 kemikaalien mahdollisista vaikutuksista.
 1841



1842 11.9. Bioindikaattorit ja biomarkerit
 1843 Bioindikaattoreilla tarkoitetaan ekotoksikologiassa yleensä eliölajeja, joiden avulla kontaminaatiota
 1844 tutkitaan. Bioindikaattorien tärkeä ominaisuus on yleisyys – niitä tulisi löytyä mahdollisimman yleisesti
 1845 tutkittavista ympäristöistä. Myös kontaminaation vaikutusten suuri ennustettavuus eliössä on tärkeä hyvän
 1846 bioindikaattorin ominaisuus, samoin havaittujen vaikutusten helppo ja halpa mitattavuus. Toivottava
 1847 ominaisuus bioindikaattoreille on myös, että ne keräävät myrkkyä ja että niissä esiintyy myrkkyvaikutuksia,
 1848

1849 jotka eivät kuitenkaan saa olla tappavia. Hyödyllistä on myös pieni koko ja vähäinen liikkuvuus. Jos laji pysyy
 1850 paikoillaan, siinä havaitut vasteet kertovat paikallisista vaikutuksista. Koska kasvit yleensä pysyvät
 1851 paikallaan, ne ovat tavallisesti eläimiä parempia bioindikaattoreita. Kuitenkin useimmat yleisesti
 1852 bioindikaattoreina käytetyt lajit ovat eläimiä. Vesistötoksikologiassa tällaisia lajeja ovat mm. *Daphnia*-suvun
 1853 äyriäiset (vesikirput), sinisimpukat (*Mytilus*) ja kolmipiikki. Terrestriessä toksikologiassa esimerkiksi lierot
 1854 (*Lumbricus*), hyppyhäntäiset (*Collembola*), linnuista tiaiset (*Parus*) ja nisäkkäistä myyrät voivat olla
 1855 bioindikaattoreita.

1856 Biomarkkerit puolestaan ovat mitattavissa olevia, useimmiten biokemiallisia tai fysiologisia suureita. Niissä
 1857 erotetaan kaksi tyyppiä: altistumisen ja vaikutusten biomarkkerit. Altistumisen biomarkkerit osoittavat
 1858 eliön joutuneen kemikaalia sisältävään ympäristöön, mutta muutos ei välttämättä vaikuta eliön
 1859 selviytymiseen ja kelpoisuuteen. Vaikutusten biomarkkerit puolestaan osoittavat eliön normaalien
 1860 elintoimintojen häiriytyneen. Täten, vaikka vasteita käytetäänkin irrallisina myrkyllisyyttä osoittamassa,
 1861 muutoksen selittäminen edellyttää eliön normaalin biokemian ja fysiologian tuntemusta. Lisäksi uusien
 1862 biomarkkereiden kehittämisessä auttaa merkittävästi se, että tuntee eliöiden normaalit toiminnot.
 1863 Biomarkkereina käytetään usein proteiinien määriä, jotka osoitetaan vasta-aineilla. Useimmiten vasta-
 1864 aineet on kehitetty nisäkkään (ihminen, rotta ja hiiri tärkeimpinä) valkuaisaineille ja välttämättä se, että
 1865 vasta-aine tunnistaa jonkin valkuaisaineen muissa eliöryhmissä ei osoita, että samaa tehtävää tekevä
 1866 samankaltainen valkuaisaine on löydetty. Ainut asia, minkä voi varmasti sanoa on se, että geenituotteella
 1867 (valkuaisaine) on homologiaa tiettyä toimintaa suorittavaan nisäkkään geenituotteeseen. Esimerkiksi
 1868 selkärangaisista luukalojen geenistö on kahdentunut ainakin kerran useammin kuin ihmisen ja muiden
 1869 nisäkkäiden. Tämän seurauksena geeni voi koodata alkuperäisestä täysin poikkeavaa toimintaa tekevää
 1870 tuotetta. Muun muassa eräiden kalojen jäänestoproteiineja koodaavat geenit ovat homologisia erästä
 1871 ruuansulatusentsyymiin esiastetta, trypsinogeenia, koodaavan geenin kanssa. Paras mahdollinen
 1872 biomarkkeri on spesifinen tietylle saasteelle. Tällöin saastumisen lähde voidaan yksiselitteisesti osoittaa.
 1873 Valitettavasti useimpien biomarkkerivasteiden spesifisyys on alhainen. Taulukossa 7 on esitelty
 1874 biomarkkereina käytettyjä muuttujia ja niiden spesifisyyttä.

1875
 1876 Taulukko 7. Esimerkkejä ekotoksikologiassa usein käytetyistä biomarkkereista ja niiden spesifisyydestä
 1877 pilaantumisen aiheuttajalle. Taulukon biomarkkereiden lisäksi biomarkkereina käytetään useita
 1878 entsyymiaktiivisuuksia ja joukkoa immuunivasteita. Yleisenä ongelmana niiden käytössä on kuitenkin, ettei
 1879 muuttujien yhteyttä mihinkään pilaantumisen aiheuttajaan ole yksiselitteisesti selvitetty.

1880			
1881	Biomarkkeri	Mitä kuvaa	Spesifisyys
1882			
1883	ALA-D aktiivisuus	delta-aminolevuliinihappo dehydrataasi katalysoi yhtä	vain lyijyaltistus
1884		hemin porfyriinirenkkaan synteessin reaktiota	inhiboi
1885	Spiggiini	On sukukypsien ja lisääntymisvalmiiden	androgenitasoihin
1886		kolmipiikkikoiraideen erittämä valkuaisaine, jota ne	vaikuttavat aineet
1887		käyttävät pesänrakennusliimana. Kontaminaatiossa voi	
1888		erittyä myös naarailta.	
1889	Vitellogeniini	Naaraiden poikasten ruskuaiseen erittämä	estrogeeniagonistit
1890		ravintovalkuainen. Pilaantuneessa ympäristössä	
1891		myös koirat tuottavat tätä valkuaisainetta.	
1892	Retinolipofiilit	Retinol on A-vitamiini, jonka eri muotojen esiintymisen	organokloriinit

1893		muutokset voivat heijastaa ympäristön pilaantumista.	
1894	Porfyriiniprofiilit	Porfyriinit ovat hemin (hemoglobiini, sytokromit)	organokloriinit
1895		orgaaninen osa. Eri porfyriinit voidaan tunnistaa neste-	
1896		kromatogrammilla. Ympäristön saastuminen aiheuttaa	
1897		muutoksia eri porfyriinien määrien suhteissa.	
1898	Hyytymisproteiinit	Rotanmyrkyt laskevat tasoja estäen veren hyytymisen	rodentisidit
1899	MFOt	Biotransformaation faasin 1 tärkeimmät entsyymit	polyaromaattiset
1900		joiden aktiivisuus nousee, kun Ah-reseptori aktivoituu	hiilivedyt (PAH)
1901			ja eräät muut
1902			organokloriinit
1903	EROD aktiivisuus	Yhtenä eniten käytettynä biotransformaation faasin 1	
1904		entsyymiaktiivisuutena on EROD (Ethoxyresorufin-O-	
1905		deethylase) aktiivisuus	
1906	Metallotioneiinit	Kadmium-, kupari-, sinkki- ja elohopea-altistuksen	tietyt metallit
1907		yleisesti indusoimat proteiinit. Määrä riippuu myös	
1908		solusyklin vaiheesta.	
1909	DNA adduktit	DNA:n korjaus vaikeuttaa tulosten tulkintaa	PAH
1910	Stressiproteiinit (HSP)	Tuotanto lisääntyy aina kun proteiinien laskostuminen	useimmat
1911		muuttuu normaalista	stressit
1912			

Yleisesti ekotoksikologisessa kirjallisuudessa tutkittuja biomarkkereita ovat muun muassa seuraavat:

1. biotransformaatioreaktioihin liittyvät biomarkerit. Erityisen usein mitataan sekä sytokromi P450 ryhmän entsyymejä koodaavien geenien, etenkin *Cyp1a1* mRNA:n tasoa ja EROD-entsyymien aktiivisuutta. Näiden mittausten oletetaan antavan kuvan siitä, miten orgaaniset rengasrakenteiset yhdisteet aktivoivat aryyli hiilivetyreseptoreihin (AhR-reitti). Huomattava on kuitenkin, että useat luontaisetkin muutokset vaikuttavat EROD-entsyymien aktiivisuuteen. Myös biotransformaation toisen vaiheen konjugaatioreaktioiden entsyymien aktiivisuuksia, etenkin UDP-glukuronyylikonjugaatioentsyymejä, on käytetty biotransformaation aktiivisuutta kuvaamassa.
2. metallotioneiinit. Metallotioneiinit ovat paljon kysteiiniä sisältäviä lyhytketjuisia proteiineja, jotka sitovat tehokkaasti eräitä metalli-ioneita kuten kadmiumia, kuparia, elohopeaa, hopeaa ja sinkkiä. Kun ympäristön metallipitoisuus nousee ja kulkeutuminen eläimeen kiihtyy, metallotioneiinit indusoituvat. Metallotioneiineilla näyttää kuitenkin olevan merkittävä tehtävä myös solusykliissä, joten niiden määrä kasvaa huomattavasti solujakautumisen yhteydessä. Lisäksi metallotioneiinit ovat voineet toimia metallien varastoisissa silloin kun odotusarvona on, että metallin saatavuus myöhemmin on elintoimintoja rajoittava tekijä.
3. stressiproteiinit. Stressiproteiineista käytetään yleisesti nimitystä lämpöshokkiproteiinit (HSP), koska ne havaittiin ensin voimakkaan lämpötilan noston yhteydessä. Taulukossa 8 on selvitetty eri HSP ryhmät. Myöhemmin on havaittu, että stressiproteiinien induktio tapahtuu aina, kun valkuaisaineiden normaali rakenne häiriintyy. Täten melkein kaikki ympäristöstressit aiheuttavat stressiproteiinien pitoisuuden kasvun. Lisäksi stressiproteiineja esiintyy konstitutiivisesti, koska niitä tarvitaan valkuaisaineiden normaalissa laskostumisessa ja kulkeutumisessa solun sisäisten kalvojen läpi. Lisäksi erityisesti HSP90-ryhmän proteiinit ovat liittyneinä useisiin erilaisiin toimintoihin tekeviin valkuaisaineisiin. HSP90-ryhmän proteiinien irtoaminen ja kiinnittyminen muihin valkuaisaineisiin vaikuttaa näiden toimintaan.

1938 Taulukko 8. Stressiproteiinien (HSP) ryhmät.

1939

1940

1941

1942

1943

1944

1945

1946

1947

1948

1949

1950

1951

1952

1953

1954

1955

1956

1957

1958

1959

1960

1961

1962

1963

1964

1965

1966

1967

1968

1969

1970

1971

1972

1973

1974

1975

1976

1977

1978

1979

1980

1981

1982

1983

1984

suurperhenimike

ryhmään kuuluvien valkuaisaineiden nimiä ja joitakin kommentteja toiminnan tärkeistä piirteistä

Isot HSP:t

HSP100, HSP101, HSP110. Tutkittu etenkin kasveilla

HSP90-ryhmä

Liittyvät normaaleissa soluissa useihin valkuaisaineisiin. Jotkut ovat ympäristömyrkköjen indusoimia.

HSP70-ryhmä

HSP60, HSP68, HSP70, HSP72, HSC70, GRP78. Ympäristömuutoksien indusoimia ryhmän proteiineja esiintyy useimmissa eliöissä. Hyvin konservoitunut ryhmä, nisäkäsvastaineita voidaan käyttää mm. alkueläimillä. Tiettyjä ryhmän valkuaisaineita (HSC70; heat shock cognate) tarvitaan normaaleissa soluissa mahdollistamaan muiden syntyvien proteiinien oikeanlainen laskostuminen ja kulkeutuminen solun sisäisten (esim. ER, Golgin laite, tuma) kalvojen läpi.

Pienet HSP:t

Ubikitiini, HSP10, HSP17, HSP40, krystalliini. Tärkeitä erityisesti valkuaisaineiden hajotuksessa

4. lisääntymiseen liittyvät, usein hormonihäirinnän biomarkerit. Näistä ehkä eniten käytetty on vitellogeniini, joka on naaraan maksassa ruskuaiseen tuotettu proteiini. Kun selkärangaisen lisääntymishormonitasapainossa (estrogeenien osalta) on häiriöitä, myös koiraat rupeavat tuottamaan vitellogeniiniä. Yhtä selvää androgeenivaikutuksiin liittyvää biomarkkeria ei kaikilla selkärangaisilla ole. Sen sijaan vesistötoksikologiaan on löytynyt kolmipiikin spiggiini, joka on vain sukukypsällä koiralla lisääntymisaikaan erittyvä proteiini. Lajin koiras, joka hoitaa poikasia, käyttää sitä pesän liimana. Tämän proteiinin tuotantoon vaikuttavat androgeenitasapainoa häiritsevät kemikaalit. Vielä ei ole vedenpitävästi osoitettu, että vitellogeniinin kaltainen proteiini olisi selkärangattomissa vain lisääntymiseen liittyvä, vaikkakin vitellogeniiniä usein käytetään biomarkkerina myös selkärangattomien lisääntymishäiriöistä kertomassa. Tämä osoittaa ongelman, joka ekotoksikologiassa helposti tulee: kaukaistenkin lajien toisiaan muistuttavia proteiineja käytetään osoittamassa sen toiminnan häiriöitä, joka valkuaisaineella on parhaiten tunnetuilla lajeilla ilman varmistusta siitä, että proteiini toimii eri ryhmissä samassa tehtävässä.

5. Oksidatiivisia stressejä kuvaavat muuttujat. Oksidatiivista stressiä (happiradikaalien muodostuminen ylittää solun kyvyn hajottaa niitä) aiheuttavat niin eräät metallit, UV-säteily kuin useat orgaaniset yhdisteet (usein biotransformaation yhteydessä muodostuu oksidantteja). Oksidatiivisten stressien biomarkkereina on mitattu katalaasin ja superoksidi dismutaasin aktiivisuutta, kokonaisglutationipitoisuutta sekä pelkistyneen ja hapettuneen glutathionin suhdetta (GSH/GSSG), Oksidatiiviset stressit aiheuttavat esimerkiksi solukalvojen lipidien oksidaatiota, jota yleisesti mitataan TBARS-mittauksella (TBARS=thiobarbituric acid reactive substance). TBARS-mittaus kuvaa malondialdehydin (MDA) määrää, jota muodostuu lipidiperoksidaatiossa. TBARS mittaus ei kuitenkaan kuvaa lipidiperoksidaatiota kokonaisuutena, mikä täytyy mittauksia tulkittaessa ottaa huomioon. Yleisestikään mikään yksittäinen muuttuja ei kuvaa kunnolla oksidatiivista stressiä, vaan kokonaiskuvan saamiseksi on tarpeen mitata suuri joukko muuttujia. Tuloksin täsmentämiseksi myös ajalliset muutokset tulee ottaa huomioon.

1985 6. ALA-D aktiivisuus. Yksi spesifisimmistä käytössä olevista biomarkkereista on ALA-D entsyymi (delta-
1986 aminolevuliinihappo dehydrataasi) aktiivisuus. Tämä globiinin biosynteesiin osallistuva entsyymi inhiboituu
1987 vain lyijyn vaikutuksesta, joten entsyymiaktiivisuuden muutokset kuvaavat hyvin organismien altistumista
1988 lyijylle.

1989 **12. Luontaisten ympäristömuutoksien vaikutukset kemikaalien** 1990 **myrkyllisyyteen**

1991 Toksikologisen testauksen päämääränä on perinteisesti ollut vakioita mittausolosuhteet (ks. 1.4.1.). Tämä
1992 on tietysti hyödyksi, jos päämääränä on kemikaalin toksisuuden selvittäminen vakio-olosuhteissa niin, että
1993 laboratoriot eri puolilla maapalloa voivat saada samat tulokset. Jos kuitenkin päämääränä on kemikaalien
1994 ekologisten vaikutusten arvioiminen, täytyy ympäristöolosuhteet ja niiden mahdolliset vaikutukset sekä
1995 kemikaalien käyttäytymiseen että vaikutuksiin ottaa huomioon. Tämä on erityisen tärkeätä, jos
1996 ympäristötekijät sellaisenaan vaikuttavat mitattaviin suureisiin. Tästä voi ottaa esimerkkinä erään
1997 biotransformaatioentsyymi, sytokromi 450 1:n (cyp 1). Entsyymiaktiivisuutta (EROD aktiivisuus) on
1998 yleisesti mitattu etoksiresoruffinaasi (ethoxy resorufinase) substraattina ja lähtökohtana on ollut, että
1999 aktiivisuuden muutokset kuvaavat dioksiinireseptorin (aryl hydrocarbon receptor, AhR) kautta vaikuttavien
2000 ympäristömyrkkyjen (pääasiassa orgaaniset yhdisteet, joissa on yksi tai useampi bentseenirengas)
2001 aiheuttamaa entsyymi-induktiota. Entsyymi aktiivisuuteen vaikuttavat kuitenkin myös lukuisat luontaiset
2002 ympäristötekijät kuten vähähappisuus. Samoin SOD (superoksidi dismutaasi) aktiivisuutta käytetään usein
2003 oksidatiivisen stressin biomarkerina. Kuitenkin saman lajin eri oloissa elävillä populaatioilla ja luontaisia
2004 ympäristömuutoksia kokevilla eläimillä voi olla hyvinkin erilaiset SOD-aktiivisuudet. Luontaisten
2005 ympäristötekijöiden yhteydet kemikaalien ympäristövaikutuksiin ovatkin viime aikoina nousseet
2006 ekotoksikologisen tutkimuksen eturintamaan.

2007 Lisäksi viime aikoina paljon huomiota saaneet ympäristöongelmat, niin globaalimuutos (ilmastomuutos),
2008 rehevöityminen kuin otsonikato liittyvät luontaisiin ympäristömuutoksiin. Merkittävimmät luontaiset
2009 ympäristötekijät, jotka vaikuttavat aineiden myrkyllisyyteen ovat lämpötila, happipitoisuus, suolapitoisuus,
2010 säteily, veden saatavuus ja valuma ja hiilidioksidipitoisuus. Näiden lisäksi eliöiden väliset vuorovaikutukset
2011 kuten lajien sisäinen ja välinen kilpailu sekä peto-saalissuhteet vaikuttavat merkittävässä määrin siihen,
2012 mikä kemikaalin nettovaikutus ympäristössä on. Esimerkkinä peto-saalissuhteen merkityksestä voi ottaa
2013 seuraavan hypoteettisen vaikutuksen. Kemikaali aiheuttaa sen, että saalis on näkyvillä ja tulee syödyksi 5 %
2014 useammin kuin ilman kemikaalialtistusta. Tehtäessä toksisuustestausta tai tutkittaessa lajia yksin, mitään
2015 muutosta eliön elinkelpoisuudessa ei havaita. Kuitenkin lisäsaalistettavuus voi aiheuttaa sen, että laji
2016 kokonaan katoaa yhteisöstä. Riippuen lajin merkityksestä tällä saattaa olla paljonkin vaikutuksia yhteisön
2017 koostumukseen.

2018 **12.1. Lämpötila**

2019 Lämpötilan vaikutukset aineiden myrkyllisyyteen perustuvat (1) vaikutuksiin kemikaalin käyttäytymiseen ja
2020 (2) kemikaalin vaikutuksiin eläimessä. Kaikki kemialliset reaktiot nopeutuvat lämpötilan noustessa. Täten
2021 lämpötilan muutokset vaikuttavat niin aineiden kulkeutumiseen kuin hajoamiseen ja muuntumiseen
2022 ”tytäryhdisteiksi”. Lämpötilan vaikutus kulkeutumiseen riippuu siitä, onko kulkeutuminen puhdasta
2023 diffuusiota vai tapahtuuko se kantajan kautta tai mahdollisesti aktiivisena kuljetuksena. Lämpötilan
2024 aiheuttamat muutokset puhtaasti diffuusion välityksellä tapahtuvassa kulkeutumisessa ovat pienemmät
2025 kuin aktiivisessa tai kantajavälitteisessä kulkeutumisessa. Lämpötilan nousu nopeuttaa joka tapauksessa
2026 aineiden kulkeutumista eliöihin, joten useimmin lämpötilan kohoaminen lisää aineiden kertymistä. Joissakin

2027 tapauksissa päinvastainenkin ilmiö voi esiintyä, jos aineen sisäänkulkeutuminen on pääasiassa passiivista
2028 diffuusiota ja erityis aktiivista kuljetusta. Tällöin lämpötilan nousu nopeuttaa erityistä enemmän kuin
2029 sisäänottoa. Lämpötilan noustessa aineiden hajominen/muuntuminen nopeutuu, joten jos muuntumisen
2030 tuloksena syntyvät yhdisteet ovat myrkyllisempiä kuin lähtökemikaalit, kemikaalin näennäinen myrkyllisyys
2031 kasvaa lämpötilan noustessa. Jos taas tytär yhdisteet ovat vähemmän myrkyllisiä kuin lähtöaine, kemikaalin
2032 nopeutuva hajotus/muuntuminen vähentää aineen myrkyllisyyttä lämpötilan noustessa. Jos eliöön
2033 joutuvan aineen kokonaismäärää mitataan lähtö- + tytär yhdisteinä, lämpötilan nousu yleensä lisää sitä.

2034 Ympäristön lämpötilan muutokset vaikuttavat eri tavalla endotermisten (tasalämpöisten) ja ektotermisten
2035 (vaihtolämpöisten) eläinten aineenvaihduntaan. Koska tasalämpöiset eläimet pitävät solujensa lämpötilan
2036 vakiona, ne tekevät enemmän työtä (kuluttavat energiaa) lämpötilan laskiessa kuin ympäristön lämpötilan
2037 ollessa optimi. Lämpötilan laskiessa endotermiset eläimet joutuvat usein käyttämään rasvavarastojaan
2038 aineenvaihdunnassa. Tällöin usein rasvaliukoiset ympäristömyrkyt vapautuvat verenkiertoon ja
2039 aiheuttavat viivästynyttä myrkyllisyyttä. Vaihtolämpöisten eläinten energiankulutus puolestaan kasvaa aina
2040 lämpötilan noustessa. Kun energiankulutus kasvaa, aineiden myrkyllisyys yleensä kasvaa. Täten lämpötilan
2041 nousu useimmiten lisää aineiden myrkyllisyyttä vaihtolämpöisillä eläimillä.

2042 Lämpötilaerot eri ilmastovyöhykkeillä ovat yksi merkittävimmistä tekijöistä, jotka aiheuttavat
2043 myrkyllisyyseroja eri alueiden organismien välille. Lisäksi viime aikojen lämpötilamuutokset, jotka ovat
2044 aiheuttaneet muun muassa lähes kaikkien merialueiden lämpöilannousun, vaikuttavat melkein kaikkiin
2045 ympäristömyrkyvasteisiin. Näin ollen esimerkiksi viime aikoina havaitut korallien vaikeudet johtuvat
2046 osittain lämpötilannoususta sellaisenaan mutta osittain ympäristömyrkyjen vaikutusten
2047 lämpötilariippuvista muutoksista.

2048 12.2. Happi

2049 Hapenpuute ja happipitoisuuden vaihtelut ovat yksi merkittävimmistä ympäristöongelmista
2050 vesiympäristössä. Pääasiassa ihmisen toimintojen aiheuttama rehevöityminen lisää sekä vesistöjen pohjien
2051 ja pohjia lähellä olevan veden pitkäaikaista hapettomuutta että matalien vesien happipitoisuuden
2052 vaihteluita. Kun vihreät kasvit auringonvalossa yhteyttävät, nousee veden hapen osapaine korkeammaksi
2053 kuin ilmakyllästeisen veden. Yöllä kaikki eliöt kuluttavat happea hengittäessään ja vesien happipitoisuus
2054 laskee lähelle nollaa. Matalissa vesissä happipitoisuuden vaihtelut ovat suuria ja hypoksia-
2055 hyperoksiamuutokset tapahtuvat rytmisesti. Syvemmissä vesissä, joissa vihreät kasvit eivät pysty
2056 yhteyttämään, hypoksia voi olla pitkäaikaista. Historiallisesti rehevöitymistä aiheuttivat eniten
2057 asutusjätevedet ja teollisuuden, Suomessa erityisesti puunjalostusteollisuuden, jätevedet. Kun nykyisin
2058 vedenpuhdistus länsimaissa poistaa pääosan jätevesien rehevöitymistä aiheuttavista saasteista,
2059 rehevöitymisen tärkeimmäksi aiheuttajaksi on kohonnut maatalouden hajakuormitus, mikä aiheutuu
2060 pääosin lannoituksesta. Lisäksi rehevöitymistä ja happipitoisuuden laskua aiheuttaa sisäinen kuormitus:
2061 vesien pohjasedimentteihin laskeutunut vanhempi orgaaninen jäte kuluttaa hajotessaan happea. Vaikka
2062 julkisuudessa kalanviljelyn aiheuttama rehevöityminen onkin ollut paljon tapetilla, sen vaikutukset ovat
2063 vain paikalliset. Kun perinteisesti rehevöityminen on ollut eräs tärkeimmistä vesistön pilaantumisen
2064 indikaattoreista, biologinen hapenkulutus (BOD) ja kemiallinen hapenkulutus (COD) ovat vesistöistä
2065 tavallisesti seurattavia suureita.

2066

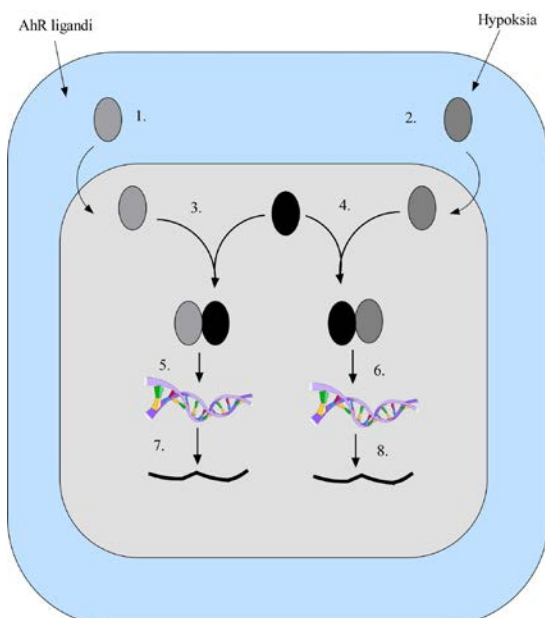
2067 Maaympäristössä happipitoisuuden lasku on paljon vähäisempää kuin vesiympäristössä – määrällisesti
2068 happea on yhtä paljon n. 23 km:n korkeudessa ilmassa kuin ilmakyllästeisessä vedessä merenpinnan

2069 tasolla. Ympäristömuutoksena hypoksia onkin paljon yleisempi vesi- kuin maaympäristössä, jossa sitä
 2070 esiintyy toisaalta koloissa ja luolissa (joissa kuitenkin hiilidioksidipitoisuuden nousu on useimmiten eliöiden
 2071 toimintoja enemmän häiritsevä kuin happipitoisuuden lasku) ja toisaalta vuoristossa. Korkeassa ilmanalassa
 2072 ei yleensä ole muuta ympäristön pilaantumista, joten happipitoisuuden laskun ja kemikaalien
 2073 yhteisvaikutukset ovat vähäiset.

2074
 2075 Alhainen happipitoisuus vaikuttaa välittömästi energiantuotantoon, joten mitokondrioihin tai glykolyysiin
 2076 vaikuttavilla kemikaaleilla on tätä kautta yhteydet vähähappisuuteen. Energiantuotannon häiriöt näkyvät
 2077 jokseenkin kaikissa toiminnoissa, joten niin eliöiden liikkuminen kuin immunologiset vasteet muuttuvat
 2078 kemikaalien vaikutuksesta verrattuna normaalisti vähähappisessa ympäristössä havaittuihin. Toinen
 2079 merkittävä happipitoisuuteen liittyvä tekijä on geenien ilmeneminen. Jopa kaksi prosenttia kaikista
 2080 geeneistä on suoraan happipitoisuuden säätelemiä. Yksi tärkeimmistä säätelymekanismeista on
 2081 geeniluennan (transkription) säätely hypoksian indusoiman tekijän (HIF) kautta. Kun happipitoisuus laskee,
 2082 hypoksian indusoima tekijä (ennen kaikkea HIF1 α) stabiloituu, menee tumaan ja muodostaa
 2083 heterodimeerin ARNT:n (Aryl Hydrocarbon Nuclear Translocator) kanssa. Dimeeri sitoutuu DNA:han ja
 2084 aktivoi hapestä riippuvan transkription. HIF1 α ja muut HIF:t kuuluvat samaan proteiiniperheeseen kuin
 2085 AhR (aryylihiilivetyreseptori). AhR on tärkein orgaanisten ympäristömyrkkyjen detoksifikaatiota aktivoiva
 2086 tekijä. Kun orgaaninen ympäristömyrkky sitoutuu AhR:ään, se siirtyy tumaan ja dimerisoituu ARNT:n
 2087 kanssa. Dimeeri sitoutuu DNA:han ja aktivoi erityisesti sytokromi P450 ryhmän entsyymejä koodaavien
 2088 geenien luentaa, ehkä tärkeimpänä *Cyp1*. Kaikkiaan P450 ryhmän entsyymejä on jopa yli sata. Tehdyissä
 2089 tutkimuksissa on havaittu, että HIF α voi vaikuttaa AhR:n toimintaan, joten vähähappisuus- ja
 2090 ympäristömyrkkyjen aiheuttamien geeniluentavasteiden välillä on vuorovaikutus (Kuva 12).

2091
 2092 Kuva 12. Hapestä ja ksenobiooteista riippuvan geeniluennan vuorovaikutukset. Orgaaninen
 2093 ympäristömyrkky sitoutuu aroylihiilivetyreseptoriin (AhR; 1) ja vähäinen happi (hypoksia) stabiloii hypoksian
 2094 indusoimaa tekijää (HIF; 2). Molemmat siirtyvät tumaan, jossa muodostavat dimeerin ARNT:n kanssa (3, 4)
 2095 kilpaillen käytettävissä olevista ARNT-molekyyleistä. Kumpikin dimeeri sitoutuu DNA:han (5, 6) ja indusoi
 2096 spesifistä geeniluentaa (7, 8). Kuva modifioitu artikkelista Nikinmaa, M. & Rytönen, K.T. Aquatic Toxicology
 2097 105S, 16-24 (2011)

2098



2099

2100
2101
2102
2103
2104
2105
2106
2107
2108
2109
2110
2111
2112
2113
2114
2115
2116
2117
2118
2119
2120
2121
2122
2123
2124
2125
2126
2127
2128
2129
2130
2131
2132
2133
2134
2135
2136

12.3.Suolapitoisuus

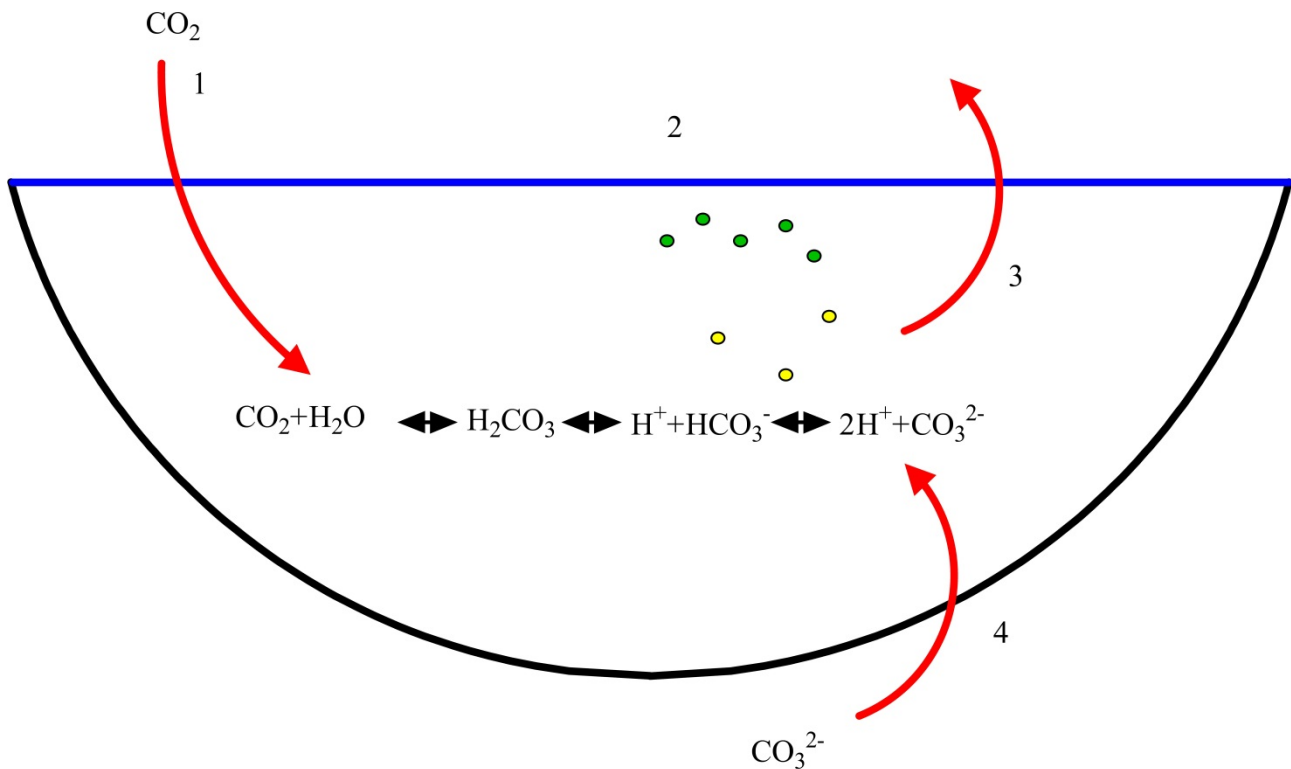
Suolapitoisuuden muutokset ovat ennen kaikkea vesieläinten kokema ympäristömuutos. Ne vaikuttavat erityisesti metallien myrkyllisyyteen kahdesta syystä. Ensinnäkin, jos metallien sisäänotto tapahtuu saman reitin kautta suolapitoisuudesta riippumatta ja käsiteltävät metallit kulkeutuvat saman kuljetusreitin kautta, suolapitoisuuden muutokset vaikuttavat siihen, miten todennäköistä metalli-ionin kulkeutuminen tietyn kuljetusreitin kautta on. Jos esimerkiksi myrkyllinen metalli kulkeutuu eläimeen saman kuljetusreitin kautta kuin kalium-ioni ja kalium-ionin pitoisuus nousee, myrkyllisen metallin kulkeutumisen todennäköisyys pienenee ja sitä kautta myrkyllisyys vähenee. Suolapitoisuuden muuttuminen voi toisaalta vaikuttaa siihen, minkä kulkeutumisreittien kautta metallit menevät eläimeen. Makeassa vedessä metallit kulkeutuvat eläimiin pääasiassa kidusten kuljetusreittien kautta, kun taas merivedessä metalli-ionien sisäänotto tapahtuu suurelta osin suolen kuljetusreittien kautta. Suolen ja kidusten kulkeutumisreittien ominaisuudet voivat olla hyvinkin erilaisia, minkä seurauksena metallikulkeutuminen voi muuttua paljonkin suolapitoisuuden funktiona.

12.4. Muut abioottiset stressit

Muita tärkeitä abioottisia stressejä on esimerkiksi auringon säteily. Koska säteilyn määrä on hyvin erilaista eri osissa maapalloa, tropiikkiin sopeutuneiden eliöiden reaktiot ovat hyvin erilaiset kuin arktisten eliöiden, jos saatu auringon säteily vaikuttaa ympäristövasteisiin. Auringon säteily vaikuttaa erityisesti reaktiivisten happimuotojen esiintymiseen, joten sillä on vaikutus kaikkiin kemikaalivasteisiin, jotka perustuvat oksidatiivisiin stresseihin.

Merkittävä viime aikoina otsikohin ilmaston lämpenemisen myötä tullut muutos on merien happamoituminen (ocean acidification; Kuva 13). Kun hiilidioksidin määrä ympäristössä nousee, sitä kulkeutuu meriin, joissa on tasapaino hiilidioksidin, vetykarbonaatin ja karbonaatin välillä. Hiilidioksidi-karbonaatti kokonaisuus on yksi tärkeimmistä meriveden puskurijärjestelmistä. Kun siihen tuodaan lisää puskurijärjestelmän happoa (hiilidioksidi), pH laskee. Merien happamoitumisen arvioidaan vaikuttavan kaikkien eliöiden toimeentuloon.

Kuva 13. Merien happamoituminen (ocean acidification). 1. Hiilidioksidi kulkeutuu ilmasta veteen ja siirtää hiilihappo-karbonaattitasapainoa hiilihappoon päin aiheuttaen veden happamoitumisen. 2. Ihmisen tuottaman hiilidioksidin lisäksi kaikkien eliöiden hengitys tuottaa happamoittavaa hiilidioksidia. 3. Veden saastuminen pienentää hiilidioksidia kuluttavaa fotosynteesiä ennen kaikkea kasviplanktonin vähenemisen takia. 4. Veden happamoitumisen takia pohjiin kertynyt karbonaatti (pääosin eliöiden kalkkikuorista) liukenee veteen pyrkien palauttamaan pH:n. Hiilidioksidin jatkuvan tuoton seurauksena kulkeutuminen ilmasta veteen kuitenkin jatkuu ja vesi happamoituu.



2137

2138 12.5. Ravinnon laadun muutokset

2139 Ravinnon ominaisuuksissa tapahtuvat muutokset liittyvät läheisesti eliöiden välisiin vuorovaikutuksiin, joita
 2140 käsitellään jäljempänä. Ympäristöön joutuvat kemikaalit voivat vaikuttaa ravintoeliöiden saatavuuteen niin,
 2141 että ravinnon laatu on huonompaa saastuneessa kuin puhtaassa ympäristössä. Muutoksen tuloksena
 2142 eläinlajin menestys saastuneella alueella kärsii.

2143

2144 12.6. Eliöiden väliset vuorovaikutukset

2145 Eliöt vaikuttavat toistensa toimintaan ja eliöiden väliset vuorovaikutukset vaikuttavat siihen, miten
 2146 ympäristön pilaantuminen näkyy yhteisöjen ja ekosysteemien koostumuksessa. Tärkeimpinä bioottisina
 2147 vuorovaikutuksina, joihin ympäristön pilaantuminen voi vaikuttaa, ovat peto-saalissuhteet ja lajin sisäinen
 2148 tai lajin välinen kilpailu, joita alempana käsitellään. Muita mahdollisia vuorovaikutusten muutoksia ovat
 2149 habitaatin muutokset, loisinnan muutokset ja ajalliset muutokset eliöiden esiintymisessä. Tutkittaessa
 2150 bioottisia vuorovaikutuksia laboratoriokokeita parempi vaihtoehto olisi tehdä kenttäkokeita. Tällöin
 2151 kuitenkin koeasetelma monimutkaistuu huomattavasti, koska kattava tutkimus edellyttäisi sekä
 2152 kemikaalipitoisuuden että saalistajien/kilpailijoiden esiintymisen manipulaatiota. Koeasetelmien
 2153 yksinkertaistamiseksi tutkimuksia tehdään usein mikro- ja mesokosmoksia käyttäen (ks. 3.3.). Näiden
 2154 päämääränä on tehdä olosuhteet mahdollisimman luonnonmukaisiksi samalla helpottaen kokeellista
 2155 manipulaatiota. Usein joudutaan tarkastelemaan mitatun ominaisuuden ja ympäristömuutoksen yhteyttä
 2156 (korrelaatiota). Tällöin tulee aina muistaa, että kahden tekijän välinen korrelaatio ilman muuta tietoutta ei
 2157 välttämättä osoita syy-seuraussuhdetta.

2158

2159 12.6.1. Peto-saalissuhde

2160 Ympäristön pilaantuminen voi vaikuttaa lajin populaation tiheyteen tai jopa aiheuttaa sen sukupuuton
 2161 pilaantuneella alueella, vaikka pilaantumisen aiheuttaman kemikaalin pitoisuus olisi alle sen, mikä vaikuttaa
 2162 lajin hengissä säilymiseen, kasvuun tai lisääntymiseen, kun lajia tarkastellaan yksin. Tämän luonnossa
 2163 näkyvän muutoksen taustalla voi olla se, että kemikaalin subletaalit vaikutukset näkyvät peto-

2164 saalissuhteessa. Näiden vaikutusten kokeellisessa tutkimisessa käytettävien mikro- tai mesokosmosten on
2165 otettava huomioon tärkeimmät kosmoksessa esiintyvien lajien peto-saalissuhteiden piirteet.
2166 Yksinkertaisimmissa koeasetelmissa koejärjestelyyn tuodaan uusi laji (peto) ja selvitetään, miten
2167 alkuperäisen lajin (saalis) populaatio muuttuu. Luonnonmukaisuuden säilyttämiseksi täytyy koejärjestelyn
2168 ottaa huomioon tärkeimmät keinot, joilla saaliseläin välttelee petoa. Sangen useinhan eliöt välttävät
2169 saalistusta piiloutumalla. Tällöin koejärjestelyn täytyy antaa piiloutumismahdollisuus, esimerkiksi
2170 kaivautuminen sedimenttiin. Jos kemikaali vaikuttaa kaivautumiseen, minkä ansiosta eliö on aikaisempaa
2171 useammin saalistajansa näkyvissä, saalistus tehostuu. Kemikaali voi myös vaikuttaa saaliin yleiseen
2172 aktiivisuuteen tai siihen, miten saalis havaitsee saalistajan. Suorien vaikutusten lisäksi kemikaalit voivat
2173 vaikuttaa siten, että saaliseläimen käyttäytyminen saalistajan läsnä ollessa muuttuu. Saaliseläin voi
2174 ympäristömyrkyin vaikutuksesta esimerkiksi reagoida eri tavalla saalistajan hajuun kuin puhtaassa
2175 ympäristössä. Tällöin saalistajien määrä vaikuttaa saaliiksi jäävien eläinten määrään suoran
2176 tiheysvaikutuksen lisäksi hajusta riippuvan käyttäytymisvaikutuksen muuttumisen vuoksi.
2177 Saaliseläimen kantojen muutoksien lisäksi toksikantit voivat vaikuttaa saalistajan kantoihin, mikäli ne
2178 vaikuttavat saalistajan ravinnonhankintakäyttäytymiseen. Ravinnonhankinta koostuu saaliin
2179 havaitsemisesta, pyydystämisestä, kiinniotosta ja käsittelystä. Jos kemikaali vaikuttaa siihen, miten saalis
2180 havaitaan, saaliin pyydystämiseen kuluvaan aikaan tai siihen, miten monta näykkäisyä tarvitaan ennen kuin
2181 saaliin voi niellä, voi se vaikuttaa saalistajan kelpoisuuteen ja kannan kokoon ja menestykseen.

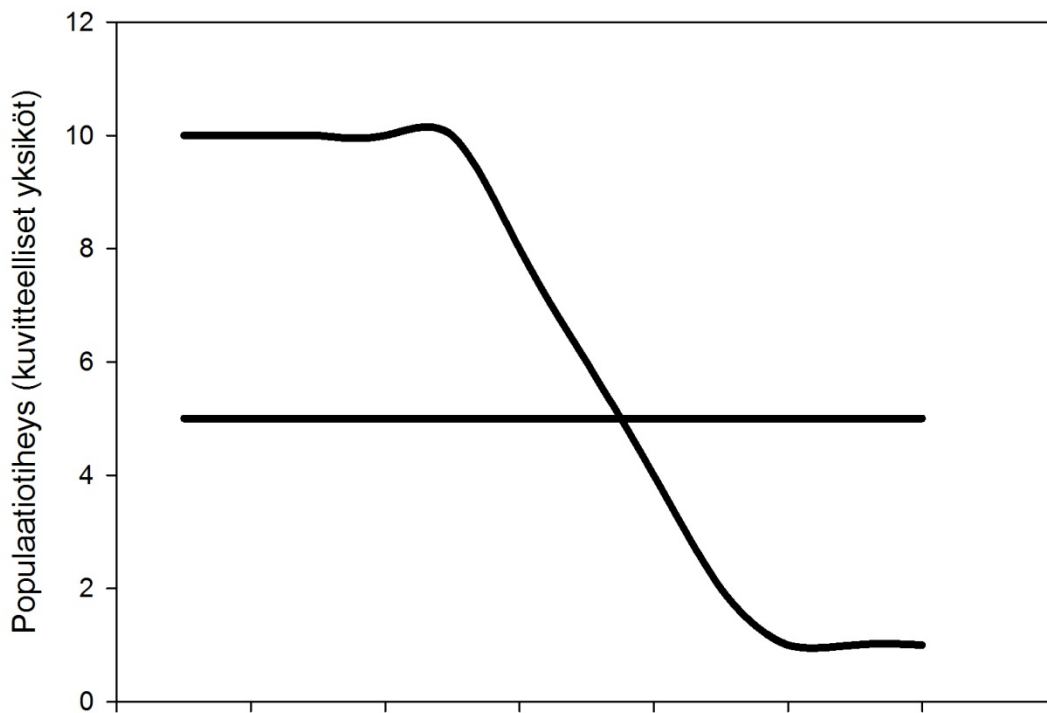
2182

2183 12.6.2. Kilpailu

2184 Yksityiskohtaisimmat tutkimukset siitä, miten kilpailu ja saastuminen vaikuttavat toisiinsa on tehty kasveja
2185 ja prokaryootteja käyttäen. Tutkimuksissa on selvitetty ennen kaikkea sitä, miten maatalouskemikaalit ja
2186 metallit vaikuttavat yhteisöjen lajikoostumukseen. Tällöin lähtökohtana on ollut, että lajikoostumuksen
2187 muutokset kuvaavat saasteiden vaikutuksia eri lajien kilpailukykyyn. Ensimmäiset kasvien metalliensietoa
2188 tutkivat kokeet viittasivat siihen, että metallipitoisuuden nousua hyvin sietävät lajit ovat huonoja
2189 kilpailijoita silloin, kun ympäristö ei ole saastunut. Yleisenä johtopäätöksenä voi myös muiden eliöryhmien
2190 osalta tehdä sen, että saasteita hyvin sietävät lajit ovat puhtaassa ympäristössä huonompia kilpailijoita kuin
2191 saasteita huonosti sietävät lajit. Ehkä tärkein yksittäinen tekijä, joka vaikuttaa lajin kilpailumenestykseen on
2192 sen lisääntymiskyky. Useat saasteita hyvin sietävät lajit lisääntyvät huonommin puhtaassa ympäristössä
2193 mutta paremmin saastepitoisuuden noustessa kuin saasteita huonosti sietävät lajit (Kuva 14). Toisaalta
2194 lajien pääsy piilopaikkoihin voi muuttua kemikaalien vaikutuksesta. Jos näin käy, muuttuu lajien joutuminen
2195 saaliiksi kilpailun seurauksena ja näkyy kannan muutoksena kemikaalin vaikutuksesta. Tällaisessa
2196 tapauksessa kahden lajin peto-saalisvuorovaikutuksen selvittäminen on liian yksinkertaistettu
2197 mittausjärjestely. Yleisenä ongelmana ekotoksikologisessa mittauksessa onkin se, että samalla kun pitää
2198 pyrkiä ottamaan luonnon vuorovaikutukset huomioon, täytyy saatava materiaali pystyä yksiselitteisesti
2199 käsittelemään.

2200

2201 Kuva 14. Periaatteet siitä, miten lisääntymismenestys vaikuttaa eliön populaatioon puhtaassa ja
2202 pilaantuneessa ympäristössä ympäristömyrkyä hyvin ja huonosti sietävässä lajissa. Puhtaassa ympäristössä
2203 pilaantumista huonosti sietävä laji lisääntyy tehokkaammin, minkä ansiosta sen populaatio on selvästi
2204 pilaantumista hyvin sietävää lajia suurempi. Ympäristön pilaantuminen ei kuitenkaan vaikuta jälkimmäisen
2205 lisääntymismenestykseen, minkä ansiosta sen populaation suuruus on jonkin ajan päästä suurempi kuin
2206 puhtaassa ympäristössä menestyksekkäämmän lajin.



2207

2208 13. Kemikaalien yhteisvaikutukset

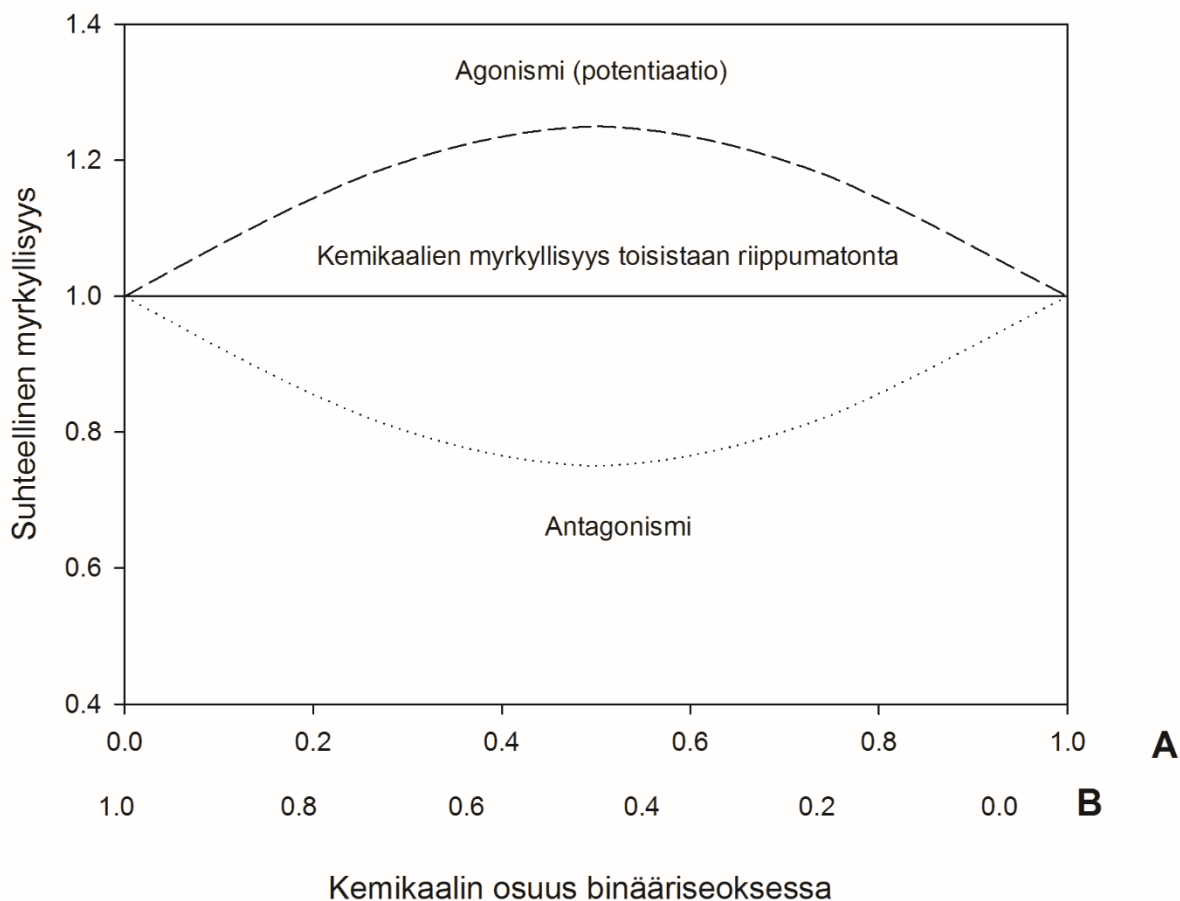
2209

2210 Useimmiten myrkyllisyyden tutkimukset tehdään tarkoin määritellyillä puhtasaineilla. Luonnossa esiintyvät
 2211 aineet eivät kuitenkaan ole yksin vaan esiintyvät erilaisina sekoituksina. Tämä asettaa suuren haasteen
 2212 ekotoksikologeille. Jos kemikaalit eivät vaikuta toistensa myrkyllisyyteen, niiden kokonaismyrkyllisyys on
 2213 sama kuin aineista myrkyllisimmän. Toisiensa myrkyllisyyteen vaikuttamattomien kemikaalien
 2214 vaikutuskohteet ovat tavallisesti toisistaan riippumattomat: kahdesta kemikaalista toinen voi vaikuttaa
 2215 esimerkiksi aerobiseen energiantuotantoon ja toinen vuorokausirytmikkaan. Jos kemikaalien
 2216 kokonaismyrkyllisyys on additiivista, ne voivat olla toistensa myrkyllisyyteen vaikuttamattomia
 2217 (independent action) tai niillä ajatellaan olevan yhteisvaikutuksia (agonistisia) tai niiden arvellaan
 2218 vähentävän toistensa myrkyllisyyttä (antagonistisia). Periaatteellisella tasolla kahden kemikaalin vaikutuksia
 2219 voidaan kuvata kuvan 15 osoittamalla tavalla.

2220

2221 Kuva 15. Kahden eri kemikaalin vaikutukset toistensa haitallisuuteen.

2222



2223
2224

2225 Agonismi ja antagonismi voivat riippua hyvin erilaisista tekijöistä, joten myrkyllisyyden mekanismin
2226 ymmärtäminen edellyttää yksityiskohtaista tietoa siitä, miten eliö toimii ja mihin sen ominaisuuksiin
2227 haitalliset kemikaalit vaikuttavat. Esimerkkinä yhteisvaikutuksista voi ottaa detoksifikaatioreitin:
2228 detoksifikaation faasi 1:n entsyymit ovat sytokromi P450 entsyymejä. Sytokromi P450-ryhmän entsyymit
2229 osallistuvat myös steroidimetaboliaan, joten luontaiset sukupuolisyklit voivat vaikuttaa entsyymien
2230 aktiivisuuksiin. Lisäksi aineiden sisäänotossa ja erityksessä tärkeiden kuljetusreittien toiminta voi usein
2231 riippua luontaisten sukupuolihormonien pitoisuuksista elimistössä. Näin ollen kemikaalin vaikutus ja se,
2232 toimiiko kemikaali agonistina tai antagonistina jonkun muun sukupuolihormonien kanssa vuorovaikuttavan
2233 yhdisteen kanssa voi riippua eliön kehitysvaiheesta ja sukupuolisesta kypsyydestä.

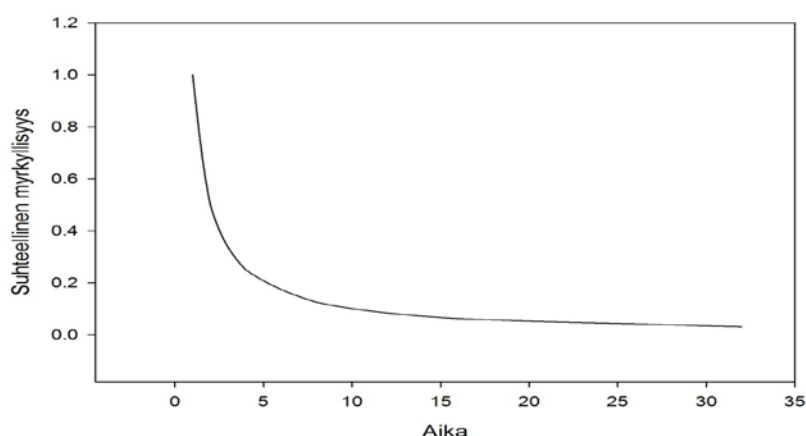
2234 14. Akuutti ja krooninen myrkyllisyys

2235 On vaikeata sanoa, milloin myrkyllisyys on akuuttia ja milloin se muuttuu krooniseksi. Akuutin ja kroonisen
2236 toksisuuden raja riippuu muun muassa eliön elinkaaren pituudesta: mikä on akuuttia pitkäikäiselle
2237 ihmiselle, on kroonista lyhyen aikaa elävälle vesikirpulle. Tämän vuoksi parhaiten toksisuuden määrittelee,
2238 kun sen keston ilmoittaa täsmällisesti aikana. Akuutti ja krooninen myrkyllisyys ovat erityisesti
2239 toksisuustestauksessa käsiteltäviä ongelmia: jos niissä aineen myrkyllisyyttä mitataan LC_{50} -arvoilla,
2240 näennäinen myrkyllisyys kasvaa ajan funktiona lähestyen asymptoottisesti tiettyä arvoa kuvan 16
2241 mukaisesti. Jos kuitenkin päivien kuluessa tapahtuva geeni-induktio vaikuttaa myrkyllisyyteen tai sen

2242 aiheuttamiin aineenvaihdunnan muutoksiin, voi näennäinen myrkyllisyys vähetä voimakkaastikin ajan
2243 funktiona. Molemmat yllämainitut piirteet tulisivat huomioonotetuiksi, jos akuutti myrkyllisyys
2244 määriteltäisiin myrkyllisyydeksi, joka täytyy käsitellä jo olemassa olevin valkuaisainein ja kroonisessa
2245 myrkyllisyydessä uudet geenituotteet olisivat ehtineet syntyä ja reagoida ympäristön pilaantumiseen.

2246

2247 Kuva 16. Aineen myrkyllisyyden (mitattuna LC_{50} arvolla) rippuvuus altistusajasta. Myrkyllisyys vähenee
2248 yleensä eksponentiaalisesti ajan funktiona lähestyen tiettyä pitoisuutta, joka on tappava myrkyllisyys
2249 äärettömän ajan kuluttua.



2250

2251

2252 14.1. Myrkyllisyyden mallinnus

2253 Ekotoksikologisen työn perimmäisenä päämääränä on mallintaa ja ennustaa, mitä vaikutuksia tulevilla
2254 kemikaalipäästöillä on elolliselle luonnolle. Vaikka tämä onkin lopullinen päämäärä, ollaan tällä hetkellä
2255 vielä hyvin kaukana siitä, että pystyttäisiin tekemään yksityiskohtaisia ja hyvin muutoksia kuvaavia malleja.
2256 Tähän on syynä yksinkertaisesti jo se, että eri eliöt reagoivat eri tavalla eri kemikaaleihin. Jo niinkin
2257 yksinkertaisessa mallinnuksessa kuin aineen kertymisessä eliöön (toksikokineettiset mallit) joudutaan
2258 tavallisesti lähtemään siitä, että eliöitä käsitellään yhden aihion kokonaisuutena, vaikka kemikaalit voivat

2259 kulkeutua eliöihin eri reittejä (jotka voivat vaihdella eliöstä riippuen) ja voivat kertyä eri tavoin eri osiin
2260 eliötä. Lisäksi kaikessa mallinnuksessa tulee muistaa, että mallit ovat yhtä hyviä kuin niihin mukaanotettu
2261 epävarmin tekijä. Nämä epävarmuustekijät huomioon ottaen onkin yllättävää, että jo tällä hetkellä on
2262 ympäristömyrkköjen vaikutusten ja kulkeutumisen mallinnuksessa edistytty merkittävästi. Pääasialliset
2263 edistysaskeleet on saavutettu sellaisissa piirteissä, jotka ovat hyvin samankaltaisia eliöstä riippumatta.
2264 Tällainen hyvin mallinnettu kokonaisuus on esimerkiksi kemikaalien kulkeutuminen ympäristössä.
2265 Onnistunut mallinnus on erityisen tärkeä lähtökohta onnistuneelle riskinarvioinnille. Mallinnuksessa tulee
2266 ensinnäkin kerätä kaikki olemassa oleva tietous tutkittavasta ilmiöstä niin laboratorio- kuin kenttäkokeista.
2267 Mikäli arvioitavasta lajista ei ole aikaisempaa tietoa, mallinnuksen ensimmäinen vaihe on aikaisemman
2268 tietouden ekstrapoloiminen kyseiseen lajiin. Seuraavassa vaiheessa tulee arvioitavaksi, minkälaiselle
2269 kemikaalikuormalle laji ympäristössään altistuu. Todennäköisen altistumisen ja aiemman tietouden
2270 perusteella on arvioitava, millaisia toimintoja altistuminen häiritsee joko suoraan tai epäsuorasti. Lopuksi
2271 mallinnus pyrkii selvittämään, miten toimintojen häiriöt heijastuvat populaatiotasolle.

2272 15. Kemikaalien vaikutukset populaatioihin

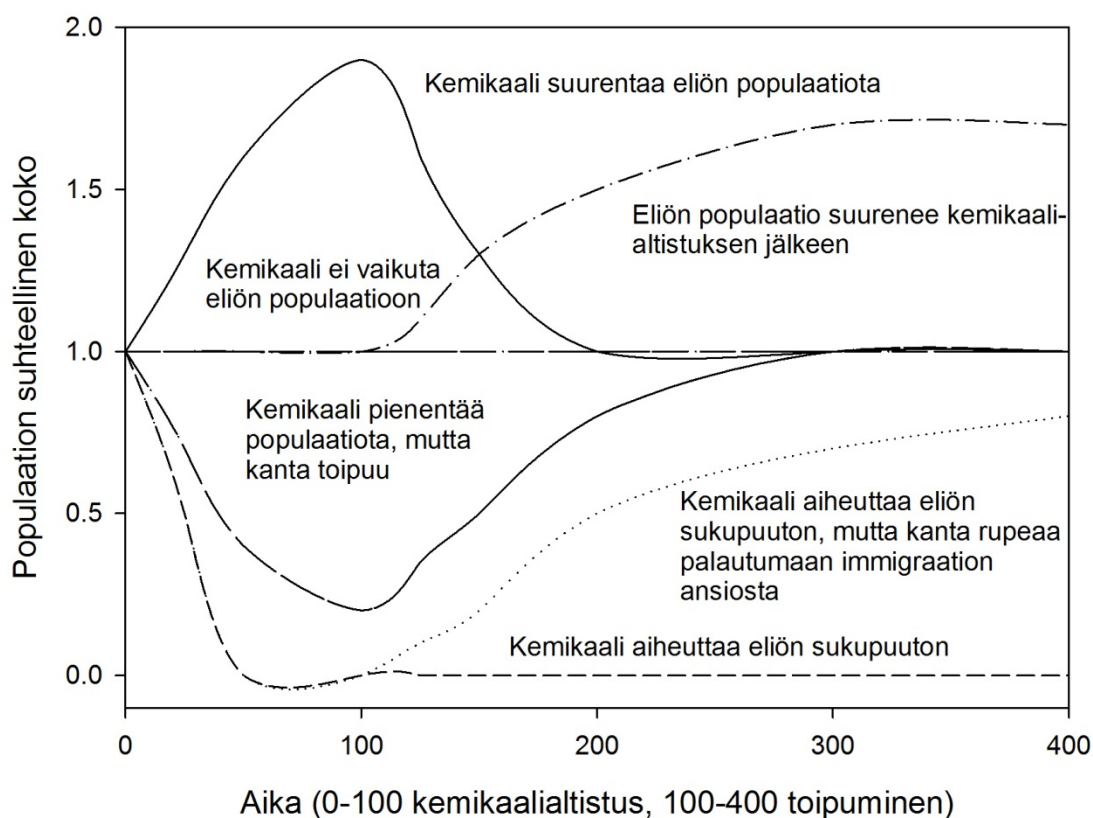
2273 Kemikaalin joutumisella ympäristöön ei ole useimmiten mitään merkitystä, jos sillä ei ole vaikutusta
2274 eliöiden populaatioihin ja tätä kautta yhteisöihin ja ekosysteemeihin. (Joskus poikkeamia tästä
2275 yleisperiaatteesta aiheuttaa esimerkiksi eliöiden immigraatio saastuneille alueille, minkä seurauksena
2276 populaatio ei muutu, vaikka alueella pysyvästi oleviin eliöihin kohdistuisikin selvä haitallinen vaikutus.
2277 Toinen samanlaisen poikkeaman syy on se, että myrkkö haittaa populaatiota vähemmän kuin kilpailu tai
2278 saalistus paremmin eliölle sopivilla alueilla tekee. Ympäristömyrkköaltistuksen ei myöskään tarvitse näkyä
2279 populaation koossa, jos populaation tiheys on niin korkea, että poikastuotannon väheneminen kemikaalin
2280 vaikutuksesta lisää riittävästi jäljelle jääneiden eliöiden todennäköisyyttä säilyä hengissä sukukypsyyteen
2281 asti). Näin ollen vaikka ympäristöstä voidaan osoittaa kemiallisin mittauksin kemikaalin läsnäolo, jos
2282 eliöpopulaatiot eivät lainkaan muutu, ei yleensä voida puhua ympäristön pilaantumisesta. Kemikaaleilla voi
2283 olla sekä suoria että epäsuoria vaikutuksia eliöiden populaatioihin. Suorat vaikutukset ovat perinteisiä
2284 myrkkövaikutuksia, jotka näkyvät tutkittaessa yhtä lajia. Epäsuorat vaikutukset perustuvat siihen, että
2285 kemikaalin vaikutuksesta esimerkiksi elion sairastumisriski, sen kyky kilpailla tai sen peto-saalis
2286 vuorovaikutukset muuttuvat. Tällöin elion populaation muutokset eivät johdu suorasta
2287 myrkkövaikutuksesta vaan sairauksista tai saalistuksen vaikutuksista. Epäsuorissa vaikutuksissa kemikaalilla
2288 ei ole välttämättä mitään vaikutusta eliöön. Esimerkiksi kasvimyrkkö, joka vaikuttaa fotosynteesiin ei
2289 luonnossa esiintyvissä pitoisuuksissa koskaan vaikuta eläimiin. Jos vaikutukset kasvillisuuteen kuitenkin
2290 vähentävät eläimen piiloutumismahdollisuuksia, joutuu eläin aiempaa enemmän saalistuksen kohteeksi.
2291 Tällöin eläinpopulaatio muuttuu kemikaalin vaikutuksesta, vaikka aineella ei ole eläimeen vaikutusta.
2292 Epäsuorien vaikutusten tutkimisessa voidaan käyttää mikro- ja mesokosmoksia (ks. 3.3.).

2293 Useat merkittävät ekologian, ekologisen genetiikan ja evoluutiobiologian havainnot ovat itse asiassa
2294 populaatioiden toksikologisia muutoksia. Tällaisia ovat esimerkiksi teollisuusmelanisin kehitys perhosissa,
2295 DDT:n ja muiden organokloriinihyönteismyrkköjen vaikutukset erityisesti petolintukantoihin ja metallien
2296 siedon kehitys kasveissa. Ehkä paras osoitus ihmisen aiheuttaman ympäristömuutoksen ja luonnonvalinnan
2297 yhteydestä on teollisuusmelanisin kehitys. Kun teollistumisen myötä kivihiilen käyttö Iso-Britanniassa
2298 kasvoi huimasti, ympäristöön levisi tumma noki. Tumalla taustalla tummat perhoset näkyivät vaaleita
2299 (parhaiten tutkittu laji on koivumittari, *Biston betularia*) huonommin, minkä seurauksena niiden kelpoisuus
2300 oli vaaleita parempi, kun saalistajat eivät huomanneet niitä hyvin, ja ne rupesivat yleistymään saastuneilla
2301 alueilla. Kun viime vuosina kivihiilen käyttö ja sen seurauksena tumma nokitausta on selvästi vähentynyt,

2302 perhoset ovat taas ruvenneet vaalenemaan. Tämä esimerkki luonnonvalinnan ja ympäristömuutoksien
 2303 yhteydestä osoittaa myös hyvin sukupolvivälin merkityksen: geneettinen ympäristösopeutuma havaittiin
 2304 selvästi ja suhteellisen nopeasti lajilla, jonka sukupolviväli on lyhyt. Sen sijaan esimerkiksi metsäjänikset
 2305 ovat edelleen valkoisia jo aikana, jolloin lunta ei ole ollut vuosiin, johtuen suhteellisen pitkästä
 2306 sukupolvivälistä ja sen seurauksena ajasta, joka geneettisiin sopeutumiin kuluu. Arvioitaessa kemikaalien
 2307 vaikutuksia populaatioihin on tietysti otettava huomioon, että populaatiossa on eliön kaikkia
 2308 kehitysvaiheita ja että sekä immigraatiota että emigraatiota voi tapahtua.

2309 Populaatiovaikutuksia selvitetään usein populaation kasvukäyriä mitaten. Usein mitataan populaation
 2310 kasvunopeutta, minkä muutokset osoittavat kemikaalilla olevan vaikutuksia. Kasvukäyrien, jotka lasketaan
 2311 Euler-Lotka yhtälöllä, muutoksien selvittäminen ei edellytä, että kemikaalin mekanistinen vaikutustapa
 2312 tiedettäisiin. Populaation kasvunopeuteen voivat vaikuttaa niin eri kehitysvaiheiden muuttunut kuolleisuus,
 2313 aika syntymästä sukukypsyyden saavuttamiseen ja lisääntymissykliä pitempään kuin tuotettujen jälkeläisten
 2314 määrä. Usein populaatioiden kasvunopeuteen vaikuttaa myös niiden tiheys ja useat näennäisistä
 2315 kemikaalivasteistakin ovat tiheydestä riippuvia. Tästä johtuen silloin kun voidaan, populaatiotason
 2316 tutkimuksissa käytetään ennalta määritettyä tiheyttä. Tämä ei tietenkään ole mahdollista silloin kun
 2317 tutkimuksia tehdään luonnonympäristössä. Populaatiovaikutusten kuvaamisessa ja arvioinnissa voidaan
 2318 käyttää epidemiologista lähtökohtaa tai lähestyä ympäristön kemikalisoitumisen vaikutuksia geneettisestä
 2319 näkökulmasta. Periaatteelliset muutokset kemikaalin populaatiovaikutuksissa on esitetty kuvassa 17.

2320
 2321 Kuva 17. Luonnonpopulaatioissa kemikaalialtistuksen aikana ja sen jälkeen tapahtuvien muutoksien
 2322 vaihtoehdot.



2323
 2324

2325 15.1. Epidemiologia

2326 Epidemiologia kuvaa sairauden tai ekotoksikologiassa ympäristövaikutuksen suhteellisen esiintymisen koko
2327 populaatiossa. Kaksi epidemiologiassa eniten käytettyä muuttujaa kuvaavat hyvin vaikutusten esiintymistä
2328 populaatiossa. Ensimmäinen on insidenssi, joka määrittää uusien muutoksien esiintymisen populaatiossa:
2329 se on suhde sairaiden ja terveiden yksilöiden välillä. Toinen on prevalenssi, joka antaa sairaiden yksilöiden
2330 määrän populaatiossa tietyllä hetkellä tai tietyn altistumisajan kuluessa: se on siis insidenssi x aika (Ero
2331 insidenssin ja prevalenssin välillä on se, että insidenssi määrittää uusien tapausten esiintymisen kun taas
2332 prevalenssi osoittaa sekä uusien että vanhempien esiintymisen). Täten, jos vaikutuksen insidenssi on 10 %
2333 (10 yksilöä 100:sta sairastuu yksikköajassa) ja altistumisen kesto on tähän verrattuna viisinkertainen, niin
2334 1000 yksilön populaatiosta 500 sairastuu jossain altistuksen vaiheessa. Joskus ympäristöön joutuneet
2335 kemikaalit lisäävät eliöiden sairastumista normaaleihin tauteihin.

2336

2337 15.2. Populaatiogenetiikka

2338 Eliöiden evoluutioon vaikuttavat niin sattuma eli geneettinen ajautuminen (genetic drift) kuin
2339 luonnonvalinta. Luonnonvalinnassa eliöiden ominaisuudet pyrkivät muuttumaan ympäristöön sopiviksi kun
2340 taas geneettisessä ajautumisessa muutoksilla ei ole yhteyttä ympäristömuutoksiin. Ympäristön
2341 kemikalisoitumisen perinnöllisyyteen vaikuttavat muutokset ovat luonnollisesti luonnonvalinnan seurausta.
2342 Jos kemikaalialtistuksen vaikutukset ovat sellaisia, että yksilön fysiologiaan liittyvä sopeutuminen
2343 (fenotyypin plastisuus) on riittävä, perinnöllisiä muutoksia ei tarvita.

2344

2345 Yksinkertaisin geneettinen muutos populaatiossa johtuu siitä, että eliöiden perimä vaihtelee. Näin ollen
2346 eliöt, joiden geenistö mahdollistaa hengissä säilymisen pilaantuneessa ympäristössä muodostavat
2347 aikaisempaa suuremman osuuden populaatiosta, minkä seurauksena niiden epäedullisia oloja sietävät
2348 jälkeläiset rikastuvat populaatiossa. Tällaisia muutoksia eliöpopulaatioissa on varmuudella pystytty
2349 osoittamaan. Toinen mahdollinen muutos on se, että genotoksikanttialtistuksen seurauksena eliöissä
2350 syntyy mutaatioita, jotka ovat edullisia pilaantuneessa ympäristössä. Mutatoituneiden yksilöiden
2351 jälkeläisetkin kantavat muuttunutta geeniä ja tästä johtuen niiden osuus pilaantuneessa ympäristössä
2352 kasvaa. Mutaatioihin liittyviä kelpoisuuden muutoksia on kokeellisesti pystytty tuottamaan lyhyen
2353 sukupolven eliöillä kuten bakteereilla, muttei yksiselitteisesti pitkäikäisillä selkärangkaisilla.

2354

2355 Yksilön vasteiden ja populaatiogenetiikan rajamailla on epigenetiikka, mikä tarkoittaa sukupolven yli
2356 tapahtuvia muutoksia, jotka eivät johdu DNA:n rakenteen muutoksista. Epigeneettiset muutokset johtuvat
2357 tavallisesti joko DNA:n tai histonien metylaation tai asetylaation muutoksista. Nämä vaikuttavat siihen,
2358 miten geenit ilmenevät. Muutokset eivät välttämättä siirry sukupolvelta toiselle, mutta emon kokema
2359 kemikaalialtistus voi vaikuttaa jälkeläisen (tai jopa sen jälkeläisen) DNA:n tai histonin metylaatioon. Tällöin
2360 geeniluenta voi muuttua. Vaikka viime vuosina DNA:n ja histonien metylaatiotasoa onkin
2361 ektoksikologisessa tutkimuksessa selvitetty usein ja muutoksia havaittu, epigeneettisiä muutoksia ei ole
2362 varmasti voitu osoittaa.

2363

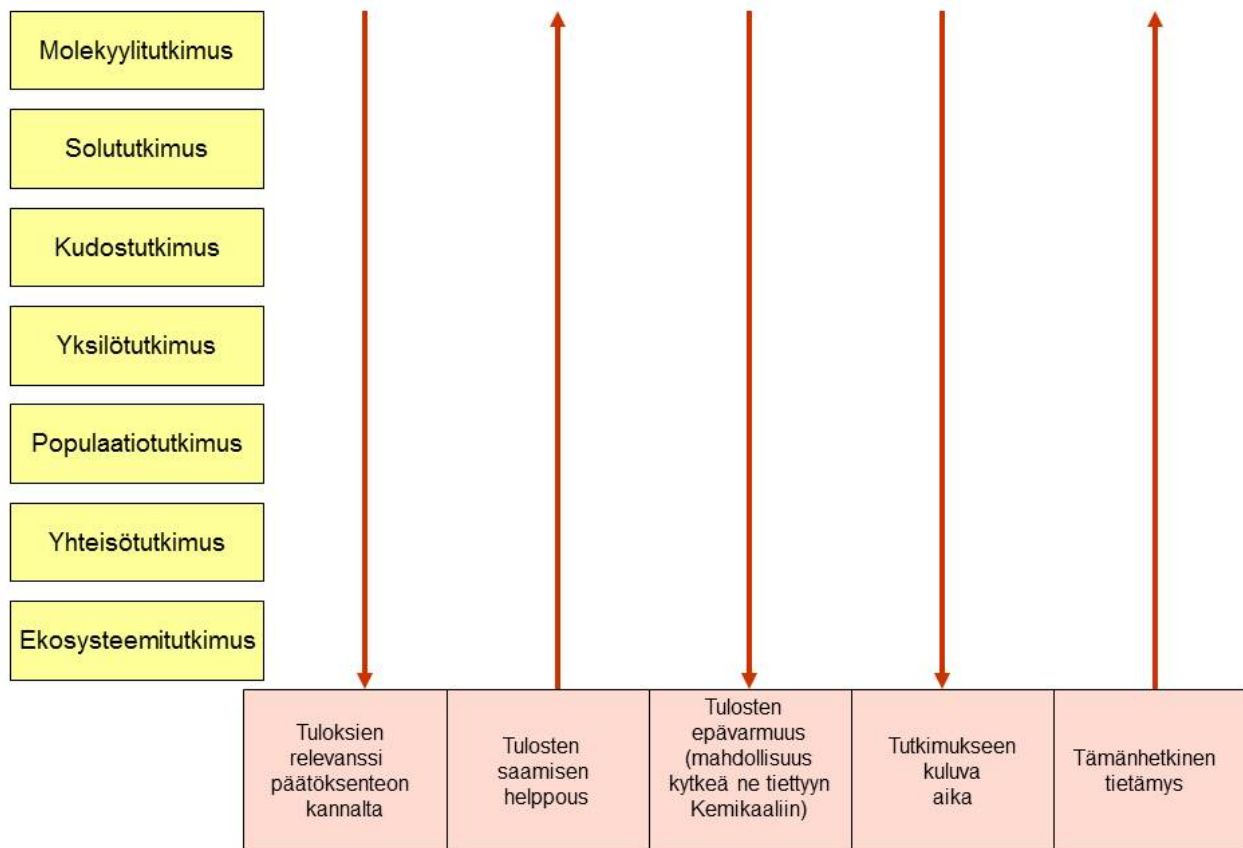
2364 Yleensä lähdetään siitä, että mitä heterotsygootimpi ja geneettisesti vaihtelevampi populaatio on, sitä
2365 paremmin se pystyy sietämään ympäristömuutoksia. Joissakin tapauksissa esiintyvä populaatio voi
2366 vaihdella hyvin vähän geneettisesti. Tällöin se on todennäköisesti laajentunut harvoista esivanhemmista,
2367 jolloin se on kokenut geneettisen pullonkaulan. Yhtenä luonnon monimuotoisuuden suojelun lähtökohdista
2368 pidetäänkin geneettisen monimuotoisuuden suojelua lajien sisällä. Populaation altistumista
2369 ympäristömuutoksille mitataan usein heterotsygoottisuutta käyttäen. Tällöin lähtökohtana on se, että

2370 heterotsygoottisuus vähenee ympäristön pilaantuessa. Heterotsygoottisuuden pieneneminen
2371 ympäristömuutoksen seurauksena kertoo esimerkiksi pienentyneisiin populaatiokokoihin liittyvistä
2372 sukusiitoshaitoista. Ympäristömuutoksista kärsivät pienentyneet populaatiot voivat myös
2373 satunnaistekijöiden vaikutuksesta kuolla helposti sukupuuttoon. Useissa tutkimuksissa tämänsuuntainen
2374 muutos onkin havaittu, mutta aina heterotsygotian muutos ei tutkimusten mukaan liity ympäristön
2375 pilaantumiseen.

2376 **16. Kemikaalien vaikutukset yhteisöihin ja ekosysteemeihin**

2377 Yhteisö muodostuu eri lajien populaatioista, joilla on vuorovaikutuksia toistensa kanssa ja ekosysteemi on
2378 useista yhteisöistä ja niiden elottomasta ympäristöstä muodostuva kokonaisuus, joka on alueellisesti
2379 yhtenäinen ja muodostaa ravinnekiertojen ja energiavirran kannalta kokonaisuuden. Ekotoksikologiassa on
2380 yhteisö jäänyt perinteisesti vähälle huomiolle, kun on keskitytty populaatio- ja ekosysteemitasojen
2381 muutoksiin. Koska kuitenkin raja siirtymälle yhteisöstä ekosysteemiin on epäselvä, on vaikeata erottaa,
2382 mikä on yhteisöekotoksikologiaa ja mikä ekosysteemiekotoksikologiaa. Periaatteellisella tasolla
2383 ekosysteemiekotoksikologian ja yhteisöekotoksikologian erottaa se, että ensimmäisessä tulevat abioottiset
2384 tekijät huomioonotetuiksi. Eliöyhteisöille on tyypillistä, että eri lajien populaatiotiheydet vaihtelevat
2385 suuresti. Lisäksi yhteisöissä on usein yksi tai useampia avainlajeja (keystone species), jotka ovat
2386 ratkaisevassa asemassa yhteisön toiminnalle. Yhteisöissä (ja laajemmissa ekosysteemeissä) energia virtaa
2387 tyypillisesti ravintoketjuissa (tai –verkoissa). Kemikaalien aiheuttamat muutokset yhteisöissä tai
2388 ekosysteemeissä tapahtuvat hitaasti. Usein mitattavien muutosten hitaus rajoittaa yhteisöistä tai
2389 ekosysteemeistä tehtävien arvioiden käyttöä. Toisaalta vain yhteisö/ekosysteemitasolla havaittavilla
2390 muutoksilla on merkitystä, jos pyritään ymmärtämään, miten ympäristön pilaantuminen laajasti vaikuttaa.
2391 On paljon nopeampaa selvittää ja mekanistisesti ymmärtää kemikaalien molekyyli- kuin
2392 ekosysteemitason vaikutukset (Kuva 18). Tietyissä tapauksissa, kuten DDT:n vaikutuksissa
2393 petolintupopulaatioihin, pystyttiin kuitenkin kemikaalin ekosysteemivaikutukset ja vaikutusten
2394 biokemialliset mekanismit yhdistämään niin vakuuttavasti, että kemikaali joutui käyttökieltoon 1970-luvulta
2395 alkaen. Tässä tapauksessa on huomattava, että lähtökohtana DDT:n vaikutuksia selvittäessä olivat
2396 korrelatiiviset havainnot petolintukannoista. Yleisesti käytetyillä mallilajeilla (esim. kana ja viiriäinen) tehdyt
2397 työt eivät olisi pystyneet osoittamaan DDT:n haitallisia vaikutuksia.

2398
2399 Kuva 18. Ekotoksikologisen tietämyksen tasot ja niiden pääpiirteet. Mitä lähempänä nuolen kärkeä
2400 tutkimustaso on sitä paremmin esitetty piirre pitää paikkaansa.
2401



2402

2403

2404

2405

2406

2407

2408

2409

2410

2411

2412

2413

2414

2415

2416

2417

2418

2419

2420

2421

2422

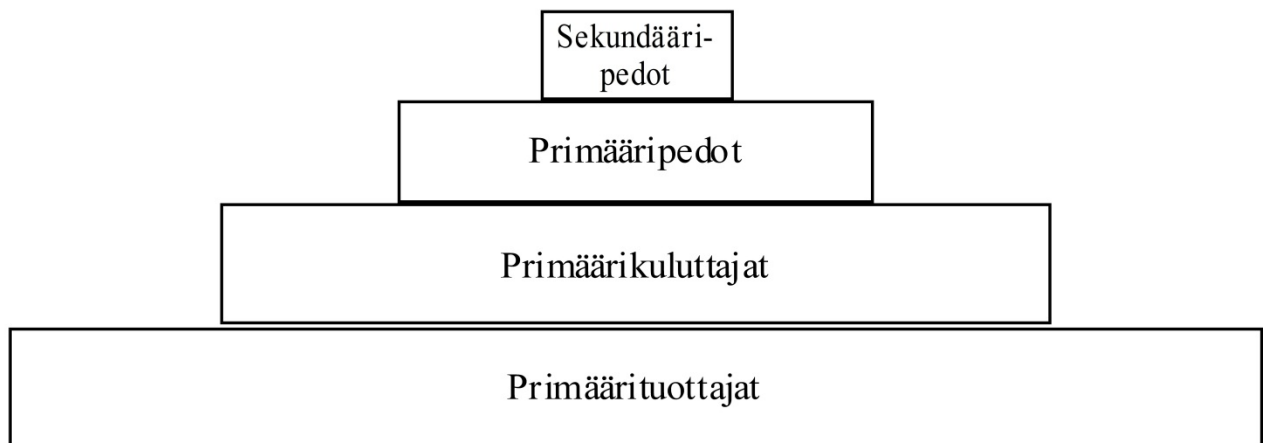
2423

Yhteisöissä ja ekosysteemeissä lähdetään yleisesti siitä, että ennen kemikaalin aiheuttamaa häiriötä systeemi on tasapainossa, johon se pyrkii palaamaan häiriön poistumisen jälkeen. Tasapainossa olevan systeemin ajatellaan olevan monimuotoinen, joten kaikkien voimakkaiden häiriöiden arvellaan pienentävän niin lajien monimuotoisuutta kuin lajien sisäistä geneettistä monimuotoisuutta. Tasapainossa olevan yhteisön bioottiset vuorovaikutukset ovat voimakat ja yhteisön toiminnan säätely on populaatioiden tiheydestä riippuvaa, mitä se ei ole jos yhteisö ei ole tasapainossa. Yhteisöjen tasapainoisuuden ja lajistollisen monimuotoisuuden suhteesta on kiistelty vuosikymmeniä. Lajirunsaudella on kuitenkin kiistaton merkitys esim. yhteisön palautumiskyvylle eli resilienssille tapahtuneiden häiriöiden jälkeen.

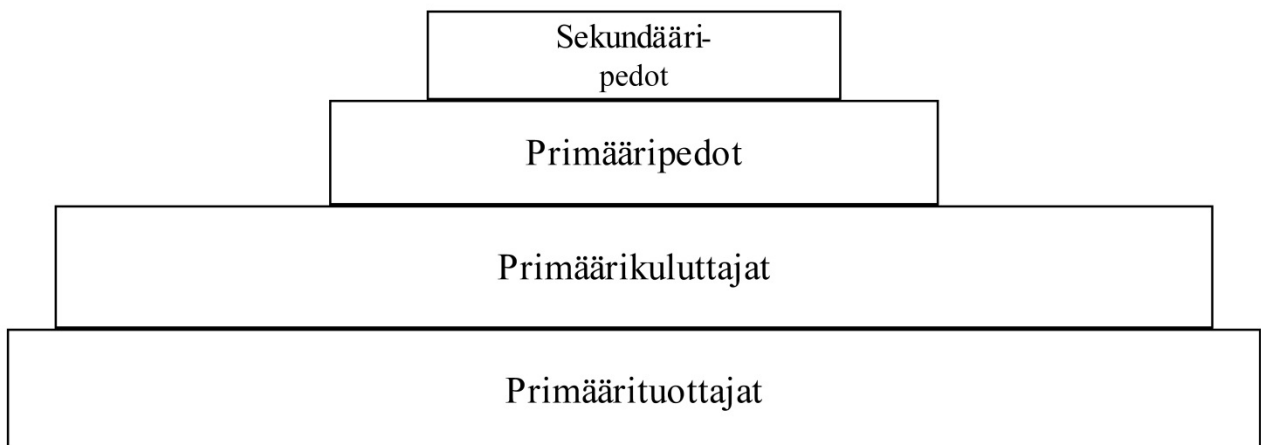
Kun halutaan tietää ympäristömuutoksien vaikutuksia yhteisöihin, selvitetään useimmiten ensimmäisenä yhteisön lajikoostumus ja eri ryhmien runsaussuhteet. Tämä edellyttää korkealaatuista systematiikan asiantuntemusta, mikä usein nykyopetuksessa unohdetaan. Biomonitoroinnissa voidaan käyttää erilaisia lajikoostumuksen indeksejä. Indeksien muutos vastaavan ympäristön normaalista arvosta osoittaa kemikalisoitumisen vaikutuksia. Useat indeksit edellyttävät täsmällistä lajimäärittystä mutta joihinkin riittää vähempi systemaattinen tarkkuus. Uutena mahdollisuutena selvittää eri eliöiden esiintymistä ja runsaussuhteita on DNA-tekniikka. Nykyisin on mahdollista osoittaa eri eliöiden geneettinen jalanjälki (barcoding), minkä ansiosta ympäristömuutoksien aiheuttamat eliöyhteisöjen muutokset pystytään osoittamaan myös huonosti eroteltavissa olevien eliöiden osalta. Joskus riittää, jos jonkun tai joidenkin diagnostisten lajien (esim. bioindikaattorit) runsauksien muutokset on selvitetty, jotta saadaan käsitys yhteisön kokemasta häiriöstä. Häiriötä voivat kuvata saastumiselle erittäin herkät lajit, joiden suhteellinen

2424 osuus yhteisöissä pienenee ympäristön pilaantuessa. Pilaantumista hyvin sietävien lajien osuudelle käy
 2425 päinvastoin. Usein lajit kannattaa yhdistää trofiatasoiksi, jolloin eri tasojen eliöiden runsaussuhteet
 2426 saattavat olla muuttuneet, vaikka yksittäisten lajien osalta ei tilastollisesti merkitseviä muutoksia
 2427 näkyisikään (Kuva 19). Ekotoksikologiassa lähdetään useimmiten siitä, että yhteisö/ekosysteemi on
 2428 tasapainossa, jolloin yhtenä mitattavana asiana voi olla palautuminen alkuperäiseen tilaan häiriön jälkeen.
 2429 Usein luonnonyhteisöt voivat kuitenkin palautua alkuperäisestä poikkeavaan tilaan, jolloin ei tietenkään
 2430 voida palautumiseen perustuvia mittauksia tehdä. Mitattavina muutoksina voivat myös olla yhteisön
 2431 tuottavuus (net primary productivity), kokonaishapenkulutus tai sisältämä energiamäärä. Näiden
 2432 selvittämisessä tulee toki ottaa huomioon, että suuret ja liikkuvat lajit eivät useinkaan ole mittauksissa
 2433 mukana. Näin ollen mittaukset korostavat kasvikunnan merkitystä ja niitä on helpompi tehdä vesi- kuin
 2434 maaekosysteemeistä.
 2435
 2436 Kuva 19. Ympäristön kemikalisoitumisen vaikutus trofiatasojen runsaussuhteisiin. A. Esimerkki trofiatasojen
 2437 suhteista puhtaassa ympäristössä. B. Esimerkki trofiatasojen suhteiden muutoksesta pilaantuneessa
 2438 ympäristössä.

A



B



2439
 2440 (Kuva 19)

2441 **17. Ekotoksikologian materiaali**

2442

2443 17.1. Alan tärkeimpiä julkaisusarjoja

2444 Ambio. Ruotsin Kuninkaallisen Tiedeakatemian julkaisema sarja, joka keskittyy ympäristön vaikutuksiin
2445 ihmiseen. Sarja julkaisee usein teemanumeroita.

2446 Aquatic Toxicology. Vesistötoksikologian johtava sarja.

2447 Archives of Environmental Contamination and Toxicology. Eräs ensimmäisistä alan julkaisusarjoista.

2448 Chemosphere. Keskittyy erityisesti ympäristön kemikalisoitumisen vaikutuksiin.

2449 Comparative Biochemistry and Physiology C: Toxicology and Pharmacology. Tarkastelee kemikaalien
2450 vaikutuksia eläimiin biokemialliselta ja fysiologiselta näkökannalta.

2451 Ecotoxicology. Joka toinen kuukausi ilmestyvä sarja, joka kattaa ekologian kentän monipuolisesti.

2452 Ecotoxicology and Environmental Safety. Monipuolinen sarja, jonka artikkeleiden taso vaihtelee kuitenkin
2453 suuresti.

2454 Environmental Pollution. Erityisen vahva ympäristöön joutuneiden saasteiden kuvaamisessa.

2455 Environmental Science and Technology. Ympäristötekniikan ja –toksikologian siteeratuin sarja. Erityisenä
2456 piirteenä ympäristötekniikan painotus.

2457 Environmental Toxicology and Chemistry. SETACin (Society for Environmental Toxicology and Chemistry)
2458 julkaisusarja, joka kattaa ympäristön kokonaisuudessaan.

2459 Environment International. Pääasiassa ihmisen elinympäristön muutoksien arvioimiseen keskittyvä lehti.

2460 The Science of Total Environment. Käsittää kemikaalivaikutusten lisäksi myös muita ympäristöongelmia.

2461

2462 17.2. Kirjaesimerkkejä

2463 The Toxicology of Fishes (Di Giulio RT & Hinton D, toim.), CRC Press 2008, 1096 s. Yksityiskohtainen teksti
2464 ympäristömyrkköjen vaikutuksista kaloihin, erityisesti niiden biokemiaan ja fysiologiaan.

2465 Ecotoxicology – A Comprehensive Treatment (Newman MC & Clements WH), CRC Press 2007, 880 s.

2466 Kattava teos ekotoksikologian koko kentästä.

2467 Fundamentals of Ecotoxicology, 4. painos (Newman MC), CRC Press 2014, 680 s. Tiivistetty versio
2468 ylläolevasta. Molemmat kirjat ovat erityisen hyviä ekotoksikologian mallien rakentelussa.

2469 Introduction to Aquatic Toxicology (Nikinmaa M9, Elsevier 2014, 262 s. Tiivis mutta perusteellinen
2470 kokonaisuus vesiympäristöjen toksikologiasta.

2471 Environmental Toxicology: Biological and Health Effects of Pollutants, 3. painos (Yu M-H, Tsunoda H &
2472 Tsunoda M), CRC Press 2011, 397 s. Perusoppikirja ympäristötoksikologiasta. Teos keskittyy jossain määrin
2473 ihmiseen kohdistuviin ympäristömuutoksiin.

2474 Principles of Ecotoxicology, 4. painos (Walker CH, Sibly RM, Hopkin SP & Peakall DB), CRC Press 2012, 386 s.
2475 Tuore ja hyvä ekotoksikologian yleisoppikirja. Erityisenä ansiona kirjoittajien mainio perehtyneisyys
2476 lintutoksikologiaan.

2477 Chemistry of the Environment, 3. painos (Spiro T, Purvis-Roberts K & Stigliani WM), University Science
2478 Books 2011, 550 s. Hyvin kirjoitettu ympäristökemian yleisoppikirja. Tekstin luettuaan lukija ymmärtää sekä
2479 sen, mitkä kemikaalit ympäristössä vaikuttavat että sen, miten ne kulkeutuvat ja muuntuvat.

2480 Ecotoxicology (Jorgensen E, toim.), Elsevier-Academic Press 2010, 402 s. Kohtuullisen tuore alan perusteos.

2481 Impacts of point polluters on terrestrial biota. (Kozlov M, Zvereva EL & Zverev V) Springer, 2009, 466 s.

2482 Maaeliöyhteisöjen ja ekosysteemien ekotoksikologiaan keskittyvä teos. Erityisinä ansioina Suomen ja
2483 lähialueiden yksityiskohtainen tuntemus ja kasvien, varsinkin puiden, ekotoksikologian käsittely.

2484 Environmental Contaminants in Biota. Interpreting Tissue Concentrations. 2. painos (Beyer WN & Meador JP
 2485 toim.) CRC Press , 2011 751 s. Tärkeimpien ympäristön pilaantumista aiheuttavien kemikaalien
 2486 levinneisyyden ja vaikutusten kuvaus.

2487
 2488

2489 17.3. Ekotoksikologiassa yleisesti käytettyjä termejä. Tämän listan lisäksi suuri joukko termejä on kuvattu ja
 2490 määritelty yksityiskohtaisesti aiemmassa tekstissä.

2491 AhR (Aryl Hydrocarbon Receptor); transkriptiotekijä, johon aromaattiset hiilivedyt, mm. dioksiini ja PCB:t
 2492 sitoutuvat. Sitoutuminen käynnistää ksenobiooteista riippuvan geeni-induktion.

2493 Antagonismi; kemikaalit vaikuttavat toistensa myrkyllisyyttä vähentävästi.

2494 BAF (bioaccumulation factor); kuvaa aineen kertymistä ravinnosta. BAF=aineen pitoisuus eliössä/aineen
 2495 pitoisuus ravinnossa

2496 BCF (bioconcentration factor); arvo, joka kuvaa aineen kertymistä ympäristöstä. Mitä suurempi lukuarvo
 2497 on, sitä paremmin aine kertyy. BCF=aineen pitoisuus eliössä/aineen pitoisuus ympäristössä.

2498 Biomonitorointi; ympäristökemikaalien vaikutusten arviointi bioindikaattoreita käyttäen.

2499 Biotransformaatio; orgaanisten kemikaalien entsyymaattinen muuntaminen.

2500 BOD (biological oxygen demand); biologinen hapenkulutus. Erityisen paljon käytetty termi, kun on mitattu
 2501 mikro-organismien aiheuttamaa hapenkulutusta vedessä.

2502 COD (chemical oxygen demand); kemiallinen hapenkulutus. Käytetty erityisesti, kun on selvitetty, kuinka
 2503 paljon happea kuluu vedessä olevien aineiden täydelliseen oksidaatioon.

2504 Comet assay; Yksittäisten solujen (yleensä alkalinen) elektroforeesi, jonka tulokset kuvaavat solujen DNA:n
 2505 vaurioita.

2506 DNA addukti; ympäristömyrky sitoutuu erityisesti DNA:n sytosiini- ja guaniinitähteisiin ja muodostaa
 2507 adduktin.

2508 EC/ED (effective concentration/dose); vaikuttava pitoisuus/määrä. Jos toksikologiassa mitattava suure on
 2509 muuta kuin kuolleisuus käytetään EC/ED arvoja.

2510 Eutrofikaatio (eutrophication); rehevöityminen

2511 Fugasiteetti (fugacity); kuvaa aineen pyrkimystä ”paeta” sen hetkisestä olomuodostaan.

2512 Imposex; termiä on yleensä käytetty, kun nilviäisnaaraille (Psodobranch) on kehittynyt penis. Ilmiön
 2513 aiheuttajista parhaiten tunnettu on tributyylitina (TBT)

2514 K_{ow} ; oktanoli-vesi jakautumiskerroin – kuvaa aineen rasvaliukoisuutta. Mitä suurempi lukuarvo on, sitä
 2515 rasvaliukoisempi aine on. Aineen rasvaliukoisuus vaikuttaa sekä sen saantitapaan että kertymiseen eliöissä.

2516 Pelkistetysti voi sanoa, että rasvaliukoiset aineet saadaan ravinnosta ja ne voivat kertyä eliöihin.

2517 Ksenobiootti (Xenobiotic compound); ympäristölle vieras kemikaali

2518 xLCy (LC=lethal concentration, tappava pitoisuus; x on aika, jolloin tappava pitoisuus on määritetty (yleensä
 2519 tunneissa, joskus päivissä) ja y on kuolleisuusprosentti, 50 % on yleisimmin käytössä, mutta joskus
 2520 käytetään 20 tai 10 %.

2521 LD (lethal dose) pitoisuuden (concentration) ja määrän (dose) erona on se, että ensimmäinen osoittaa
 2522 ympäristön kemikaalipitoisuuden ja jälkimmäinen eliön saaman kemikaalimäärän. Nämä kaksi eivät ole
 2523 synonyymejä johtuen esimerkiksi siitä, että kulkeutuminen eliöön, sitoutuminen eliön eri kudoksiin ja erityis
 2524 vaikuttavat kemikaalimäärään eliössä, mikä voi vaihdella suurestikin eri kemikaalien ja eliöiden välillä
 2525 samassa ympäristöpitoisuudessa.

2526 LOEC (Lowest observed effect concentration); alhaisin mitattu kemikaalipitoisuus, joka vaikuttaa kohde-
 2527 eliöistä mitattaviin suureisiin.

2528 Mikronukleustesti; Testissä tarkastellaan mikronukleusten (päätumasta irrallinen pieni tuma, koko
 2529 korkeintaan 1/3 päätumasta) esiintymisen yleisyyttä soluissa. Kuvaa kromosomiston vaurioita.
 2530 NOEC (=No Effect Concentration); korkein mitattu kemikaalipitoisuus, joka ei aiheuta muutoksia kohde-
 2531 eliöstä mitattavissa suureissa
 2532 QSAR (quantitative structure-activity relationship); kvantitatiivinen rakenne-aktiivisuussuhde – kemikaalin
 2533 vaikutuksen riippuvuus sen rakenteesta.
 2534 PEC (predicted environmental concentration); kemikaalin arvioitu ympäristöpitoisuus.
 2535 PNEC (predicted no effect concentration); pitoisuus, jonka ei arvioida aiheuttavan haittaa.
 2536 Potentiaatio (potentiation); kemikaalien toksisuus niiden esiintyessä yhdessä on suurempi kuin myrkköjen
 2537 esiintyessä yksin.
 2538 Probiittianalyysi (probit analysis). Yleisimmin käytössä oleva laskentamenetelmä LC ja EC-arvojen
 2539 laskemiseksi.
 2540 RQ (Risk Quotient); riskisuhde, $RQ = PEC/PNEC$. Mitä suurempi suhde on, sitä haitallisempi voi kemikaalin
 2541 arvioida olevan.
 2542 Selektiivinen toksisuus. Kuvaa myrkyllisyyden eroja lajien, kehitysvaiheiden, sukupuolen tms. välillä.
 2543 Synergismi; on potentiaation synonyymi.
 2544 TBARS; oksidatiivista stressiä kuvaava suure. Kuvaa lipidien peroksidaatiota.
 2545 TEF (Toxic Equivalence Factor); Aineen suhteellinen myrkyllisyys referenssiyhdisteeseen verrattuna. TEFiä
 2546 käytetään erityisen paljon arvioitaessa eri PCB-yhdisteiden (joita on kaikkiaan n. 200) myrkyllisyyttä
 2547 dioksiiniin verrattuna.
 2548 Toksikokinetiikka (toxicokinetics); selvittää aineen kulkeutumista, sisäänottoa, muuntumista ja erityistä.
 2549 Toksisuusekvivalenssi (toxic equivalence); Kuvaa aineen suhteellista myrkyllisyyttä referenssimyrkkyyn
 2550 verrattuna.
 2551