



Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 44/2024

Ekotoksisuus elinkaariarvioinnissa

Elintarvikkeiden ja ruokajärjestelmän
elinkaariarviointimetodologian kehittäminen ja harmonisointi
-hanke

Kati Räsänen



Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 44/2024

Ekotoksisuus elinkaariarvioinnissa

Elintarvikkeiden ja ruokajärjestelmän
elinkaariarviointimetodologian kehittäminen ja harmonisointi
-hanke

Kati Räsänen

Viittausohje:

Räsänen, K. 2024. Ekotoksisuus elinkaariarvioinnissa: Elintarvikkeiden ja ruokajärjestelmän elinkaariarviointimetodologian kehittäminen ja harmonisointi -hanke. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 44/2024. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 29 s.

Kati Räsänen ORCID ID, <https://orcid.org/0000-0002-0144-3394>



ISBN 978-952-380-919-2 (Verkkójulkaisu)

ISSN 2342-7639 (Verkkójulkaisu)

URN <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-919-2>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Kati Räsänen

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2024

Julkaisuvuosi: 2024

Kannen kuvat: Luken kuvapankki (hyönteiskuva Olli Leino, ilmakuva Erkki Oksanen).

Tiivistelmä

Kati Räsänen

Luonnonvarakeskus (Luke), Survontie 9, 40500 Jyväskylä

Ekotoksisuus kuvaa myrkyllisten aineiden vaikutuksia ympäristöön. Sitä arvioitaessa tarkastellaan aineiden kulkeutumista ja jäämiä ympäristössä (eliöt, maaperä, vesistö, ilma) ja niiden vaikutuksia sen eliöstöön. Elinkaariarviointi (LCA, Life Cycle Assessment) -menetelmällä mitataan ja tunnistetaan tuotteen tai palvelun elinkaarenaikaiset ympäristövaikutukset. Elinkaariarvioinnin ekotoksinen vaikutusluokka kuvaa tuotteiden ekotoksisia vaikutuksia, jotka aiheutuvat ympäristölle tuoteketjuissa käytetyistä kemikaaleista. Se mahdollistaa eri tuotteiden välisen vertailun ja myös kemikaalien vaikutusten vertailun suhteessa toisiinsa. Menetelmä yhdistää elinkaariarvioinnin (LCA) ja riskiarvioinnin. Tunnistamalla ja tiedostamalla kemikaalien vaikutuksia tuoteketjuissa voidaan pyrkiä vähentämään aineiden haitallisia vaikutuksia vähentämällä kemikaalien määrää tai vaihtamalla niitä vähemmän haitallisiin vaihtoehtoihin.

Tämä kirjallisuuskatsaus sisältää perustietoa ekotoksisesta ympäristövaikutusluokasta elinkaariarvioinnissa (LCA, Life Cycle Assessment). Kemikaaleista esimerkkeinä käytetään kasvinsuojeluaineita. Katsauksessa esitetään myös joitakin ekotoksisten vaikutusarvioinnin menetelmiä.

Asiasanat: haitta-aine, ekotoksinen ympäristövaikutusluokka, elinkaariarviointi, kasvinsuojeluaine, kemikaali, LCA, torjunta-aine

Sisällys

1. Yleistä	5
1.1. Ympäristön kemikalisoituminen.....	5
1.2. Ekotoksikologia	5
1.3. Riskiarviointi.....	5
1.4. Elinkaariarviointi.....	7
2. Inventaarionalyysi (LCI, life cycle inventory).....	8
2.1. Päästöt.....	8
2.2. Tietolähteet.....	8
2.3. Esimerkkejä	8
2.3.1. Kasvinsuojeluaineet.....	8
2.3.2. Kasvinsuojeluaineiden päästöjen mallinnus LCA:ssa	10
2.3.3. Kasvinsuojeluaineiden päästöjen mallinnus PestLCI:llä	10
3. Vaikutusten arviointi (LCIA, life cycle impact assessment).....	12
3.1. Ekotoksinen ympäristövaikutusluokka elinkaariarvioinnissa	12
3.2. Ekotoksiset vaikutukset kohdistuvat luonnonympäristöön.....	13
3.3. Laskennan perusteet	13
3.4. Menetelmät.....	15
3.4.1. USEtox®	15
3.4.2. LC-IMPACT.....	18
3.4.3. IMPACT World+	19
3.4.4. Recipe 2016.....	21
3.4.5. ProScale	22
Viitteet.....	25

1. Yleistä

1.1. Ympäristön kemikalisoituminen

Kemikaalit aiheuttavat ympäristön kemikalisoitumista, joka on yksi maailmanlaajuisista kriittisistä ympäristöongelmista. Ympäristön kemikalisoitumisen raja-arvoja ei voida nykytiedon mukaan vielä määritellä. Tietoa on vain yksittäisten kemikaalien vaikutuksista, mutta niiden yhteisvaikutuksista ei käytännössä ole riittävästi tietoa. Kemikalisoitumista havaitaan paikallisella ja alueellisella tasolla, mutta myös maailmanlaajuisesti. Kemikalisoituminen vaikuttaa kaikkialla maailmassa ihmisiin ja muihin organismeihin ja siten väestörakenteen kehitykseen sekä lopullisesti ekosysteemin toimintaan ja rakenteeseen (Rockström ym. 2009). Ympäristön kemikalisoitumisella on vaikutuksia myös biologisen monimuotoisuuden vähenemiseen ja ekosysteemien terveyteen (esim. Sigmund ym. 2023).

1.2. Ekotoksikologia

Ekotoksikologia on tieteenala, joka tutkii myrkyllisten aineiden vaikutuksia populaatioihin ekosysteemeissä (Klaassen 2007). Myrkyllisiä aineita voivat olla esim. kemikaalit, kuten kemialliset kasvinsuojeluaineet. Suomen vanhassa Kemikaalilaissa (744/1989) kemikaali määritellään alkuaineeksi tai alkuaineiden kemiallisiksi yhdisteiksi sellaisina kuin ne esiintyvät luonnossa tai teollisesti tuotettuina (aineet) sekä kahden tai useamman aineen seoksia (valmisteet).

Ekotoksikologiassa huomioidaan aineen joutuminen ympäristöön (kulkeutuminen, muuntuminen, kertyminen), sen mahdollinen biosaatavuus ja lopulta vaikutukset eliöissä (Klaassen 2007). Ekotoksiset vaikutukset eliöissä voivat aiheutua akuutista (lyhyellä aikavälillä), subkroonisesti tai kroonisesti (pitkällä aikavälillä). Vaikutukset voivat ilmetä yksilöissä, populaatioissa (=joukko yksilöitä, jotka kuuluvat samaan lajiin ja elävät samalla alueella samanaikaisesti) tai koko eliöyhteisössä (=joukko eri lajien muodostamia populaatioita, jotka elävät samalla alueella samanaikaisesti).

1.3. Riskiarviointi

Riskiarvioinnissa arvioidaan haitta-aineiden riskejä, mikä sisältää vaaran ja altistumisen arvioinnin (Klaassen 2007). Haitta-aine voi olla mitä tahansa, joka voi aiheuttaa vaaroja tai vahinkoja ihmisille tai ympäristölle. Vaara voi olla mikä tahansa tekijä, kuten kemikaali, joka aiheuttaa haittaa. Vaikutukset riippuvat kemikaalin luonteesta, määrästä ja altistumisajasta sekä altistuneesta eliöstä sekä sen ympäristöstä. Kemikaali voi vaikuttaa lisääntymiseen, syövyttää, ärsyttää ihoa, aiheuttaa syöpää tai tappaa (esim. vesieliökuolemat).

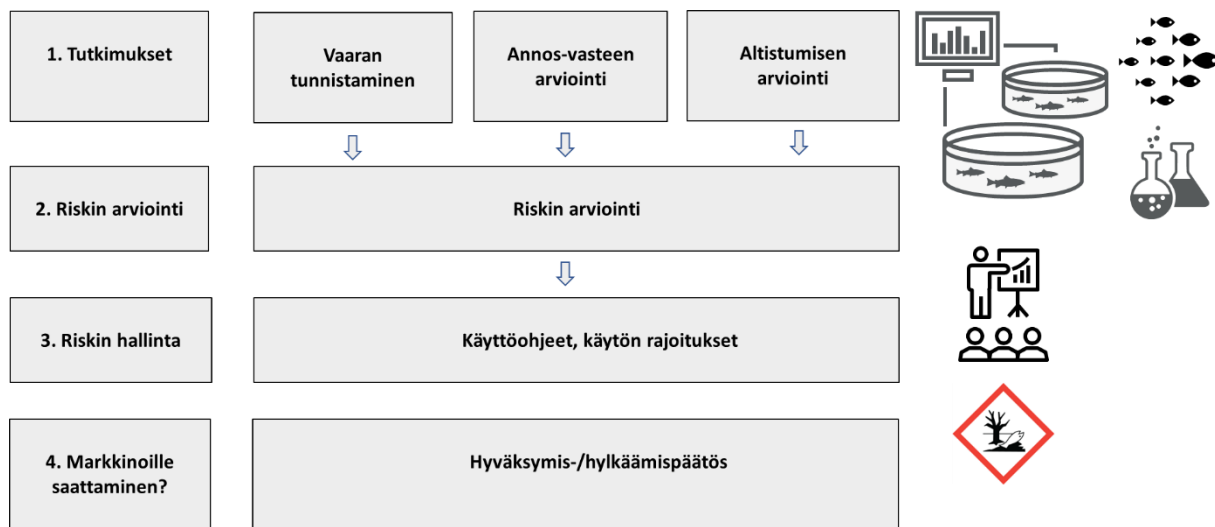
Eliöt voivat altistua kemikaalille esim. ihon, hengityksen tai ruuan kautta. Kemikaalit voivat joutua ympäristöön (esim. vesistö, maaperä, ilma ja niiden eliöt) esim. jätevesien kautta, teollisuuden päästöinä tai maatalouskäytön seurauksena (esim. kemialliset kasvinsuojeluaineet). Ympäristön altistumista arvioidaan mittaamalla kemikaalien jäämiä ympäristöstä (esim. torjunta-ainejäämien mittaukset vesistöistä ja maaperästä) tai mallintamalla kemikaalien pitoisuuksia matemaattisesti. Kemikaalien ominaisuuksia tutkittaessa voidaan tehdä *in vitro*- eli

soluviljelykokeita, *in vivo*- eli eläinkokeita, tietokonemallinnuksia tai epidemiologisia tutkimuksia (Klaassen 2007).

Riski tarkoittaa haitan todennäköisyyttä, joka perustuu vaarallisen aineen altistukseen ja tehoon (Klaassen 2007). Riski riippuu sekä vaaran luonteesta että altistumisesta. **Riskiarviointi** arvioidaan, millaisen riskin kemikaali aiheuttaa ympäristön eliöille tai ihmiselle tunnetulla altistumispuiteolosuhteella. Lisäksi arvioidaan riskin vakavuutta, missä punnitaan vaaran ja altistumisen suhdetta.

Riskihallinta on prosessi, jossa punnitaan toimenpiteitä riskin hallitsemiseksi (Klaassen 2007). Jos riski on liian suuri, ryhdytään toimenpiteisiin riskin vähentämiseksi. Riskinhallintatoimenpiteitä voivat olla esim. kemikaalin käytön rajoitukset ja suojaimet kemikaalien käytössä sekä kemikaalien oikeat pakkaukset.

EU:ssa kaikki markkinoille saatetut kemikaalit ovat käyneet läpi lainsäädännön mukaiset tutkimukset ja niiden vaarat (terveys-, ympäristö- ja fysikaaliset vaarat) on tunnistettu REACH- (EC 2006) ja CLP (EC 2008) -asetusten mukaisesti. Kemikaaleista poikkeuksena ovat kasvisuojeluaineet, joiden markkinoille saattaminen on edellistä tiukempaa. Ne luokitellaan CLP-asetuksen mukaisesti, mutta tehoaineiden hyväksymisessä noudatetaan EU:n kasvisuojeluaineasetusta (1107/2009: EC 2009). Tehoaineiden riskit arvioidaan Euroopan elintarviketurvallisuusvirastossa (EFSA) ja hyväksytään komissiossa. Kasvisuojeluainevalmisteet hyväksytään maittain, esim. Suomessa tämän tekee Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes). Kuvassa 1 on kuvattu EU:n viranomaisten tekemä riskiarviointiprosessi.



Kuva 1. Riskiarviointi ja -hallintaprosessi kemikaaleille yksinkertaisesti kuvattuna. Alin kuva oikealla: Aquatic-pollut-red, GHS pictograms©, 2024. The United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). Reprinted with the permission of the United Nations. <https://unece.org/transport/dangerous-goods/ghs-pictograms>.

1.4. Elinkaariarviointi

Elinkaariarviointi (LCA, Life Cycle Assessment) on menetelmällinen viitekehys tuotteen elinkaarenaikaisten ympäristövaikutusten tunnistamiseksi ja arvioimiseksi perustuen kansainvälisiin standardeihin ISO 14040 ja ISO 14044. Tässä yhteydessä tuotteen elinkaari tarkoittaa tuotteen tuotanto- ja kulutusketjua sisältäen kaikki keskeiset vaiheet tuotantopanosten tuotannosta tuotteen käyttöön ja jätteiden käsittelyyn saakka. Elinkaariarviointi mahdollistaa eri tuotteiden välisen vertailun ja sen avulla voidaan tunnistaa tuotantoketjun kriittisiä pisteitä (hotspots), joita muuttamalla tuotantoketjua voidaan kehittää entistä kestävämpään suuntaan.

Elinkaariarviointi jaetaan neljään vaiheeseen: Tutkimuksen tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely, inventaarionalyysi (LCI, life cycle inventory), vaikutusten arviointi (LCIA, life cycle impact assessment) ja elinkaaritietojen tulkinta ja raportointi. Inventaarioanalyysissä huomioidaan tuotteen kaikki toimitusketjuun liittyvät materiaali-, energia- ja jätesyötteet ja tuotokset sekä päästöt ilmaan, veteen ja maaperään. Siinä on luokiteltava perusvirrat ja muut kuin perusvirrat (tai kokonaisvirrat) (esim. tuote- tai jätevirrat). Elinkaari-inventaarion jälkeen tehdään vaikutusten arviointi käyttämällä valittuja vaikutusluokkia ja -malleja. Vaikutusarviointi sisältää neljä vaihetta: luokittelu, karakterisointi, normalisointi ja painotus (EC 2021).

Elinkaariarvioinnissa ympäristövaikutuksia arvioidaan ympäristövaikutusluokkakohtaisilla menetelmillä. Tämä kirjallisuuskatsaus keskittyy elinkaariarvioinnin ekotoksiseen vaikutusluokkaan ja siihen liittyviin päästöihin, esimerkkinä kasvinsuojeluaineet.

2. Inventaarionalyysi (LCI, life cycle inventory)

2.1. Päästöt

Kemikaalien käyttö aiheuttaa päästöjä, joiden määrät elinkaariarvioinnissa mallinnetaan osana inventaarionalyysiä. Kemikaalit kulkeutuvat usein myös käyttöpaikkansa ulkopuolelle ilmaan, vesistöihin, maaperään sekä niiden eliöihin, joissa ne voivat aiheuttaa haittaa. Tällöin puhutaan ekotoksista vaikutuksista. Kun kemikaalin haitta aiheutuu ihmisille, puhutaan toksisista vaikutuksista.

2.2. Tietolähteet

Jotta kemikaalien vaikutukset voidaan arvioida, tulee niiden ominaisuudet ja käyttömäärät olla selvillä. EU:n markkinoilla olevien kemikaalien ominaisuudet tunnetaan. Aineiden ominaisuuksien tietokantoja löytyy esimerkiksi seuraavista lähteistä (mm. Saouter ym. 2020):

Euroopan kemikaaliviraston ja OECD:n yhteistyönä tuottama tietokanta (IUCLID):

<https://iuclid6.echa.europa.eu/fi/home>

Euroopan elintarviketurvallisuusviraston (EFSA) tietokanta (OpenFoodTox):

<https://www.efsa.europa.eu/en/discover/infographics/openfoodtox-chemical-hazards-database>

Hertfordshiren yliopiston ylläpitämän tietokannan kasvinsuojeluaineista (PPDB): <https://stem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/>

Yhdysvaltain ympäristönsuojeluviraston ylläpitämä tietokanta:

<https://comptox.epa.gov/dashboard/>

Kemikaalien käyttömäärien selvittäminen on tapauskohtaista. Kasvinsuojeluaineiden käyttö-tietoja löytyy mm. viranomaisten ylläpitämistä tietokannoista, esim.

EU:n alueella: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/aei_pestuse/default/table?lang=en

Suomessa: <https://www.luke.fi/fi/tilastot/kasvinsuojeluaineiden-kaytto-maataloudessa>

2.3. Esimerkkejä

2.3.1. Kasvinsuojeluaineet

Torjunta-aineella tarkoitetaan mitä tahansa kemiallista tai biologista ainetta tai aineiden seosta, joka on tarkoitettu karkottamaan, tuhoamaan tai hallitsemaan tuholaisia tai säätelemään kasvien kasvua (FAO 2014). Torjunta-aineet ovat kasvinsuojeluaineita ja biosidejä (2009/128/EY). Kasvinsuojeluaineita käytetään suojelemaan kasveja ja kasvituotteita kasvintuhoajilta maa-, metsä- ja puutarhataloudessa (Tukes 2021).

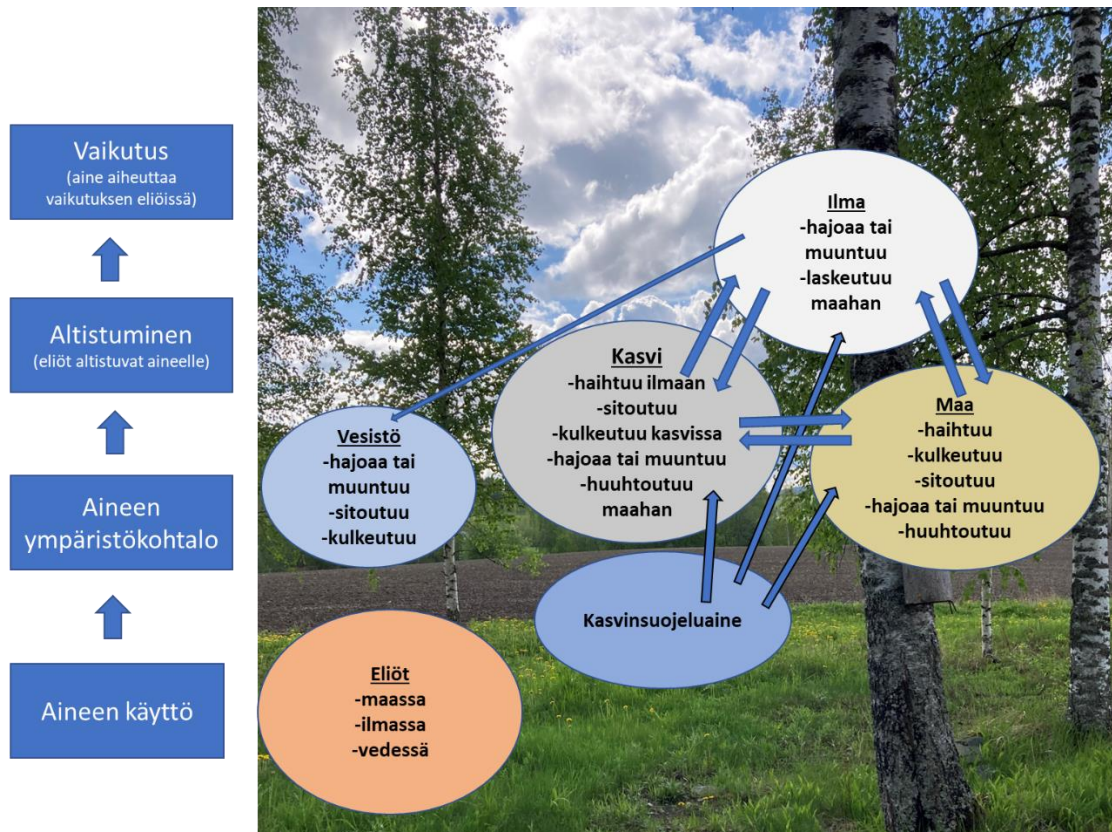
Kasvinsuojeluaineiden haitat

Kasvinsuojeluaineita voi päätyä käyttökohteensa ulkopuolella vesistöihin, maaperään ja ilmaan sekä niiden eliöihin sekä aiheuttaa eliöissä ja ihmisissä haitallisia vaikutuksia (Kuva 2). Ne myös epäsuorasti vaikuttavat muihin ympäristöongelmiin kuten biodiversiteetin väheneemiseen (IPBES 2019). Kemikaalit, kuten kasvinsuojeluaineet, aiheuttavat ympäristön kemikaalisoitumista (esim. Rockström ym. 2009, Sigmund ym. 2023).

Kasvinsuojeluaineiden jako

Kasvinsuojeluainevalmisteiden sisältämät tehoaineet (esim. Round up-valmiste sisältää glyfosaatti-tehoainetta) voidaan jakaa monella tavalla:

- Kohde-eliön mukaan (rikkakasvien torjunta-aineet (herbisidit), kasvitautien torjunta-aineet (fungisidit), tuhoeläinten torjunta-aineet (insektisidit), kasvunsäätteet) (esim. rikkakasvien torjunta-aine)
- Kemiallisen rakenteen mukaan (esim. fosfonoglysiini)
- Toimintatapansa mukaan (=MoA-ryhmittely, Mode of action, esim. EPSPS-entsyymisysteemin inhibiittori; FRAC 2024; HRAC 2024; IRAC 2024) (esim. fosfonoglysiini)
- Peruskemikaalityyppiin (esim. synteettinen orgaaninen kemikaali)



Kuva 2. Kemiallisten kasvinsuojeluaineiden kohtalo ja vaikutukset ympäristössä.
Kuva Kati Räsänen, Luke.

2.3.2. Kasvinsuojeluaineiden päästöjen mallinnus LCA:ssa

EU:n ohjeistuksen mukaan torjunta-ainepäästöt on mallinnettava tehoaineina. Lisäksi mallinuksissa on käytettävä viljelykasvi- ja maa-, alue- ja ilmastokohtaisia tietoja hehtaaria kohti vuodessa, mikäli tällaisia tietoja on saatavilla (EC 2021).

Kasvinsuojeluaineiden päästöt vaihtelevat sekä suuruudeltaan että jakautumiselta eri ympäristön osissa riippuen aineen ominaisuuksista, sääolosuhteista ja maaperästä (ennen käyttöä, käytön aikana ja käytön jälkeen), maaperäolosuhteista, kasvin ominaisuuksista ja käytetäänkö kastelua ja miten kastelua käytetään (Rosenbaum ym. 2015). Kasvinsuojeluaineiden päästöt olisi hyvä mallintaa (LCI:ssa) ennen yhdistämistä karakterisointikertoimiin (Rosenbaum ym. 2015). EU:n ohjeistuksen mukaan (EC, 2021) pellolle levitettävät torjunta-aineet on oletusarvoisesti mallinnettava siten, että niistä päätyy 90 % maatalousmaahan, 9 % ilmaan ja 1 % veteen. Tarkempia tietoja voidaan käyttää, jos niitä on saatavilla. Rosenbaum ym. (2015) ja Fantke (2019) julkaisuista löytyy ohjeistusta kasvinsuojeluaineiden päästöjen mallintamiseen.

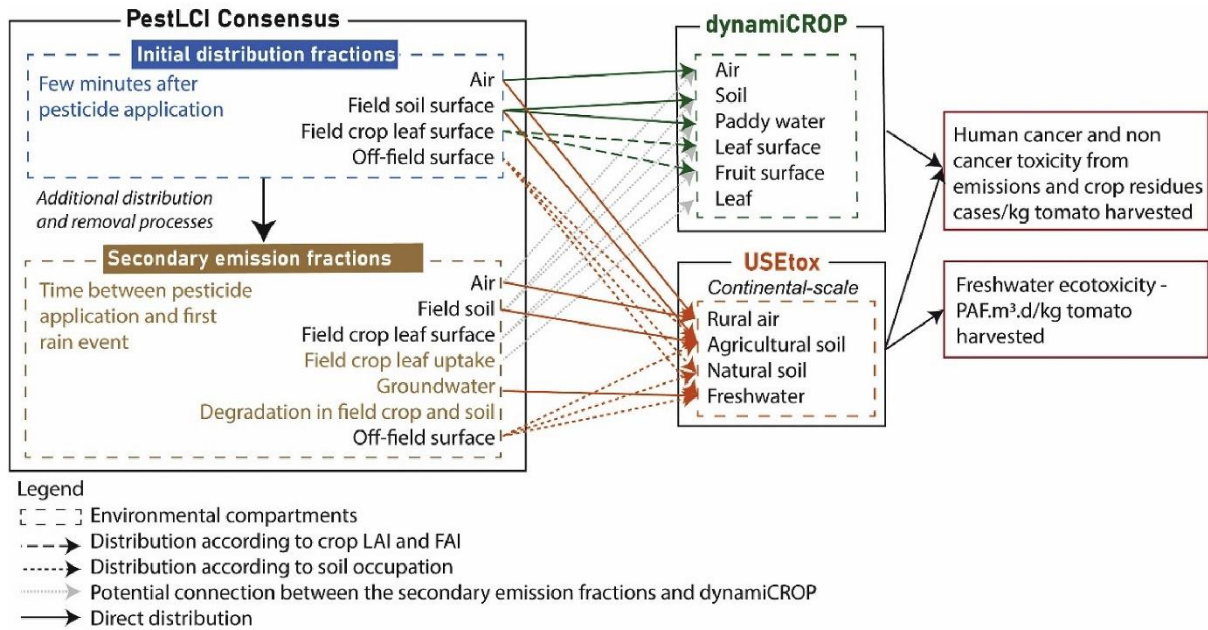
2.3.3. Kasvinsuojeluaineiden päästöjen mallinnus PestLCI:llä

PestLCI (PesLCI 2.0) on malli, jolla voi arvioida avomaapelloilla käytettyjen kasvinsuojeluaineiden päästöjä elinkaari-inventaariossa (LCI) (Dijkman ym. 2012). PestLCI 2.0 on tällä hetkellä yksi edistyneimmistä malleista arvioida maatalouden torjunta-aineiden päästöjä LCA:ssa (Fantke 2019: Taulukko 2). Lisäksi sitä suositeltiin maailmanlaajuisessa konsensustyöpajasarjassa arvokkaana lähtökohtana yhdistää erilaisia maatalouden torjunta-aineiden ympäristöpäästöjä ekotoksiseksi vaikutukseksi elinkaariarvioinnin vaikutusten arviointi -vaiheessa (LCIA) karakterisointikertoimien avulla (Rosenbaum ym. 2015).

Malli soveltuu eurooppalaisiin olosuhteisiin. PestLCI sisältää parametreja mm. maaperästä (Euroopassa), ilmastosta (Euroopasta), kasvista ja sen kasvuasteesta, ruiskutustavasta ja -ajankohdasta. Sen avulla mallinetaan päästöjä ilmaan (air), pellon maaperää (field soil surface), pellon kasvustoon (field crop leaf surfaces) ja pellon ulkopuolelle (off-field surfaces). Uusin versio mallista (PestLCI Consensus V.1.0, Fantke ym. 2017a) löytyy verkosta:

<https://pestlciweb.man.dtu.dk/>

PestLCI:ssä tulisi käyttää tällä hetkellä vain 'Initial distribution fraction'-kertoimia (Gentil ym. 2020). PestLCI:ssä tuotetut päästökertoimet (Air, Field soil surface, Field crop leaf surfaces, Off-field surfaces, eli päästöt Ilmaan, Peltomaan pinnalle, Peltokasvien lehtien pinnoille, Pellon ulkopuolisille pinnoille) yhdistetään USEtox[®]:n karakterisointikertoimiin (Air, Agricultural soil, Natural soil, Freshwater, eli päästökertoimet Ilmaan, Maatalouden maaperään, Luonnolliseen maaperään, Makeaan veteen). Kuvassa 3 on esitetty, miten PestLCI tulokset yhdistetään USEtox[®]:n.

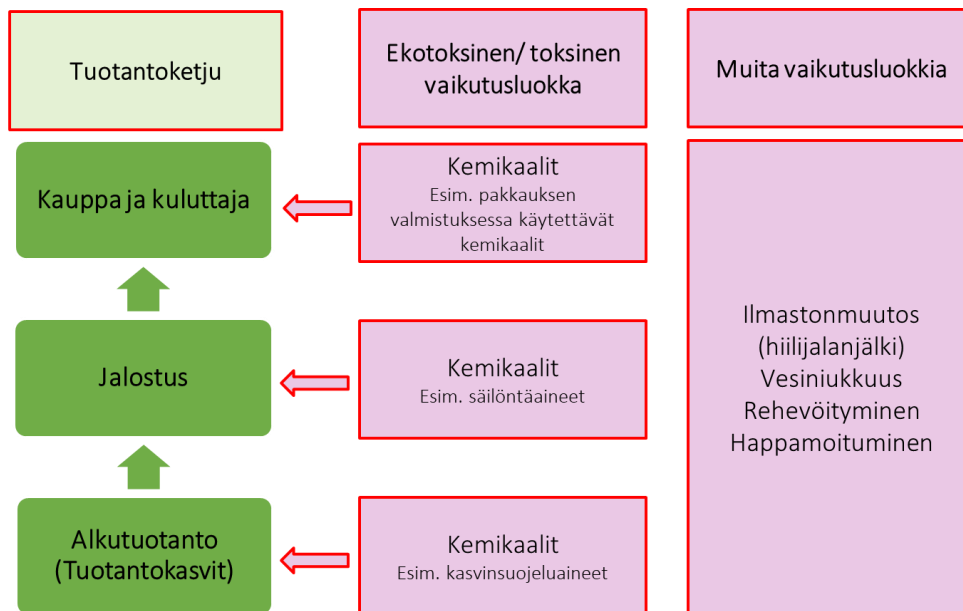


Kuva 3. Gentil ym. (2020) julkaistussa kuvassa ja mukautettu Fantkesta (2019) PestLCI:n päästökerrointen yhdistäminen USEtox[®]:in karakterisointikertoimiin korjattua satoa (kg) ja käytettyä torjunta-ainemassaa kohti.

3. Vaikutusten arviointi (LCIA, life cycle impact assessment)

3.1. Ekotoksinen ympäristövaikutusluokka elinkaariarvioinnissa

Elinkaariarvioinnissa ekotoksinen ympäristövaikutusluokka ilmaisee kemikaalien vaikutuksia ympäristöön. EU:n suosituksen (EC 2021) mukaan siinä tarkastellaan ekosysteemiin kohdistuvia myrkyllisiä vaikutuksia, jotka vahingoittavat yksittäisiä lajeja ja muuttavat ekosysteemin rakennetta ja toimintaa. Ekotoksisuus on seurausta useista eri toksikologisista mekanismeista, joita vaikuttavien aineiden päästöt aiheuttavat ekosysteemin terveyteen (EC 2021). Menetelmää voi käyttää tunnistamaan kemikaalien vaikutuksia läpi tuoteketjujen (esim. Kuva 4). Saatavaa tietoa voidaan käyttää aineiden haitallisten vaikutusten vähentämisessä, esim. vähentämällä kemikaalien määrää tai vaihtamalla niitä vähemmän haitallisiin.



Kuva 4. Esimerkkikuva, jossa kuvataan kemikaalien käyttöä ruokaketjussa esimerkein. Kuva Kati Räsänen, Luke.

Ekotoksinen ympäristövaikutusluokka yhdistää elinkaariarvioinnin (LCA) ja riskiarvioinnin. Menetelmiä käytetään eri tarkoituksissa ja niillä on paljon eroja. Elinkaariarvioinnit tarjoavat lisätietoa, joka täydentää monien säännösten mukaisia haitallisten aineiden riskinarviointeja (EC-JRC 2010b). Toisin kuin riskinarviointiprosessit, elinkaariarviointia (LCA) ei käytetä haitallisen aineen riskin tai turvallisuuden analysointiin, mutta sen sijaan LCA voi auttaa tunnistamaan ympäristön kannalta kestävin tapa/tavat tarjota tuotteen tai palvelun eri vaihtoehtojen välillä (Rosenbaum ym. 2015). LCA-pohjaisia ekotoksisuusmenetelmiä on useita. LCA-pohjaiset tiedot kattavat laajoja aineistoja ja ne tuottavat maailmanlaajuisia keskiarvotuloksia ekotoksisuusvaikutuksista parhaan arvioinnin mukaan. Riskiarviointityössä tutkitaan usein yksittäisiä (yhdestä muutamaan) ainetta kerralla ja voidaan saada tarkkoja (paikallisia tai tiettyjä ihmisryhmiä koskevia) tuloksia. Riskiarviointitulokset antavat siten hyvin yksityiskohtaista tietoa.

Elinkaariarvioinnin ekotoksisen vaikutusluokan nykykäytännön ongelmina ovat mm.

- Tarkastelu keskittyy vain tiedossa oleviin (nykyisiin) päästöihin
- Todellisen käytön tai käytön todellisten vaikutusten arvioinnin ongelmat
- Päästöjen, ympäristötekijöiden ja historiallisten (pysyvien) päästöjen tai/ja niiden yhteisvaikutusta ei huomioida eikä välttämättä edes tunnetta
- Aineiden kertymistä ravintoverkkoon ei huomioida
- Kaikkia ympäristöjä ei vielä sisälly malleihin (esim. USEtox[®] ja makean veden eliövaikutukset)

3.2. Ekotoksiset vaikutukset kohdistuvat luonnonympäristöön

Elinkaarivaikutusten arvioinnissa LCIA-malleilla analysoidaan vaikutuksia ilmaan, veteen ja maaperään, resurssien kulutusta ja ympäristövaikutusten ja resurssien käytön vaikutuksia ihmisten terveyteen (Human Health), luonnonympäristöön (Natural Environment) ja luonnonvaroihin (Natural Resources) (EC-JRC 2010b). Luonnonympäristön (tai ekosysteemin terveyden) osalta tavoitteena on kvantifioida negatiiviset vaikutukset luonnollisten ekosysteemien toimintaan ja rakenteeseen, jotka johtuvat kemikaaleille altistumisesta tai fyysisistä toimenpiteistä (EC-JRC 2010b).

Elinkaarivaikutusten arvioinnissa (LCIA) ekotoksisten vaikutusten yksikkönä voidaan käyttää potentiaalisesti vaikutuksen kohteena olevien lajien osuutta (potential affected fraction of species, PAF), jotka ovat ns. keskipiste(mid-point) -indikaattoreita, tai potentiaalisesti kadonneiden lajien osuutta (potential disappeared fraction, PDF), jotka ovat ns. päätepiste(end-point) -indikaattoreita. PDF voidaan tulkita osaksi lajeja, joilla on suuri todennäköisyys olla esiintymättä alueella epäsuotuisten olosuhteiden vuoksi. PAF:n ja PDF:n välinen yhteys perustuu oletukseen, että väliaineen (esim. vesi, jossa eliö esiintyy) laadulla on suora yhteys biologiseen monimuotoisuuteen. Eli laji katoaa, kun kemikaalin pitoisuus ekosysteemissä saavuttaa tietyn tason ja laji ilmaantuu uudelleen, kun pitoisuus esimerkiksi hajoamisen vuoksi laskee jälleen sen tason alapuolelle. Mallissa oletetaan myös, että "lajien katoamisen ja uudelleen ilmestymisen aikaväli ovat samat" (EC-JRC 2010b).

3.3. Laskennan perusteet

Ekotoksisen ympäristövaikutuksen arviointia on kehitetty jo vuosia. Ensimmäisiä menetelmiä ovat mm. EDIP97-malli ekotoksisuudelle (Hauschild & Wenzel 1998) ja sen jälkeen on ilmestynyt useita uusia malleja tai niiden yhdistelmiä (lisätietoa mm. EC-JRC 2010a EC-JRC 2011). Suomessa menetelmää on käytetty jossain tutkimuksissa (esim. Katajajuuri ym. 2006, Seppälä ym. 2009, Räsänen ym. 2015, Joensuu ym. 2023). Mattila (2009) on aiemmin julkaissut myös ekotoksisuuskirjallisuuskatsauksen, jossa keskityttiin metalleihin. Tässä työssä kootaan tämän hetken tiedot aiheesta ja keskitytään kemikaaleista kasvinsuojeluaineisiin.

LCA:ssa ekotoksisuusvaikutusten mallit perustuvat ympäristöön vapautuvien kemikaalien suhteelliseen riskiin ja niihin liittyviin seurauksiin. Vertailevan riskinarvioinnin periaatteet ovat tarkastelun pohjana ja indikaattorit liittyvät luonnonympäristöön (Natural Environment). Mallien sisältämät tekijät heijastavat sellaisen toksikologisen vaikutuksen todennäköisyyttä, joka integroituu ajassa ja tilassa, joka liittyy kemikaalimäärän vapautumiseen ympäristöön. Tämä voi olla nolla (EC-JRC 2010b).

LCA:ssa kemikaalien ekotoksisuusvaikutukset perustuvat kemikaaleilla eri eliölajeille tehtyihin laboratorionkoekokeiden tuloksiin (EC-JRC 2010b). Laskennassa keskitytään päästöjen osuuteen ekotoksikologisten vaikutusten pitkän aikavälin riskiin ja niihin liittyviin seurauksiin ottaen huomioon kaikki lajien elinympäristöt ja hajapäästöt (EC-JRC 2010b). Päästöjen osuutta lyhyt-aikaisiin/akuutteihin ja paikallisen mittakaavan vaikutuksiin ei tyyppillisesti käsitellä elinkaariarvioissa. Karakterisointikertoimet ja ekotoksisuusvaikutustekijät perustuvat malleihin, jotka otavat huomioon kemikaalin kohtalon ympäristössä, lajien altistumisen ja erot toksikologisissa vasteissa (vaikutusten todennäköisyys ja vakavuus) (EC-JRC 2010b, EC-JRC 2011).

Ekotoksisten vaikutusten arviointiin (LCIA) on luotu useita eri menetelmiä. Yleisesti ja yksinkertaisesti voidaan kuitenkin sanoa, että karakterisointikerroin ottaa huomioon kemikaalin pysyvyyden ympäristössä (kohtalo - F) ja ekotoksisuusvaikutuksen (vaikutus - E) (EC-JRC 2010b):

$$CF_{j,i,x} = F_{j,i,x} \cdot E_{j,x}, \text{ jossa}$$

$CF_{j,i,x}$ on ekotoksikologinen karakterisointikerroin kemikaalille x, joka vapautuu osastoon i ja kulkeutuu ympäristöön j

F on kohtalokerroin, joka voidaan laskea kohtalo- ja altistusmallien avulla

E on vaikutustekijä, joka voidaan johtaa laboratorionkoekokeisiin perustuvista toksisuustiedoista.

Laskennassa on huomioitava erot päästösastojen välillä, kuten kaupunki- ja maaseutuilmän, makean veden ja meriveden sekä maatalous- ja teollisuusmaaperän. Sen on myös erotettava päätepiisteet, jotka edustavat esimerkiksi maa-, makean veden ja meriympäristöä (EC-JRC 2010b).

Karakterisointikerroin yhdistetään kemikaalin päästöön seuraavasti (Fantke 2019, Fantke ym. 2015):

$$I \text{ tai } IS = \sum_i \sum_x CF * M_{x,i}, \text{ jossa}$$

I tai IS (impact tai impact score) on aineen aiheuttama toksinen tai ekotoksinen keskipisteen (PAF, mid-point) tai päätepiisteen (PDF, end-point) vaikutus integroituna yli altistuneen tilavuuden ja ajan,

CF on karakterisointikerroin (characterization factor), joka aiheutuu aineen kulkeutuessa ympäristöstä/lokerosta toiseen ja

M kuvaa päästön aiheuttaman kemikaalin massaa, joka saadaan inventaarioanalyysissä (esim. yksikkö: $\text{kg}_{\text{päästö}}/\text{vrk}$)

Lisätietoa ekotoksisuuden laskemisesta LCA:ssa löytyy seuraavista julkaisuista, mm. Saouter ym. 2020, EC-JRC 2011, EC-JRC 2010b. Seuraavissa kappaleissa on tarkemmin kuvattu joitakin ekotoksisten vaikutusarviointien menetelmiä.

3.4. Menetelmät

Elinkaariarviointiin pohjautuvia ekotoksisuuden arvioinnin malleja (LCIA) ovat esim. USEtox[®] (Rosenbaum ym. 2008), LC-IMPACT (Verones ym. 2020), IMPACT World+ (Bulle ym. 2019) ja Recipe 2016 (Huijbregts ym. 2017). Lisäksi ProScale-menetelmä (Lexén ym. 2017) on esitetty työn lopuksi.

Nämä erilaisiin oletuksiin ja algoritmeihin perustuvat menetelmät johtavat erilaisiin tuloksiin (Hauschild ym. 2008) ja siten tulosten suora vertaaminen ei ole mahdollista. Mallien luontaisen erojen häivyttämiseksi on kehitetty USEtox[®] konsensusmalli (Hauschild ym. 2008, Rosenbaum ym. 2008). USEtox[®]-mallia suositellaan makean veden ekotoksisuuden keskipistevaikutusten arviointiin (mid-point). Mitään menetelmää ei suositella ekotoksisuuden päätepisteiden (end-point) arvioimiseen, koska mikään menetelmä ei ole riittävän kypsä (EC-JRC 2011). Mitään menetelmää ei myöskään vielä suositella meren ja maaperän ekotoksisuusarviointeihin (ei midpoint eikä end-point-tasoilla) (EC-JRC 2011).

3.4.1. USEtox[®]

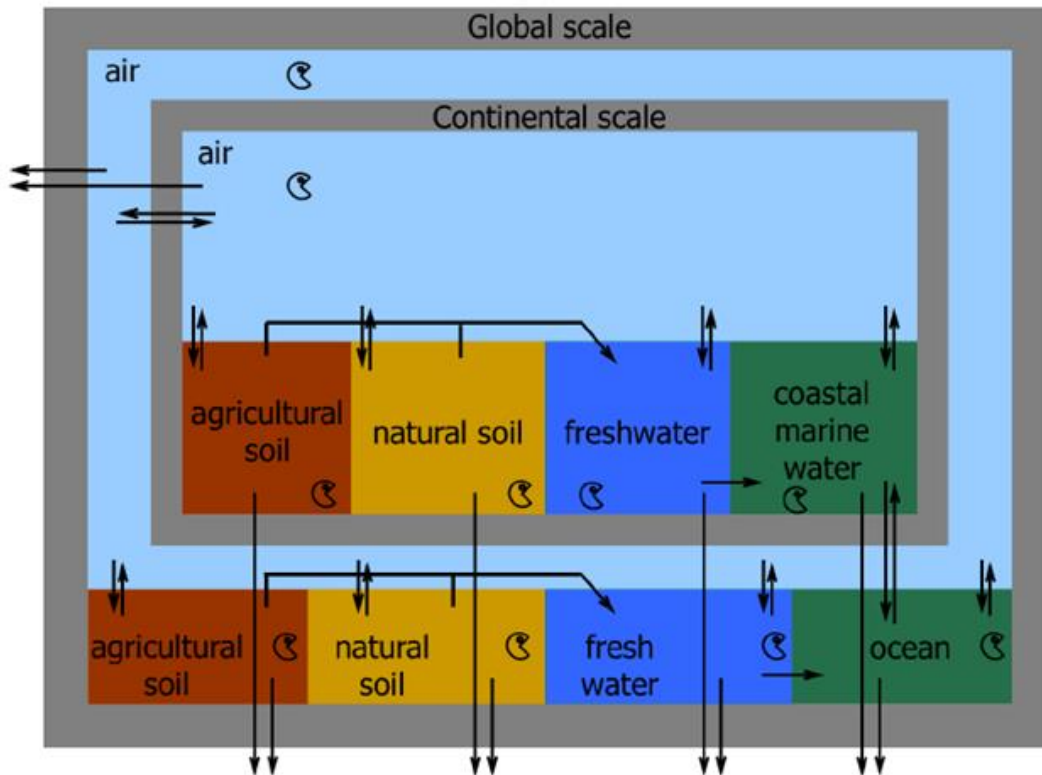
USEtox[®] on malli karakterisoida kemikaalien vaikutuksia ihmiseen ja ympäristöön (toksiset ja ekotoksiset vaikutukset) (Rosenbaum ym. 2008). Se on Yhdistyneiden Kansakuntien ympäristöohjelman (UNEP) ja Ympäristötoksikologian ja -kemian seuran (SETAC) Life Cycle Initiative (UNEP-SETAC-ryhmä) alaisuudessa vuodesta 2005 lähtien kehitetty tieteellinen konsensusmalli. Työhön osallistuivat seuraavien mallien kehittäjät: CalTOX, IMPACT 2002, USES-LCAa, BETR, EDIP, WATSON ja EcoSense (Rosenbaum ym. 2008).

USEtox[®]-malli on saatavilla ilmaiseksi: <https://usetox.org/>. Tällä hetkellä saatavilla oleva versio on USEtox[®] 2.13 (Fantke ym. 2017b). Lisäksi mallista on julkaistu kehittyneempi esimerkkiversio USEtox[®] 3.0 beta6c, mutta se on vasta testausvaiheessa. Tuleva versio tulee olemaan edellistä mallia kattavampi.

USEtox[®]-malli sisältää syöpää aiheuttavia tai ei syöpää aiheuttavia vaikutuksia ihmisiin (toksisuus) tai ympäristöön (ekotoksisuus). Ympäristöön aiheutuneet vaikutukset tarkoittavat nykykäytännössä vaikutuksia makean veden eliöihin. Mallilla voi laskea kemikaalien mid-point- ja end-point-karakterisointikertoimia tai kerrointen osia. Sen avulla voidaan erotella myös kemikaalien eri ympäristökohtalo- (fate), altistumis- (exposure) ja vaikutusparametrit (effect). Tämän hetken versio sisältää karakterisointikertoimet n. 1 100 kemikaalille toksisuuden arviointia ja 2 519 kemikaalille ekotoksisten vaikutusten arviointia varten.

USEtox[®] sisältää pitkän ajanjakson vaikutustietoja: kuukausista vuosiin. USEtox[®]:ssa on mukana maantieteellisiä tietoja 8 mantereesta ja 16 mantereen osasta. Näissä on lisäksi tarkempia parametreja (osa)manner- ja globaaleille järjestelmille esim. maa-alueen makean veden osuudesta, luonnon- ja maatalousmaasta, merialueesta, lämpötilasta, tuulen nopeudesta, sademäärästä, makean veden syvyydestä, makean veden osasta, sademäärästä, maaperän eroosiosta ja kastelusta.

USEtox[®]-malli toimii eri mittakaavassa; sisäympäristö, kaupunkimittakaava, mantereen mittakaava ja globaali mittakaava. Manner- ja maailmanlaajuinen mittakaava koostuu kumpikin viidestä osa-alueesta, jotka ovat maaseutuilmasto, maatalousmaa, luonnollinen maaperä, makea vesi ja (rannikko)merivesi. USEtox[®]:in osastorakenne näkyy kuvassa 5.



Kuva 5. USEtox-osaston asetukset mantereen ja maailmanlaajuiselle mittakaavalle. Nuolet osoittavat aineen virtausta järjestelmässä ja hyimiö ilmaisee hajoamista (Fantke ym. 2017b).

USEtox[®]-mallia (Rosenbaum ym. 2008) suositellaan käytettävän arvioitaessa ja tiedottaessa elinkaariympäristövaikutuksista koskien ihmistoksisuutta (syöpä tai ei syöpä vaikutukset), tai ekotoksisuutta (makean veden eliövaikutukset) useissa eri tunnetuissa lähteissä:

- Euroopan komissio (EY) suosituksissa yhteisten menetelmien käytöstä tuotteiden ja organisaatioiden elinkaaren aikaisen ympäristönsuojelun mittaamiseen ja tiedottamiseen (EC 2021)
- Euroopan komission Yhteinen tutkimuskeskus – Ympäristön ja kestävän kehityksen instituutin (JRC-IES) kansainvälisen viite-elinkaaritietojärjestelmän (ILCD) käsikirjassa (EC-JRC 2010c)
- Maailman kestävän kehityksen yritysneuvoston (WBCSD) kemiallisten tuotteiden elinkaarimittarit – kemianalan ohjeissa tuotteiden ympäristöjalanjäljen arvioimiseksi ja raportoimiseksi elinkaariarvioinnin perusteella (The World Business Council for Sustainable Development 2014)
- Yhdysvaltain ympäristönsuojeluviraston kemiallisten ja muiden ympäristövaikutusten vähentämis- ja arviointityökalun (TRACI) käyttöoppaassa (Bare 2012).

Ekotoksisuus-karakterisointikertoimien laskeminen

USEtox[®]:n tulos eli karakterisointikerroin kuvaa tietyn päästön (kemikaali) potentiaalia aiheuttaa vaaraa eliöille. Tämän hetken mallien versiot sisältävät vaikutukset vain makean veden eliöihin (Fantke ym. 2017b). Asiantuntijat ovat suositelleet, että USEtox[®]-malliin lisätään maa- ja meriympäristöjen vaikutusten arviointi (Saouter ym. 2020).

Tämän hetken malliversioiden USEtox[®]:in tulos kuvaa tilannetta, jossa kemikaalia (kg) joutuu ympäristöön ja kulkeutuu sieltä edelleen eri ympäristöihin (ilma, maa, vesi) ja lopulta makeaan veteen, jossa se aiheuttaa potentiaalisen haitan tietyssä tilavuudessa (m³) oleville eliöille tietyn ajan jälkeen (vrk). Haitta on joko vaikutus (mid-point-taso) tai lopullinen tuho eli eliöiden katoaminen (end-point-taso). Makean veden ekotoksisuuden karakterisointikertoimet on eritelty tulososiossa päästöille kotitalouksien sisäilmaan, työtilojen sisäilmaan, kaupunki-ilmaan, mannerilman maaseutuilmään, mannermaiseen makeaan veteen ja/tai mantereen viljelymaahan (kuva 6). End-point-tulos saadaan laskennallisesti mid-point-tuloksesta niin, että mid-point- karakterisointikerroin kerrotaan vakavuuskertoimella (severity factor).

USEtox[®]:ssa karakterisointikerroin (mid-point tai end-point) lasketaan seuraavan kaavan avulla (Fantke 2015):

$CF_{eco} = FF * XF * EF$, jossa

jossa CF_{eco} (mid-point) = karakterisointikerroin (characterization factor) kuvaa potentiaalisesti vaikutuksen saaneita eliöitä (potentially affected fraction of species) ajan mittaan ja tilavuudessa vapautuneen kemikaalin massayksikköä (kg) kohti

yksikkö: $CTU_e/kg_{päästö} = comparative\ toxic\ unit/kg_{päästö}$, eli $PAF\ m^3\ vrk/kg_{päästö}$

CF_{eco} (end-point) = karakterisointikerroin (characterization factor) kuvaa potentiaalisesti kadonneita eliöitä (potentially disappeared fraction of species) ajan mittaan ja tilavuudessa vapautuneen kemikaalin massayksikköä (kg) kohti

yksikkö: $CDU_e/kg_{päästö} = comparative\ damage\ unit/kg_{päästö}$ eli $PDF\ m^3d/kg_{päästö}$

FF = kohtalokerroin (fate factor) kuvaa kemikaalin massan kasvua ja pysyvyyttä ympäristössä

yksikkö: d eli vuorokausia (tarkemmin: kg ympäristöön (osaan) joutunutta kemikaalia/ kg päästöä/ vrk)

XF_{eco} = altistumiskerroin (exposure factor) kuvaa kemikaalin biosaatavuutta, joka riippuu paljon aineen fysikaalisista ja kemiallisista ominaisuuksista, mutta myös ympäristöolosuhteista (esim. sade, lämpötila)

yksikkö: $1/d$ (tarkemmin: kg eliöön joutunutta/ vrk/kg ympäristössä (osassa) kemikaalia)

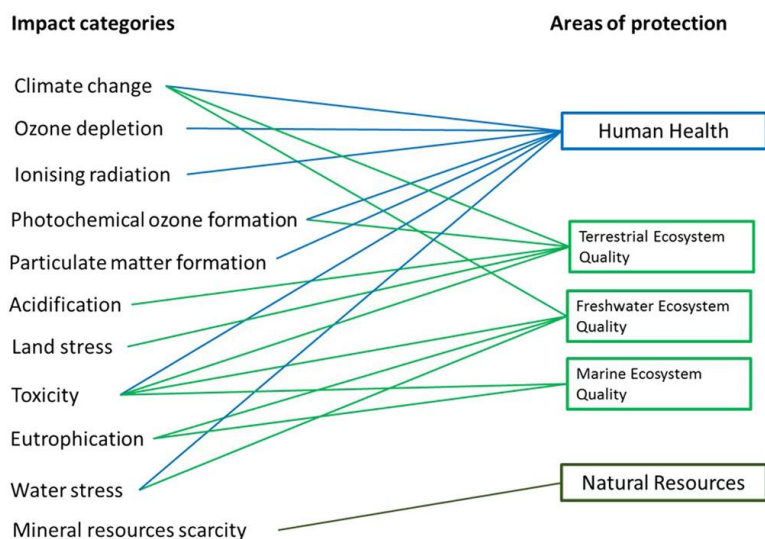
EF_{eco} = vaikutuskerroin (effect factor) kuvaa muutosta potentiaalisesti altistuneiden eliöiden osuudessa (Potentially Affected Fraction, PAF) pitoisuuden muuttuessa ja tietyssä tilavuudessa

yksikkö: $PAF * m^3/kg_{biosaatava}$

3.4.2. LC-IMPACT

LC-IMPACT on elinkaarivaikutusten arviointimenetelmä, jossa on mukana kolme pääaluetta (Areas of protection, AoP): ihmisten terveys, ekosysteemin laatu (luonnonympäristö) ja luonnonvarat (Verones ym. 2020). Kaikki LC-IMPACT-vaikutusluokat, lukuun ottamatta ilmastonmuutosta, ionisoivaa säteilyä ja stratosfäärin otsonikatoa, sisältävät alueellista tietoa. LC-IMPACT (2009–2013) luotiin EU:n FP7-ohjelman rahoittamalla hankkeella. LC-IMPACT:sta löytyy lisätietoa ja sen vaikutuskertoimet ovat ilmaiseksi saatavilla: <https://lc-impact.eu/index.html>. Kuvassa 6 on esitetty menetelmän kattamat vaikutusluokat ja suojelualueet.

Pääalueista ekosysteemin laatu ottaa huomioon luonnonympäristöön kohdistuvat vaikutukset. LC-IMPACT-menetelmällä lasketaan end-point-vaikutuksia, joka kuvaa mahdollisesti kadonnutta osaa lajista (globaalit, todelliset lajiarvot) (PDF, potentially disappeared fraction of species). Ekosysteemin laatu sisältää seuraavat ympäristömekanismit: Vesistressi, Ilmastonmuutos, Fotokemiallinen otsonin muodostuminen, Makean veden rehevöityminen, Makean veden ympäristömyrkyllisyys, Maa stressi, Happamoituminen, Meren rehevöityminen, Meren ympäristömyrkyllisyys ja Maan ympäristömyrkyllisyys.



Kuva 6. LC-IMPACT:n vaikutusluokat ja suojelualueet (AoP). Viivojen väri osoittaa, mihin suojelualueisiin vaikutusluokat liittyvät. Ekosysteemin laatu -suojelualueen sisällä on kolme erilaista ekosysteemityyppiä (Verones ym. 2020).

Makean veden ympäristömyrkyllisyys, Meren ympäristömyrkyllisyys ja Maan ympäristömyrkyllisyys

LC-IMPACT ekotoksisuus (ympäristömyrkyllisyys) mittareilla mitataan kemikaalien vaikutuksia vesistö- ja maaekosysteemeihin, mikä johtaa lopulta tuhoihin ekosysteemeissä. LC-IMPACT sisältää end-point-karakterisointikertoimet makean veden, meren ja maan ympäristömyrkyllisyydelle. Menetelmä sisältää 27 metalli-ionille ja 2 499 orgaaniselle aineelle valmiit karakterisointikertoimet, jotka löytyvät mallin sivuilta (<https://lc-impact.eu/index.html>). Aineiden tiedot ovat lähtöisin USEtox[®]-mallin kertoimista ja ne on mukautettu LC-IMPACT-menetelmälle. Malli perustuu lineaarisuuteen altistumisen ja lajivasteen välillä sekä se sisältää 100 vuoden aikajänteen. Lisäksi malli sisältää alueellisen ulottuvuuden, joka koostuu 16 mannermaisesta alueesta.

LC-IMPACT ekotoksisuuskarakterisointikerroin (end-point) lasketaan seuraavan kaavan avulla:

$$CF = FF \cdot XF \cdot EF \cdot DF$$

jossa CF (end-point) = karakterisointikerroin (characterization factor) kuvaa potentiaalisesti kadonneiden lajien osuutta (PDF, potentially disappeared fraction of species) yhdistettynä altistetun osan (esim. makean veden) tai väliaineen (esim. maan huokosvesi) tilavuuteen ja aikaan per vapautuneen kemikaalin massayksikköä (kg) kohti

$$\text{yksikkö: } \text{PDF m}^3_{\text{altistunut tila}} / \text{kg}_{\text{päästö}}$$

FF = kohtalokerroin (fate factor) yhdistää tietyn ympäristön osassa olevan kemikaalin massan (päästö) vuorokaudessa saman tai toisen ympäristön osaan päästöihin.

$$\text{yksikkö: } \text{kg}_{\text{ympäristöosassa}} / (\text{kg}_{\text{päästö}} / \text{vrk})$$

XF = ekosysteemin altistumiskerroin (exposure factor) kuvaa kemikaalien biosaatavuutta ympäristön osien organismeille, joille ekotoksinen vaikutus arvioidaan.

$$\text{yksikkö: } \text{kg}_{\text{biosaatava}} / \text{kg}_{\text{ympäristöosassa}}$$

EF = vaikutuskero (effect factor) kuvaa tietyn pitoisuuden altistuneessa ekosysteemissä (media/ympäristöosa) olevien potentiaalisesti altistuneiden eliöiden osuutta (Potentially Affected Fraction, PAF) verrattuna kemikaalin biosaatavaan massa (kg)

$$\text{yksikkö: } \text{PAFm}^3_{\text{altistunut media}} / \text{kg}_{\text{biosaatava}}$$

DF = on ekosysteemin vauriotekijä, joka yhdistää mahdollisesti kadonneiden lajien osuuden mahdollisesti vahingoittuneiden lajien osuuteen. Laskennassa käytetään oletusta $DF = 2 \text{ PDF/PAF}$ kaikissa ympäristöissä.

$$\text{yksikkö: } \text{PDF/PAF (potentially disappeared fraction of species/potentially affected fraction)}$$

3.4.3. IMPACT World+

IMPACTWorld+ on elinkaariarvioinnin vaikutusten arvioinnin (LCIA, life cycle impact assessment) menetelmä (Bulle ym. 2019), joka on päivitys IMPACT 2002+, LUCAS ja EDIP menetelmistä. Se sisältää useita eri karakterisointikertoimia, jotka ovat ilmaiseksi saatavilla <https://www.impactworldplus.org/>. Mallin karakterisointikertoimet kattavat maailman eri alueita ja ovat joko keskipiste (mid-point) tai vahinko (damage) vaikutuksia. Mallin suojelualueet ovat ihmisten terveys, ekosysteemien laatu sekä resurssit ja ekosysteempipalvelut. Kuvassa 7 on kuvattu menetelmän vaikutusluokat ja suojelualueet.

IMPACTWorld+:n ekotoksisuuden kertoimet pohjautuvat USEtox[®]-menetelmään ja kertoimet ovat makean veden (suositeltu), meren ja maan ekotoksisuudelle (=väli-indikaattori=interim indicator). Ekotoksisuuskerroimet sisältävät aineen kohtalon (fate), altistumisen (exposure), altistusvasteen (exposure response) ja vakavuuden (severity) tiedot. Malli sisältää pitkän aikavälin (100 vuotta) vaikutuksia metalleille ja pysyville orgaanisille kemikaaleille.

IMPACTWorld+ssa mid-point-ekotoksisuuskarakterisointikerroin lasketaan seuraavan kaavan avulla:

$$CF_e = FF \cdot XF \cdot ERF$$

jossa CF_e (mid-point) = karakterisointikerroin (characterization factor)

$$\text{yksikkö: } CTU_e/kg_{\text{päästö}} = \text{comparative toxic unit}/kg_{\text{päästö}}$$

Damage-ekotoksisuuskarakterisointikerroin lasketaan seuraavan kaavan avulla:

$$CF_e = FF \cdot XF \cdot ERF \cdot SF$$

CF_e (damage) = karakterisointikerroin (characterization factor)

$$\text{yksikkö: } PDF \cdot m^2 \cdot \text{year}/kg_{\text{päästö}} \text{ (PDF=potentially disappeared fraction of species)}$$

jossa FF =kohtalokerroin (fate factor)

$$\text{yksikkö: } \int_{t_1}^{t_2} \Delta_{\text{massa vastaanottotilassa}} dt / \text{Massa}_{\text{päästö}}$$

XF = altistumiskerroin (exposure factor)

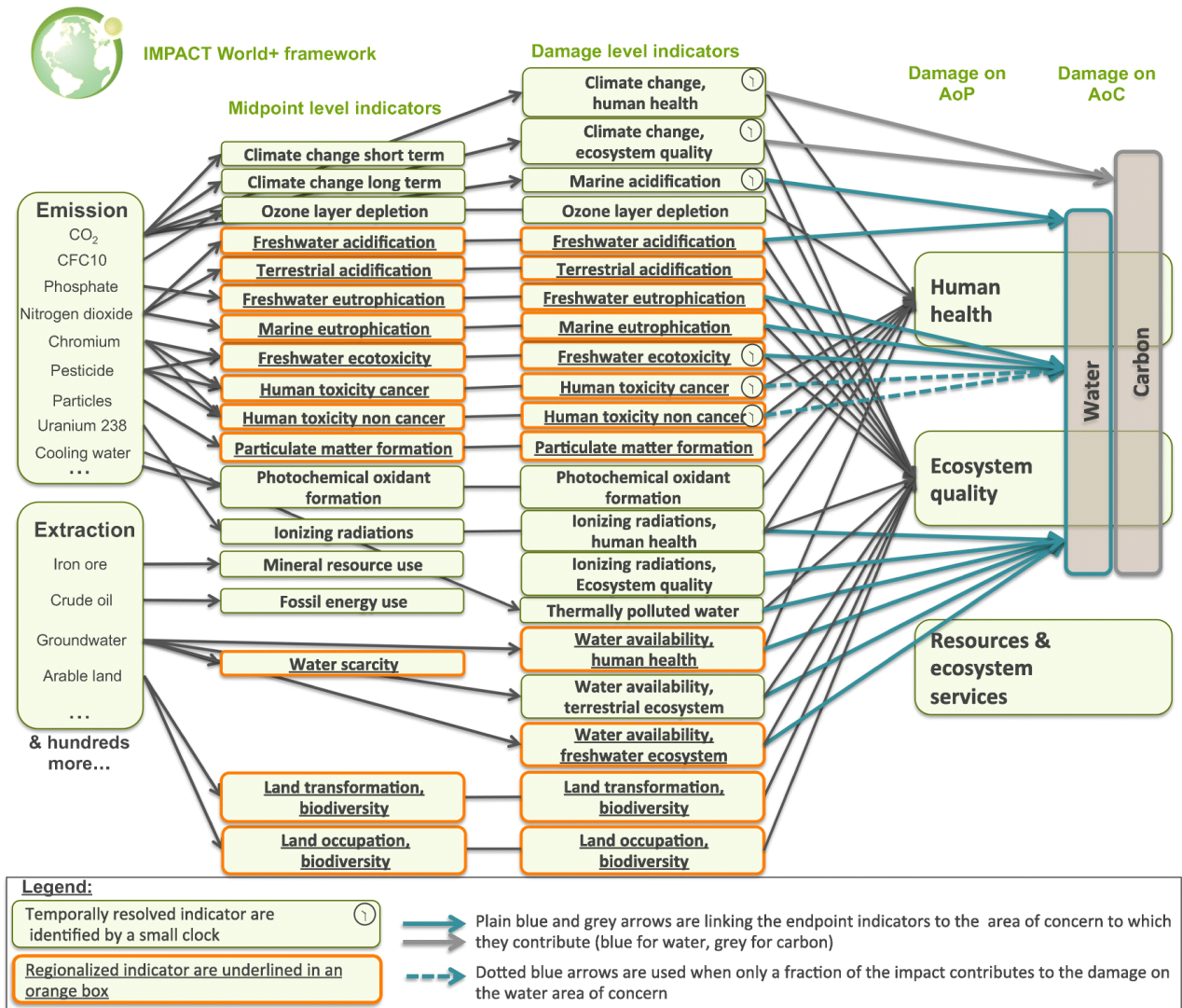
$$\text{yksikkö: } \text{Massa}_{\text{biosaatava}} / \int_{t_1}^{t_2} \Delta_{\text{massa vastaanotto-osassa}} dt, \text{ jossa } t \text{ kuvaa aikaa: } t_1 = 0 \text{ ja } t_2 = 100 \text{ vuotta lyhyen aikavälin indikaattorille ja } t_1 = 100 \text{ vuotta ja } t_2 = \infty \text{ pitkän aikavälin damage-tason indikaattorille}$$

ERF = vaikutuskerroin (exposure response factor)

$$\text{yksikkö: } PAF \cdot \text{Tilavuus} \cdot \text{Aika} / \text{Massa}_{\text{biosaatava}}$$

SF = vakavuuskerroin (severity factor)

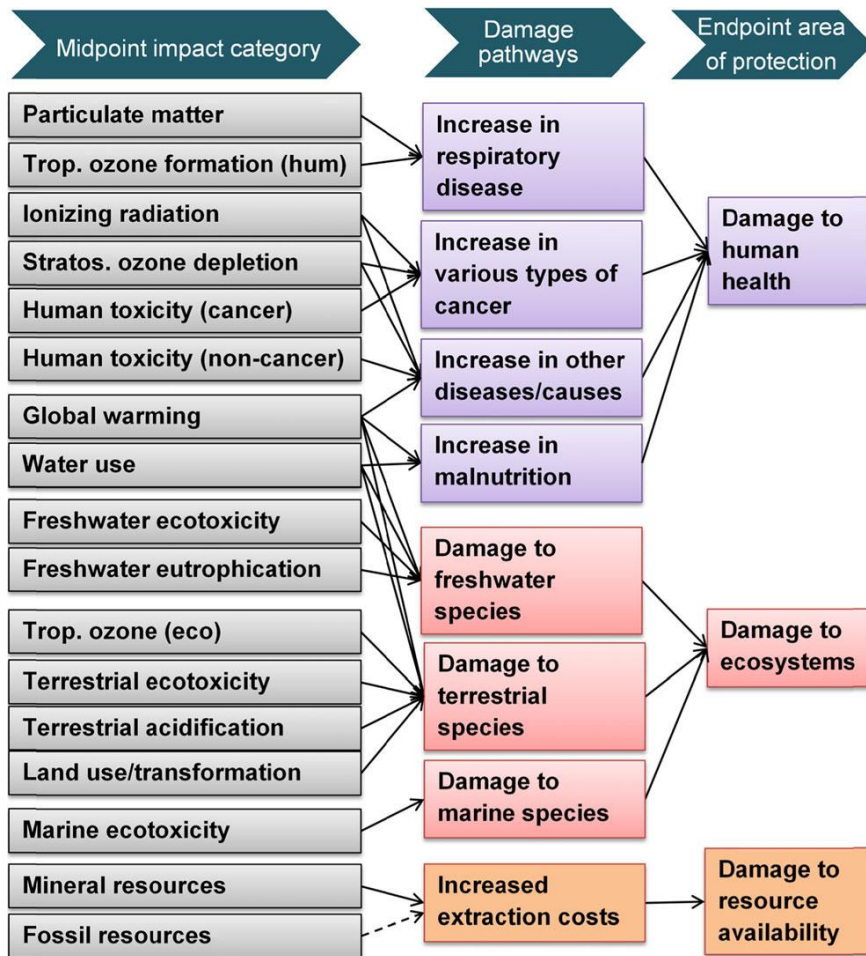
$$\text{yksikkö: } \text{Vahinko}_{EQ} / PAF \cdot \text{Tilavuus} \cdot \text{Aika}$$



Kuva 7. IMPACTWorld+ menetelmän vaikutusluokat ja suojelualueet (Bulle ym. 2019).

3.4.4. Recipe 2016

ReCiPe2016 (Huijbregts ym. 2017) on elinkaariarvioinnin vaikutusten mittaamisen (LCIA, Life Cycle Impact Assessment) työkalu, joka sisältää keskipisteen (mid-point) ja päätepisteen (end-point) karakterisointikertoimet 17 eri vaikutusluokasta. Ne kuuluvat kolmeen eri suojelualueeseen: ihmisten terveys, ekosysteemin laatu ja resurssien niukkuus. Menetelmät kerrotaan löytyvät ilmaiseksi verkosta: <https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/recipe> ReCiPe2016 on kehittyneempi versio ReCiPe2008:sta. Menetelmä kertoimet ovat maailmanlaajuisia, eivät esim. paikkakuntakohtaisia. Kuvassa 8 on esitetty ReCiPe2016 menetelmän vaikutusluokat ja suojelualueet.



Kuva 8. ReCiPe2016 menetelmän vaikutusluokat ja suojelalueet (Huijbregts ym. 2017).

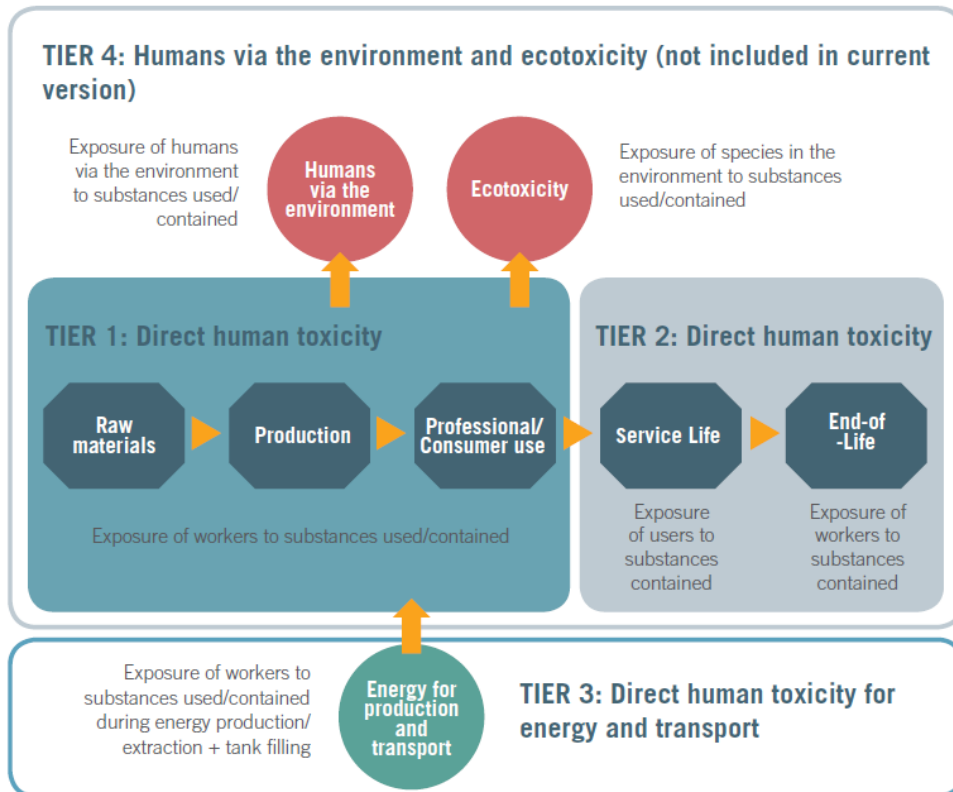
Malli sisältää ekotoksisuusvaikutuksen, jonka mid-point-kertoimet ovat makealle vedelle (freshwater ecotoxicity potential, FETP), merelle (marine ecotoxicity potential, METP) ja maalle (terrestrial ecotoxicity potential, TETP). Karakterisointikertoimet ilmaistaan kg 1,4-diklooribentseeni-ekvivalentteina (kg 1,4-DCB-eq). Päätepistevaikutukset (PDF, potentially disappeared fraction of species, mahdollisesti kadonnut osa lajeista) vastaavasti kuvaavat vahinkoa makean veden lajeille (lajien menetykset kemiallisen altistuksen vuoksi makeassa vedessä), meren lajeille (lajien häviäminen merivesien kemiallisen altistuksen vuoksi) ja maalla eläville lajeille (lajien häviäminen maaperän kemiallisen altistuksen vuoksi). Nämä vaikutukset edustavat vahinkoja ekosysteemeille johtuen käytetyistä kemikaaleista. ReCiPe2016-menetelmän laskelmien perustana on käytetty USES-LCA 2.0-menetelmää (Van Zelm ym. 2009). Kemikaalien tiedot on kerätty USEtox[®]-menetelmän tietokannasta (Rosenbaum ym. 2008).

3.4.5. ProScale

ProScale on elinkaariarjatteluun perustuva menetelmä, jonka avulla voidaan arvioida tuotteiden sisältämien kemikaalien potentiaalisia riskejä elinkaaren näkökulmasta ja vertailla niitä keskenään (Lexén ym. 2017). Menetelmästä löytyy lisätietoa täältä: <https://www.ivl.se/projektwebbar/proscale.html>. Menetelmän ohjeista on tällä hetkellä saataville versio 1.5. Menetelmän avulla voidaan tunnistaa kemikaalien aiheuttamia vaaroja ja suoraa potentiaalista altistumista sekä vaikutuksia koko tuotteen elinkaaren aikana. Arviointia voidaan tehdä eri

tasoilla, esim. koko elinkaaren tai sen osien aikana tai tietyn yksikköprosessin osalta. Tuloksia voidaan käyttää esim. yritysten viestinnässä.

ProScalen avulla voidaan tunnistaa niin toksikologiset kuin ekotoksikologiset kemikaalien aiheuttamat haitat. Menetelmää voidaan soveltaa kaikkiin tuotteisiin maailmanlaajuisesti. Tämän hetken versio sisältää vain toksikologiset vaikutukset ja rajoitettuja käyttökohteita, esim. rakennustuotteet eurooppalaisessa kontekstissa. Valmis menetelmä sisältää osia Tier 1–4, jotka esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. ProScale-menetelmän kokonaisuus, joista tällä hetkellä käytössä vain toksikologiset osat (Lexén ym. 2017).

ProScalen laskentaa varten tuotteen elinkaari on kuvattavat yksikköprosesseina. Jokaisessa yksikköprosessissa otetaan huomioon aineet, joita on käytetty ainesosina, valmiissa tuotteissa ja sisältyvissä tuotteissa. ProScale yhdistää jokaisen aineen ja kunkin yksikköprosessin osalta tiedot aineen toksikologisista ominaisuuksista (vaarasta), aineen fysikaalisista ominaisuuksista ja määritellyistä altistumisolosuhteista, altistumisajasta, altistuneesta väestöstä ja käytetystä aineen määrästä. ProScale-pisteet ilmoitetaan erikseen eri altistusreiteille (hengitettynä, suun kautta ja ihon kautta). Arviointi tehdään kaikille merkityksellisille altistustapauksille ja kaikille aineille kaikissa yksikköprosesseissa ProScallessa käytetyllä aggregointitasolla.

ProScalen tulokset ilmoitetaan pisteinä ja lasketaan kaavalla:

ProScale-pisteet = $\sum HF \times ECF \times PHF \times MF$, jossa

HF on vaaratekijä (Hazard Factor), joka kuvaa aineen vaaraa, heijastaen terveysvaikutuksia, vakavuutta ja voimakkuutta vaaralausekkeiden (jota kutsutaan myös H-lausekkeiksi) ja hyväksyttävien pitoisuustasojen (esim. OEL) perusteella.

ECF on altistuksen pitoisuustekijä (Exposure Concentration Factor), joka kuvaa aineen altistuspitoisuuden ECETOC TRA Tier 1 -altistusmallin perusteella.

PHF on henkilötuntikerroin (Person-Hours Factor), joka kuvaa altistuneiden henkilötuntien määrä tuotettua tuotetta tai palvelua kohden

MF on massavirtaus (Mass Flow), joka kuvaa tarvittavan aineen määrän tuotteen toiminnallista yksikköä kohti.

ProScale-pisteet voidaan laskea kahdella eri aggregointitasolla yhdessä yksikköprosessissa tai kaikissa tuotteen yksikköprosesseissa seuraavasti:

Yksikköprosessi: $PSU_{u, reitti} = \sum_i HFi_{, reitti} \times ECF_{i, u, reitti} \times MF_{i,u} \times PHF_u$, jossa

PSU on ProScalen yksikköprosessi (ProScale of Unit process), joka arvioi kaikkien aineiden «i» toksikologisen potentiaalin yhdessä yksikköprosessissa «u». Kullekin altistusreitille «reitti» lasketaan erillinen PSU.

Tuote: $PSP_{reitti} = \sum_u PSU_{u, reitti} = \sum_u \sum_i (HFi_{, reitti} \times ECF_{i, u, reitti} \times MF_{i,u} \times PHF_u)$, jossa

PSP on ProScalen tuote (ProScale of Product), joka arvioi kaikkien aineiden «i» toksikologisen potentiaalin kaikissa tuotteen yksikköprosesseissa «u». Kullekin altistusreitille «reitti» lasketaan erillinen PSP.

Viitteet

- Bare, J.C. 2012. Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts (TRACI), Version 2.1 - User's Manual; EPA/600/R-12/554 2012. <https://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P100HN53.pdf> Pääsy 8.4.2024.
- Bulle, C., Margni, M., Patouillard, L., Boulay, A.-M., Bourgault, G., De Bruille, V., Cao, V., Hauschild, M., Henderson, A., Humbert, S., Kashef-Haghighi, S., Kounina, A., Laurent, A., Levasseur, A., Liard, G., Rosenbaum, R.K., Roy, P.-O., Shaked, S., Fantke, P. & Jolliet, O. 2019. IMPACT World+: a globally regionalized life cycle impact assessment method. *International Journal Life Cycle Assessment* 24(9): 1653–1674. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01583-0>
- Dijkman, T.J., Birkved, M. & Hauschild, M.Z. 2012. PestLCI 2.0: a second generation model for estimating emissions of pesticides from arable land in LCA. *International Journal of Life Cycle Assessment* 17: 973–986. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0439-2>
- EC 2006. Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EY) N:o 1907/2006, annettu 18 päivänä joulukuuta 2006, kemikaalien rekisteröinnistä, arvioinnista, lupamenettelyistä ja rajoituksista (REACH), Euroopan kemikaaliviraston perustamisesta, direktiivin 1999/45/EY muuttamisesta sekä neuvoston asetuksen (ETY) N:o 793/93, komission asetuksen (EY) N:o 1488/94, neuvoston direktiivin 76/769/ETY ja komission direktiivien 91/155/ETY, 93/67/ETY, 93/105/EY ja 2000/21/EY kumoamisesta. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=CELEX:02006R1907-20140410> Pääsy 8.4.2024.
- EC 2008. Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EY) N:o 1272/2008, annettu 16 päivänä joulukuuta 2008, aineiden ja seosten luokituksesta, merkinnöistä ja pakkaamisesta sekä direktiivien 67/548/ETY ja 1999/45/EY muuttamisesta ja kumoamisesta ja asetuksen (EY) N:o 1907/2006 muuttamisesta. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=CELEX:32008R1272> Pääsy 8.4.2024.
- EC 2009. Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EY) N:o 1107/2009, annettu 21 päivänä lokakuuta 2009, kasvinsuojeluaineiden markkinoille saattamisesta sekä neuvoston direktiivien 79/117/ETY ja 91/414/ETY kumoamisesta. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=CELEX:32009R1107> Pääsy 8.4.2024.
- EC 2021. Komission suositus (EU) 2021/2279, annettu 15 päivänä joulukuuta 2021, ympäristöjalanjälkeä koskevien menetelmien käyttämisestä tuotteiden ja organisaatioiden elinkaaren ympäristötehokkuuden mittaamiseen ja siitä tiedottamiseen <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=CELEX:32021H2279> Pääsy 8.4.2024.
- EC-JRC 2010a. ILCD Handbook. Analysis of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment. p115. <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-LCIA-Background-analysis-online-12March2010.pdf> Pääsy 8.4.2024.
- EC-JRC 2010b. ILCD Handbook. Framework and Requirements for LCIA models and indicators p112. <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-LCIA-Framework-Requirements-ONLINE-March-2010-ISBN-fin-v1.0-EN.pdf> Pääsy 8.4.2024.

- EC-JRC 2010c. International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Provisions and Action Steps. First edition March 2010. EUR 24378 EN. Luxembourg. Publications Office of the European Union; 2010. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC58190> Pääsy 8.4.2024.
- EC-JRC 2011. International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook- Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context. First edition November 2011. EUR 24571 EN. Luxemburg. Publications Office of the European Union. <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-Recommendations-for-Life-Cycle-Impact-Assessment-in-the-European-context.pdf> Pääsy 8.4.2024.
- Fantke, P. 2019. Modelling the environmental impacts of pesticides in agriculture. In Assessing the environmental impact of agriculture. Weidema, Bo.P. (Ed.). Burleigh Dodds Science Publishing, Cambridge, UK. <https://doi.org/10.19103/AS.2018.0044.08> Pääsy 8.4.2024.
- Fantke, P., Antón, A., Grant, T. & Hayashi, K. 2017a. Pesticide emission quantification for life cycle assessment: a global consensus building process. International Journal Life Cycle Assessment 13: 245–251. https://www.jstage.jst.go.jp/article/lca/13/3/13_245/_pdf
- Fantke, P., Bijster, M., Guignard, C., Hauschild, M., Huijbregts, M., Jolliet, O., Kounina, A., Magaud, V., Margni, M., McKone, T., Posthuma, L., Rosenbaum, R.K., van de Meent, D. & van Zelm, R. 2017b. USEtox® 2.0 Documentation (Version 1.1). USEtox® Team, Kgs. Lyngby, Denmark. <http://doi.org/10.11581/DTU:00000011> Pääsy 8.4.2024.
- Fantke, P., Huijbregts, M., Margni, M., Hauschild, M., Jolliet, O., McKone, T.E., Rosenbaum, R.K. & van de Meent, D. 2015. USEtox® 2.0 User Manual (Version 2), <https://usetox.org/> Pääsy 8.4.2024.
- FAO 2014. The international code of conduct on pesticide management. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/i3604e/i3604e.pdf> Pääsy 8.4.2024.
- FRAC (Fungicide Resistance Action Committee) 2024. Fungicides sorted by mode of action. <https://www.frac.info/> Pääsy 8.4.2024.
- Gentil, C., Basset-Mens, C., Manteaux, S., Mottes, C., Maillard, E., Biard, Y. & Fantke, P. 2020. Coupling pesticide emission and toxicity characterization models for LCA: Application to open-field tomato production in Martinique. Journal of Cleaner Production 277: 124099. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124099>
- Hauschild, M.Z. & Wenzel, H. 1998. Environmental assessment of products. Vol. 2 - Scientific background, 565 pp. Chapman & Hall, United Kingdom, Kluwer Academic Publishers, Hingham, MA. USA.
- Hauschild, M.Z., Huijbregts, M., Jolliet, O., Macleod, M., Margni, M., Van De Meent, D., Rosenbaum, R.K. & McKone, T.E. 2008. Building a model based on scientific consensus for life cycle impact assessment of chemicals: The search for harmony and parsimony. Environmental Science & Technology. 42(19): 7032–7037 <https://doi.org/10.1021/es703145t>

- HRAC (Herbicide Resistance Action Committee) 2024. Herbicides sorted by mode of action. <https://www.hracglobal.com/> Pääsy 8.4.2024.
- Huijbregts, M.A.J., Steinmann, Z.J.N., Elshout, P.M.F. Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A. & van Zelm, R. 2017. ReCiPe2016: a harmonized life cycle impact assessment method at mid-point and end-point level. International Journal of LCA 2/2017. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- IRAC (Insecticide Resistance Action Committee) 2024. Insecticides sorted by mode of action. <https://irac-online.org/> Pääsy 8.4.2024.
- IPBES 2019. Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. S. Díaz, J. Settele, E.S. Brondízio, H.T. Ngo, M. Guèze, J. Agard, A. Arneth, P. Balvanera, K.A. Brauman, S.H.M. Butchart, K.M.A. Chan, L.A. Garibaldi, K. Ichii, J. Liu, S.M. Subramanian, G.F. Midgley, P. Miloslavich, Z. Molnár, D. Obura, A. Pfaff, S. Polasky, A. Purvis, J. Razzaque, B. Reyers, R. Roy Chowdhury, Y.J. Shin, I.J. Visseren-Hamakers, K.J. Willis & C.N. Zayas (eds.). IPBES secretariat, Bonn, Germany. 56 p. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3553579> Pääsy 8.4.2024.
- Joensuu, K., Kotilainen, T., Rantanen, M., Rikala, K., Räsänen, K., Silvenius, F. & Usva, K. 2023. Puutarhatuotannon uusien menetelmien elinkaariset ympäristövaikutukset: Avomaalta tunneliin, kasvihuoneesta vertikaaliin. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 126/2023. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 68 s. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-865-2>
- Katajajuuri, J.-M., Grönroos, J., Usva, K., Virtanen, Y., Sipilä, I., Venäläinen, E., Kurppa, S., Tanskanen, R., Mattila, T. & Virtanen, H. 2006. Broilerin fileesuikaleiden tuotannon ympäristövaikutukset ja kehittämismahdollisuudet. MTT raportti 90. p. 118. MTT – Maa- ja elintarviketalous. <http://www.mtt.fi/met/pdf/met90.pdf> Pääsy 8.4.2024.
- Klaassen, C.D. 2007. Casaret and Doull's toxicology. The basic science of poisons. 7th edition. 1309 pages. McGraw Hill Companies, USA.
- Lexén, J., Belleza, E., Loh Lindholm, C., Rydberg, T., Amann, N., Aschford, P., Bednarz, A., Coërs, P., Dornan, P., Downes, R., Enrici, M., Glöckner, M., Gura, E., de Hults, Q., Karafilidis, C., van Miert, E., Saling, P., Tiemersma, T., Wathélet, A. & Wienbeck, X., 2017. ProScale – A life cycle oriented method to assess toxicological potentials of product systems, Guidance document, version 1.5, on behalf of the ProScale consortium, UetlibergPartners, Oetlikon, Switzerland, and IVL Swedish Environmental Research Institute, Stockholm Sweden, IVL report B2433, ISBN 978-91-7883-335-1. <https://www.diva-porta.org/smash/get/diva2:1614736/FULLTEXT01.pdf> Pääsy 8.4.2024.
- Mattila, T. 2009. Modelling the effects and emissions of hazardous substances in life cycle assessment. The Finnish Environment 6/2009. Finnish Environment Institute.

- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, III F.S., Lambin, E.F., Lenton, T.M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H.J., Nykvist, B., De Wit, C.A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P.K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R.W., Fabry, V.J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P. & Foley, J.A. 2009. Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and Society* 14 (2): 32. <http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32>
- Rosenbaum, R.K., Anton, A., Bengoa, X., Bjorn, A., Brain, R., Bulle, C., Cosme, N., Dijkman, T.J., Fantke, P., Felix, M., Geoghegan, T.S., Gottesburen, B., Hammer, C., Humbert, S., Jolliet, O., Juraske, R., Lewis, F., Maxime, D., Nemecek, T., Payet, J., Rasanen, K., Roux, P., Schau, E.M., Sourisseau, S., van Zelm, R., von Streit, B. & Wallman, M. 2015. The Glasgow consensus on the delineation between pesticide emission inventory and impact assessment for LCA. *Internal Journal of Life Cycle Assessment* 20 (6): 765–776. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0871-1>
- Rosenbaum, R., Bachmann, T., Gold, L., Huijbregts, M., Jolliet, O., Juraske, R., Koehler, A., Larsen, H.F., MacLeod, M., Margni, M., McKone, T.E., Payet, J., Schumacher, M., van de Meent, D. & Hauschild, M.Z. 2008. USEtox® – the UNEP/SETAC-consensus model: recommended characterization factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in Life Cycle Impact Assessment. *Internal Journal of Life Cycle Assessment* 13(7): 532–546. <http://10.1007/s11367-008-0038-4>
- Räsänen, K., Mattila, P., Porvari, S., Kurppa, S. & Tiilikkala, K. 2015. Estimating the development of ecotoxicological pressure on water systems from pesticides in Finland 2000–2011. *Journal of Cleaner Production* 89: 65–77. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.008>
- Saouter, E., Biganzoli, F., Ceriani, L., Versteeg, D., Crenna, E., Zampori, L., Sala, S. & Pant, R. 2020. Environmental Footprint: Update of Life Cycle Impact Assessment Methods – Ecotoxicity freshwater, human toxicity cancer, and non-cancer. EUR 29495 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-76-17143-0, <https://doi.org/10.2760/300987>, JRC114227 Pääsy 8.4.2024.
- Seppälä, J., Mäenpää, I., Koskela, S., Mattila, T., Nissinen, A., Katajajuuri, J.-M., Härmä, T., Korhonen, M.-R., Saarinen, M. & Virtanen, Y. 2009. Assessment of the environmental impacts of material flows caused by the Finnish economy with the ENVIMAT model. *The Finnish Environment* 20/2009. Finnish Environment Institute. <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/973236> Pääsy 8.4.2024.
- Sigmund, G., Ågerstrand, M., Antonelli, A., Backhaus, T., Brodin, T., Diamond, M.L., Erdelen, W.R., Evers, D.C., Hofmann, T., Hueffer, T., Lai, A., Torres, J.P.M., Mueller, L., Perrigo, A.L., Rillig, M.C., Schaeffer, A., Scheringer, M., Schirmer, K., Tlili, A., Soehl, A., Triebkorn, R., Vlahos, P., vom Berg, C., Wang, Z. & Groh, K.J. 2023. Addressing Chemical Pollution in Biodiversity Research. *Global Change Biology* 29(12): 3240–3255. <https://doi.org/10.1111/gcb.16689>

The World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) 2014. The Life Cycle Metrics for Chemical Products. A Guideline by the Chemical Sector to Assess and Report on the Environmental Footprint of Products, based on Life Cycle Assessment.

<https://www.wbcd.org/Projects/Chemicals/Resources/Life-Cycle-Metrics-for-Chemical-Products> Pääsy 8.4.2024.

Van Zelm, R., Huijbregts, M.A.J. & Van de Meent, D. 2009. USES-LCA 2.0: a global nested multi-media fate, exposure and effects model. *International Journal of Life Cycle Assessment* 14(30): 282–284. <https://doi.org/10.1007/s11367-009-0066-8>

Veronesi, F., Hellweg, S., Antón, A., Azevedo, L.B., Chaudhary, A., Cosme, N., Cucurachi, S., de Baan, L., Dong, Y., Fantke, P., Golsteijn, L., Hauschild, M., Heijungs, R., Jolliet, O., Juraske, R., Larsen, H., Laurent, A., Mutel, C.L., Margni, M., Núñez, M., Owsianiak, M., Pfister, S., Ponsioen, T., Preiss, P., Rosenbaum, R.K., Roy, P.-O., Sala, S., Steinmann, Z., van Zelm, R., Van Dingenen, R., Vieira, M. & Huijbregts, M.A.J. 2020. LC-IMPACT: A regionalized life cycle damage assessment method. *Journal of Industrial Ecology* 2020: 1–19. <https://doi.org/10.1111/jiec.13018>



**Löydät meidät
verkosta**

luke.fi



Luonnonvarakeskus (Luke) Latokartanonkaari 9, 00790 Helsinki