Jäteveden metallien saostamisen CO2e-päästöt

Niko Lodman

Opinnäytetyö, AMK
Maaliskuu 2025
Energia- ja ympäristötekniikka, AMK

jamk | Jyväskylän ammattikorkeakoulu
University of Applied Sciences

jamk

Kuvailulehti

Lodman, Niko

Jäteveden metallien saostamisen CO2e-päästöt

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Maaliskuu 2025, 38 sivua

Energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

Tiivistelmä

Globaali vihreä siirtymä ja kiertotalousilmiö muuttavat maailmaa monin tavoin. Se luo taloudellisia mahdollisuuksia uusia innovaatioita luoville yrityksille, joiden tuoreet ideat voivat vähentää kasvihuonekaasupäästöjä ja edistää kierrätyksen mahdollisuutta. Teollisuudessa ja kaivosteollisuudessa syntyvien jätevesien sisältämien liukoisten metallien erotus ja talteenotto ovat täydellisiä esimerkkejä ympäristön huomioimisesta nykyajan prosesseissa. Se vähentää neitseellisten raaka-aineiden ja puhtaan veden käyttöä sekä täten vähentää myös prosessin luomien kasvihuonekaasupäästöjen määrää. Metallinerotustekniikoita on laaja määrä ja niiden väliset CO2e-päästöerot voivat vaihdella esimerkiksi käytettävien kemikaalien mukaan suuresti. Kemiallinen saostus on globaalisti käytetyin tekniikka jätevesien metallien erotukseen ja se perustuu juuri saostuskemikaalien käyttöön.

Työn tavoitteena ja tehtävänä oli luoda laskuri, jolla voidaan verrata perinteisten kemiallisten saostusmenetelmien ja toimeksiantajan patentoidun menetelmän välisiä päästöjä. Toimeksiantaja, EPSE Oy, on kotimainen teollisuuden prosessi- ja jätevesien käsittelyyn erikoistunut yritys. Yrityksen luoma EPSE™ Menetelmä on tehokkaampi ja vähemmän metallisakkaa synnyttävä kemiallisen saostuksen metodi, jonka etuja ovat sen lämpötilariippumattomuus ja joustavuus. EPSE Oy käyttää laskuria EPSE™ Menetelmän päästötaseen tarkasteluun ja asiakasneuvotteluihin.

Työ toteutettiin toiminnallisena kehittämistyönä, jonka periaatteena on kehittää toimeksiantajalle haluttu tuotos, kuten opas, malli tai laskuri ja tehdä siitä kirjallinen työvaiheita selostava raportti. Menetelmän nimi perustuu konkreettisen tuotoksen tekemiseen tutkimuksellisella otteella perustuen olemassa olevaan tietoon, jolloin uutta tutkimustietoa ei luoda eikä tarvita.

Tuloksena syntyi Microsoft Excel -taulukkolaskentaohjelmalla rakennettu laskurikokonaisuus, joka sisältää myös raporttivälilehden, jossa sijaitsevat automaattisesti laskureiden lopputuloksia analysoivat diagrammit eri vuosiskenaarioilla. Laskurikokonaisuus on parhaimmillaan joustava ja muokkausvapaa mallipohja toimeksiantajalle, jolla voidaan mahdollisesti vaikuttaa myös asiakasyritysten kasvihuonekaasupäästöihin.

Avainsanat (asiasanat)

ilmastonmuutos, kiertotalous, hiilidioksidiekvivalenttipäästö, kemiallinen saostaminen, raskasmetalli

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

Liite 1 on salassa pidettävä, ja se on poistettu julkisesta työstä. Salassapitoaika on 25 vuotta.
Liite 1 Microsoft Excel -CO2e laskuri (salassa pidettävä)

jamk

Description

Lodman, Niko

CO2e emissions from the precipitation of metals in wastewater

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, March 2025, 38 pages

Degree Programme in Energy and Environmental Technology. Bachelor´s thesis.

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

The global green transition and the circular economy phenomenon are transforming the world in many ways. They create opportunities for companies developing new innovations, whose fresh ideas can reduce greenhouse gas emissions and promote recycling possibilities. The separation and recovery of dissolved metals from industrial wastewater are perfect examples of considering the environment in the industry. This reduces the use of virgin raw materials and clean water, thereby also decreasing the amount of greenhouse gas emissions produced by the process.

There is a wide range of metal separation techniques, and the differences in CO2e emissions between them can vary greatly depending on the chemicals used. Chemical precipitation is the most globally used technique for separating metals from wastewater, and it relies precisely on the use of precipitation chemicals.

The goal and task of this work were to create a calculator to compare the emissions of traditional chemical precipitation methods with the emissions of the client's patented method. The client, EPSE Oy, is a domestic company specializing in industrial process and wastewater treatment. The company's EPSE™ Method is a more efficient chemical precipitation method that produces less metal sludge, with advantages such as its temperature independence and flexibility. EPSE Oy uses the calculator to assess the emission balance of the EPSE™ Method and for client negotiations.

The work was carried out as a functional development project, the principle of which is to develop the desired output for the client — such as a guide, model, or calculator — and produce a written report explaining the work phases. The method is based on creating a concrete product with a research-oriented approach using existing knowledge, without creating or requiring new research data.

The result was a calculator built with Microsoft Excel, which includes a report tab containing automatically generated diagrams analyzing the calculator's results for various annual scenarios. The calculator package serves as a flexible and customizable template for the client, potentially influencing the greenhouse gas emissions of customer companies.

Keywords/tags (subjects)

Climate change, circular economy, carbon dioxide equivalent, chemical precipitation, heavy metal

Miscellaneous (Confidential information)

Attachment 1 is confidential and has been removed from public work. The confidentiality period is 25 years.
Attachment 1 Microsoft Excel -CO2e calculator (to be kept secret)

Sisältö

1 Johdanto 6
1.1 EPSE Oy 7
2 Työn tehtävä ja tavoitteet 7
2.1 Työn rajaus 8
2.1.1 Kestävä kehitys 9
3 Jätevedenkäsittely teollisuudessa 10
3.1 Jätevedenkäsittely kaivosteollisuudessa 11
4 Kemiallinen saostaminen 11
4.1 Kalkkisaostus 12
4.2 Lopputuotteet 13
5 Raskasmetallipitoiset jäte- ja prosessivedet 13
5.1 Raskasmetallisakka ja sen loppusijoitus 14
6 Raskasmetallit ympäristössä 15
7 Metallien talteenotto sakasta 16
7.1 Vihreä siirtymä ja kasvava metallien tarve 16
7.2 Tekniikka ja toteutus tänä päivänä 18
7.3 Lainsäädäntö ja kansainväliset sopimukset 19
8 Hiilidioksidiekvivalenttipäästöt 20
8.1 Kasvihuoneilmiö ja ilmastonmuutos 20
8.2 Ilmastosopimukset 21
8.3 EU, Suomi ja hiilidioksidipäästöjen raportointi 22
8.3.1 CSRD-direktiivi, GHG-Protokolla, hiilidioksidiekvivalentti ja päästökertoimet 23
9 Opinnäytetyön toteutus 24
9.1 Tutkimusmenetelmä 24
9.2 Aineistonkeruu ja -analyysi 25
10 Tulokset 25
10.1 Kemiallinen saostusprosessi ja CO2e -päästöt 25
10.2 Laskuri 26
11 Pohdinta 29
11.1 Työn luotettavuus ja eettisyys 29
11.2 Tulosten hyödynnettävyys ja kehittämisehdotukset 30

Lähteet 33

Liitteet 38

Liite 1. Microsoft Excel -CO2e laskuri (salassa pidettävä) 38

Kuviot

Kuvio 1. YK:n Agenda 30 ohjelman 17 päätavoitetta (Kestävä kehitys n.d.) 10

Kuvio 2. Hahmotelmakuva vertailumenetelmän laskurin rakenteesta. Kemikaalien nimet ja päästökertoimet ovat poistettu kuvasta tarkoituksellisesti. 28

1 Johdanto

Maailma käy parhaillaan läpi murrosvaihetta, jossa ilmastonmuutos, ympäristön kantokyky ja hyvinvointi sekä neitseellisten raaka-aineiden saatavuuden epävarmuudet muuttavat ihmisten ja organisaatioiden toimintaa laajalla skaalalla. Eri ilmiöitä, trendejä ja kappaleita ei voida enää tarkastella vain esimerkiksi taloudellisesta näkökulmasta, vaan rinnalle ovat nousseet ympäristön huomioivat tekijät, kuten jonkin kasvihuonekaasupäästöt, kierrätyskelpoisuus sekä energiatehokkuus.

Innovaatiot, jotka mahdollistavat sekä taloudellisen hyödyn että mainitut ympäristön hyvinvoinnin kannalta merkittävät tekijät, ovat muuttuvassa maailmassa vahvoilla, kun raaka-aineiden saatavuus heikkenee väkiluvun kasvaessa. Neitseellisistä raaka-aineista erityisesti metallit edustavat massiivista roolia globaalissa teollisuudessa, kaivosteollisuudessa sekä valtioiden talouksissa. Metalleihin liittyvä kierrätys on valtava mahdollisuus säästää luontoa sekä luoda uusia talousvirtoja niin valtioille kuin yrityksille.

Täydellinen esimerkki aiheesta on teollisuuden prosesseissa syntyvän jäteveden sisältämien liukoisten metallien saostus ja kierrätys. Saostusta on toteutettu jo yli vuosisadan verran, mutta kierrätys takaisin raaka-aineeksi on edelleen vähäistä, liki olematonta. Jätevesien metalleihin liittyvä kiertotalous voisi olla täten merkittävä tekijä kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä, luonnon säästämisessä sekä taloudellisessa maailmassa, kun huomioidaan esimerkiksi kaivosteollisuuden valtavat jätevesivolyymit.

Opinnäytetyön toimeksiantaja on muun muassa prosessi- ja kaivosteollisuudessa syntyvien jätevesien liukoisten metallien saostukseen keskittyvä toimija. Kyseinen yritys on luonut ympäristöystävällisemmän ja tehokkaamman menetelmän metallien saostukseen verrattuna perinteisiin saostusmenetelmiin. Yritys haluaa selvittää tämän EPSE™ Menetelmän ja perinteisten menetelmien väliset hiilidioksidiekvivalenttipäästöerot laskurin avulla, joka on tämän opinnäytetyön lopputuotos. Opinnäytetyössä perehdytään kyseisen hiilidioksidipäästölaskurin rakentamiseen vaikuttaneeseen teoriaan, taustoihin ja vaiheisiin perusteellisesti.

1.1 EPSE Oy

Opinnäytetyön toimeksiantaja EPSE Oy on suomalainen ja globaalisti operoiva yritys, joka on erikoistunut liukoisia raskasmetalleja sisältävien vaarallisten prosessi- ja jätevesien käsittelyyn. Yrityksen päätoimipiste sijaitsee Ylöjärvellä, ja se on perustettu vuonna 2012. EPSE Oy:lla työskentelee toistakymmentä alan ammattilaista neljässä eri tiimissä ja heillä on patentti voimassa tämän tekstin kirjoitushetkellä jo 38 maassa. Yrityksen palvelut ovat pääasiassa keskittyneet teollisuuden ja kaivosteollisuuden prosessijätevesiin, mutta potentiaaliset sovellusalueet kantavat niin pitkälle kuin raskasmetallipitoisia jätevesiä prosessin, kuten esimerkiksi energiantuotannon, kemianteollisuuden ja jätealan prosessien, jäljiltä löytyy. EPSE Oy käyttää palveluissaan omaa EPSE™ Menetelmäänsä. (EPSE Oy 2024.)

EPSE™ Menetelmä on patentoitu innovaatio liukoisten metallien erotukseen niitä sisältävistä vesipitoisista jakeista, kuten prosessijätevesistä. Menetelmä perustuu kemialliseen saostukseen, jossa käsiteltävään vesijakeeseen annostellaan EPSE™-kemikaalia ja lopuksi erillistä pH:n säätökemikaalia. Lopputuloksena syntyy niukkaliukoinen sakka ja puhdas ylite. EPSE™ Menetelmän etuja verrattuna perinteisiin kemiallisen saostuksen tapoihin ovat syntyvän sakan vähempi määrä, soveltuvuus jopa 51 eri metallille sekä erityisesti lämpötilariippumattomuus, sillä prosessi ei vaadi ylimääräistä lämpöenergiaa. Ominaisuuksina EPSE™ Menetelmän ympäristöystävällisyys ja sen jälkeisen sakan niukkaliukoisuus mahdollistavat ja houkuttelevat asiakasyrityksiä kiertotalouden edistämiseen metallien talteenoton sekä jätteen vähentämisen muodossa. (Mt.)

2 Työn tehtävä ja tavoitteet

Opinnäytetyön tehtävänä oli kehittää toimeksiantajalle CO2e-päästölaskuri, jossa vertaillaan perinteisten kemiallisten saostusmenetelmien sekä EPSE™ Menetelmän välisiä päästöeroja. Päästölaskurin tuli olla mahdollisimman yleispätevä useimpiin toimeksiantajan meneillä oleviin ja tuleviin asiakasprojekteihin. Numeraalisen laskuri-informaation lisäksi opinnäytetyön tarkoituksena oli kerätä toimeksiantajalle tietoa kemiallisen saostusprosessin hiilidioksidiekvivalenttipäästöihin vaikuttavista tekijöistä. Tämä tieto sisällytettiin osittain laskuriin sekä sen laskentalopputulokseen vaikuttaviin tekijöihin ja muuttujiin. Opinnäytetyön aihe ja tehtävä tulivat toimeksiantajalta itseltään.

Opinnäytetyön kehittämistavoitteet:

1. Luoda ja kehittää toimeksiantajalle kahden eri kemiallisen saostusmenetelmän välinen CO2e-päästövertailulaskuri, joka on mahdollisimman yleispätevä eri asiakasprojekteissa.
2. Tuoda toimeksiantajalle selkeää tietoa olennaisista kemiallisen saostusprosessin hiilidioksidiekvivalenttipäästöjä synnyttävistä tekijöistä

Työn tehtävällä ja tavoitteilla on keskeinen merkitys kyseisen teollisuudenalan ja sen piirissä olevien yritysten muuttuvassa ympäristössä. Eri prosessinosien kehittämisen paine ja tarve ei enää perustu pelkästään taloudellisiin syihin ja tekijöihin, vaan myös ympäristön hyvinvoinnin huomiointiin päästövähennyksien ja kiertotalouden lisäämisen muodossa (Uudistuvan teollisuuden strategia: Suomen tarjottava teollisuudelle kilpailukykyinen ja ennustettava toimintaympäristö 2021). Ympäristötekijöiden huomioimista ajaa eteenpäin myös jatkuvasti päivittyvä lainsäädäntö kansallisella sekä kansainvälisellä tasolla (ks. luku 8.3.1).

2.1 Työn rajaus

Opinnäytetyö rajattiin koskemaan laskurin tekoon vaikuttanutta teoriaa, kuten kemiallista saostusta, sen osaa jätevedenkäsittelyprosessissa sekä siitä lähteviä jakeita. Kyseistä prosessitekniikkaa hyödyntävä toimiala on muun maailman teollisuuden kanssa samassa tilanteessa, jossa taloudellisten tarkastelutekijöiden rinnalle on noussut vääjäämättä myös ympäristölliset näkökulmat. Prosessin tehokkuutta ja kannattavuutta ei voida enää tarkastella pelkästään taloudellisten numeroiden kautta, vaan rinnalle ovat nousseet ympäristöystävällisyyden näkökulmasta prosessin energiatehokkuus, kasvihuonekaasupäästöt sekä ainesten kierrätyskelpoisuus. Työn teoriaosuudessa avataan mainittujen tekijöiden taustalla vaikuttaneita ajankohtaisia ilmiöitä, kuten kansainvälisiä ilmastosopimuksia ja Euroopan unionin kiertotaloustavoitteita. Jätevedenkäsittelytekniikkaan erikoistuneiden yritysten täytyy kehittyä vähintään yhtä nopeasti maailmassa vallitsevien asenteiden kanssa, jotta kilpailuetu alan markkinoilla säilyy. Prosessin kasvihuonekaasupäästöjä tarkasteleva ja vertaileva CO2e-laskuri on konkreettinen esimerkki siitä, miten yritys voi pitää itsensä ajankohtaisena ja modernina.

Hiilidioksidiekvivalenttipäästölaskuri rajattiin koskemaan kemiallista saostusprosessia ja sen lopputuotteita eli ylitevettä ja monimetallisakkaa sekä niiden loppusijoituksia. Kemiallinen saostusprosessi pitää sisällään muun muassa siinä käytetyt kemikaalit, niiden ja lähtevien jakeiden kuljetukset sekä energiankulutuksen. Laskurista rajattiin pois monimetallisakan ja yliteveden kierrätyspotentiaalit sekä mahdolliset päästövähennykset ja laiteinvestoinnit elinkaaripäästöineen, sillä niiden huomiointi ei sovellu laskurin yleispätevään luonteeseen. Prosessiteknisten tekijöiden ulkopuolelta laskurin rakentamisessa jätettiin sivuun myös GHG-protokollan mukainen raportointitapa (ks. luku 8.3.1). Toimeksiantajan kanssa käydyissä keskusteluissa todettiin, että GHG-protokolla ei ole tässä asiayhteydessä relevantti ja se tuottaisi vain turhaa sisältöä laskuriin.

2.1.1 Kestävä kehitys

Kyseisen opinnäytetyön aihe, tuotos sekä sen tarkoitus ja tavoitteet ovat vahvasti kytköksissä kestävän kehityksen useisiin eri osa-alueisiin. Yhdistyneet kansakunnat loivat kestävän kehityksen ”Agenda 30” tavoiteohjelmassaan 17 eri tavoitetta ympäristön, talouden ja ihmisten hyvinvoinnin parantamiseksi. Niiden tavoitteiden alla on erillisiä alatavoitteita yhteensä 169 kappaletta. Kuviosta 1 ilmenevien päätavoitteiden joukosta tämän opinnäytetyön sisältö koskettaa etenkin numeroita 3, 6, 9, 13, 14 sekä 15. (Kestävä kehitys n.d.)

Opinnäytetyön tuotos, jätevesien liukoisten metallien perinteisten saostusmenetelmien ja EPSE Oy:n patentoidun EPSE™ menetelmän välinen hiilidioksidiekvivalenttipäästöjen vertailulaskuri, tuo EPSE Oy:lle ja sen asiakasyrityksille tietoisuutta prosessin kasvihuonekaasupäästöistä ja niiden vähentämispotentiaalista. CO2e-päästöjen globaali vähentäminen on kestävän kehityksen näkökulmasta yksi tärkeimmistä tavoitteista laaja-alaisen hyvinvoinnin parantamiseksi. Ihmisten tuottamien hiilidioksidipäästöjen yhteys kasvihuoneilmiön voimistumiseen ja ilmastonmuutokseen on tieteellisesti korreloiva. Ilmastonmuutos on aiheuttanut ja tulee aiheuttamaan ympäristöllisiä muutoksia, joten päästöjen vähentämisellä on positiivisia vaikutuksia koskien ”Agenda 30” ohjelman ympäristöä koskevia tavoitteita 13, 14, ja 15 (ks. kuvio 1). EPSE™- menetelmä myös lisää prosessinjälkeisen puhtaan veden määrää ja vastoin vähentää prosesseissa syntyvän raskasmetallisakan määrää, millä on suora yhteys ”Agenda 30” ohjelman tavoitteisiin 3,6 ja 9. (Mt.)

Kuvio 1. YK:n Agenda 30 ohjelman 17 päätavoitetta (Kestävä kehitys n.d.)

3 Jätevedenkäsittely teollisuudessa

Teollisuudessa syntyvät jätevedet eroavat yhdyskuntajätevesistä monella tapaa. Ne voivat olla joko paljon happamampia tai alkalisempia ja ne voivat sisältää teollisuuden alasta riippuen runsaasti erinäisiä liukenemattomia tai liuenneita kiintoaineita. Esimerkiksi metalliteollisuudessa laitoksen jätevedet sisältävät ympäristön kannalta vaarallisen määrän raskasmetalleja ja selluteollisuudessa ligniiniä, eli puun kuitujen välistä luonnonlujitetta (Knowpap 2024). Näin ollen teollisuuden jätevesien käsittely on erilainen verrattuna perinteiseen yhdyskuntajätevesihuoltoon.

Teollisuuden jätevedenkäsittely eroaa tekniikaltaan toimialoittain ja laitoksittain, mutta yleistettynä se voidaan jakaa mekaaniseen, biologiseen sekä kemialliseen käsittelyyn. Mekaaninen vaihe on miltei poikkeuksetta ensimmäinen, ja siinä keskitytään kiintoaineen ja nesteen erottamiseen. Menetelmiä tähän ovat muun muassa välppäys, selkeytys, suodatus ja vaahdotus. Mahdollisten kiintoaineiden poistamisen jälkeen jätevedestä pyritään poistamaan orgaaniset pienimolekyyliset aineet biologisilla menetelmillä. Yleinen tapa on käyttää mikrobikantojen luonnollista puhdistusta, jossa jäteveteen lisätyt mikrobit käyttävät sen sisältämiä orgaanisia ravinteita ravintonaan. Ravinteet, eli orgaaninen aines, poistuvat siten hajotessaan jätevedestä biokaasun, veden, biomassan

tai esimerkiksi hiilidioksidin muodossa. Kemiallisessa käsittelyssä keskitytään jätevedessä olevien erinäisten ainesten, kuten fosforin ja raskasmetallien, saostamiseen, selkeytykseen sekä erotukseen. (Mt.)

3.1 Jätevedenkäsittely kaivosteollisuudessa

Kaivosteollisuudessa prosessin jälkeiset jätevedet sisältävät usein korkeita kuiva-ainepitoisuuksia, sulfaatteja kaivosalueen mahdollisten sulfidimineraalien vuoksi, kemikaalijäämiä sekä runsaasti liuenneita raskasmetalleja. Mainitut pitoisuudet kerääntyvät ja kasvavat, jos vettä kierrätetään prosessissa. Veden kierrätys on yleistä etenkin Suomessa tuoreveden käytön vähentämiseksi vesistöistä. Tämä korostaa tehokkaan vedenkäsittelyn tärkeyttä kaivosteollisuudessa. Perinteisiä, selkeytykseen perustuvia menetelmiä jäteveden puhdistukseen kaivosalalla ovat aktiivinen ja passiivinen menetelmä. Suositumpi aktiivinen menetelmä on käytännössä kemiallista saostamista; jäteveteen sekoitetaan saostusta edistävää kemikaalia, jonka jälkeen saostuneet ainekset laskeutuvat painovoiman vuoksi selkeytysaltaan pohjalle. Ylitevesi palautetaan prosessiin. Passiivinen menetelmä perustuu vastaavasti selkeytykseen, mutta siinä ei käytetä apukemikaaleja. Kyseisessä käsittelyssä luotetaan biogeokemiallisiin ilmiöihin, kuten esimerkiksi raudan luonnolliseen hapettumiseen, saostumiseen ja muiden metallien pidättäytymiseen syntyneiden rautasaostumien pintaan. (Kauppila, Myllyoja & Räisänen 2011, 34–36, 127.)

Saostuneet ainekset voidaan kaivoksella käytettävästä tekniikasta riippuen eriyttää kierrätettävästä prosessivedestä jättämällä ne selkeytysaltaiden pohjalle jälkisijoitusta varten tai erottaa ne myöhemmällä mekaanisella käsittelyllä. Mekaaninen käsittely voi sisältää erilaisia sentrifugeja, suodattimia, kuten paine-, imu- ja hihnasuodattimia, sekä puristimia. Mainituilla menetelmillä varmistetaan mahdollisimman tehokas prosessiveden kierrätys sekä vähempi jäljelle jäävän jätteen määrä. (Siham 2023, 15–21.)

4 Kemiallinen saostaminen

Kemiallinen saostaminen on käytetyin tapa metallien ja muiden epäpuhtauksien poistamiseen teollisesta jätevedestä. Menetelmän suosiota nostavat sen edullisuus, turvallisuus sekä prosessitek-

nisessä mielessä yksinkertaisuus. Prosessi vaatii onnistuakseen kuitenkin suuren määrän kemikaaleja ja muita haittapuolia ovat esimerkiksi myös lopputuotteena syntyvä vaikeasti uudelleenkäytettävä liete sekä menetelmän hitaus. (Adlan, Ariffin & Aziz 2008, 1578–1583.)

Kemiallinen saostaminen perustuu suurilta osin pH:n säätöön eri kemikaaleilla. Käsiteltävän jäteveden alkuhappamuudesta sekä toimialasta ja laitoksesta riippuen liuos voidaan pH:n esisäädöllä muokata ensin happamaksi. Hapan olosuhde jätevedessä tehostaa positiivisesti varautuvien hiukkasten syntymistä, mikä nopeuttaa seuraavaa mahdollista saostamisvaihetta. (Mroczko & Zimoch 2018, 15–22.) Hapan esisäätö myös puhdistaa jätevettä sekä varmistaa metallien liukenemisen mahdollisista hydroksidisaostumista ennen emäksistä saostusvaihetta (Ichlas, Mubarok, Magnalita, Vaughan & Sugiarto 2020, 2–6). Seuraavassa, tai mahdollisesti kemiallisen saostamisen ainoassa vaiheessa, jäteveden pH:ta nostetaan eli liuos muutetaan emäksiseksi. pH:n nousu vähentää metalli- ionien liukoisuutta, mikä edesauttaa niiden saostumista. pH:n nostaminen toteutetaan teollisuudessa ja kaivosteollisuudessa useimmiten kalkilla tai natriumhydroksidilla. Tätä vaihetta kutsutaan yleisesti hydroksidisaostukseksi siinä syntyvien hydroksidi-ionien vuoksi. (Li, Shammas, Vaccari & Wang 2005, 141–144.)

Kemiallinen saostus voidaan jakaa vaiheittain koagulaatioon ja flokkulaatioon. Koagulaatiossa liuos eli saostettava jätevesi muutetaan koagulantin eli saostuskemikaalin avulla epävakaaseen tilaan, jossa liuoksen sisältämät hiukkaset muuttuvat osittain sähköisiltä varauksiltaan samanmerkkisistä erimerkkisiksi. Tämä seurauksena hiukkaset törmäilevät toisiinsa muodostaen suurempia kerääntymiä keskenään, mitä kutsutaan agglomeroitumiseksi. Koagulantin lisäyksen aikana ja jälkeen on tärkeää, että liuosta sekoitetaan tasaisesti ja jatkuvasti, jotta menetelmä olisi tehokas. Flokkulaatiossa nämä rakentuneet hiukkaskerääntymät törmäilevät edelleen keskenään muodostaen suurempia flokkeja, jotka painuvat painovoiman avulla liuoksen pohjalle. (Bratby 2016, 330.)

4.1 Kalkkisaostus

Kalkki on ylivoimaisesti käytetyin kemikaali teollisuuden ja kaivosteollisuuden jätevesien kemiallisessa saostuksessa sen edullisuuden ja saatavuuden vuoksi. Se on tehokas erityisesti liuenneiden raskasmetallien muuttamisessa kiinteään faasiin. Kyseisessä menetelmässä saostamiseen käytetään kalkkilietettä, joka on valmistettu poltetusta kalkista eli kalsiumoksidista (CaO) ja vedestä. Kalsiumoksidi niin sanotusti sammutetaan, jolloin siitä muodostuu kalsiumhydroksidia ($Ca(OH)_2$)

eli sammutettua kalkkia. Kalsiumoksidia voidaan syöttää myös suoraan jäteveteen, jolloin se reagoi sen sisältämän veden kanssa. Kun kalkkiliete sekoitetaan jäteveteen, muuttuu se kalsium- ja hydroksidi-ioneiksi. Samalla liuoksen pH nousee. Vapautuneet hydroksidi-ionit yhdistyvät liuoksessa oleviin liuenneisiin metalli-ioneihin, jolloin muodostuu liukenemattomia metallihydroksideja eli liuoksessa tapahtuu saostumaa. Vastaavasti aiemmin vapautuneet kalsiumionit yhdistyvät happaman jäteveden sisältämien sulfaatti-ionien kanssa muodostaen kipsiä, mikä nopeuttaa metallien saostumista. (Aubé & Lee 2015, 2–4.)

4.2 Lopputuotteet

Yleisesti käytetystä menetelmästä riippumatta kemiallisen saostuksen lopputuotteina ovat liete tai sakka ja selkeytynyt kirkaste eli ylitevesi. Teollisuudenalasta riippuen liete sisältää vaihtelevan määrän orgaanisia ja epäorgaanisia epäpuhtauksia, kuten raskasmetalleja, sulfideja, puhdistuskemikaaleja sekä suuren määrän vettä (Grifoni, Pedron, Petruzzelli & Rosellini 2019, 596–598). Lietteellä, sisältämiensä komponenttien mukaisesti, on myös moninaisia käyttökohteita ja loppusijoituksia. Yleisimmät hyötykäytöt piilevät lietteen hyödyntämisessä energiana tai kiertotalousmateriaalina, jolloin siitä pyritään ottamaan talteen jotain uudelleenkäytettävää materiaa teollisuudenalasta riippuen (Kierrätyksestä kiertotalouteen 2022). Esimerkiksi Suomen metsäteollisuudessa liete usein poltetaan kuivattuna tehtaan omassa kattilassa, jolloin liete kierrätetään lämpöenergiana (Alakangas, Hurskainen, Korhonen & Laatikainen-Luntama 2016, 166–167). Saman alkuperän kuitupitoista lietettä voidaan hyödyntää myös esimerkiksi maanparannusaineena peltoviljelykäytössä (Termonen 2022). Ylitevesi voidaan palauttaa riittävällä puhtaustasolla takaisin vesistöön tai kierrättää uudelleen prosessivetenä.

5 Raskasmetallipitoiset jäte- ja prosessivedet

Tietyt teollisuudenalat, kuten esimerkiksi kaivos-, metalli-, metsä- ja kemianteollisuus, tuottavat prosesseissaan korkeasti raskasmetallipitoisia jätevesiä. Korkea metallipitoisuus tuottaa jätevedenkäsittelylle ongelmia monesta eri näkökulmasta. Raskasmetallit ovat haitallisia sekä ihmisen terveydelle että ympäristölle, minkä seurauksena laitoskohtaisen jätevedenkäsittelyn on toimittava korkealla tasolla niiden tehokkaaksi erottamiseksi. Tätä valvoo jatkuvasti tiukentuva lainsäädäntö, ylläpitää ympäristölupien raja-arvot sekä tarkkailee kunnalliset jätevedenpuhdistuslaitokset, jos teollisuuslaitoksen oman jätevedenkäsittelyn jälkeinen ylitevesi johdetaan viemäriin.

(Toimintamallit teollisuusjätevesisopimusten haastaviin tilanteisiin 2023, 5–7.) Mahdollisilla ylitevedenraskasmetallijäämillä on negatiivinen vaikutus kunnallisen jätevedenpuhdistuslaitoksen lietteen hyötykäyttömahdollisuuksiin. Teollisuuden jätevedet ovat usein myös pH:ltaan eriäviä verrattuna yhdyskuntajäteveteen, ja liian emäksiset tai happamat jätevedet vahingoittavat neutraalimpaa happamuutta varten rakennettua viemäriverkostoa. (Finnish industrial wastewater guide. Conveying non-domestic wastewater to sewers 2018, 45–49.) Prosessiteknisestä näkökulmasta raskasmetallien erottaminen jätevedestä on hidasta sekä se vaatii suuren määrän saostuskemikaalia, mikä tuo jätevedenkäsittelyn osastolle lisäkustannuksia. Suurin ongelma ja kehityskohde on kuitenkin kemiallisen saostuksen jälkeinen raskasmetallisakka eli liete sekä sen kierrätys. (Adlan ym. 2008, 1578–1583.)

Raskasmetallipitoisten jätevesien käsittely voidaan myös ulkoistaa, jos se koetaan niitä tuottavalla laitoksella tarpeettomaksi tai mahdottomaksi. Varsinkin Suomessa on laajasti yksityisiä yrityksiä, jotka lupaavat hoitaa jätevedenkäsittelyn joko itse laitoksella tai yrityksen omissa tiloissa. Tässä tapauksessa metallipitoinen jätevesi kerätään erilliseen altaaseen, josta se tavalla tai toisella, esimerkiksi imuautolla, kuljetetaan prosessitehtaalta muualle. Tällöin jätevedenkäsittely tuottaa myös logistisia kustannuksia ja päästöjä, eikä jätevedestä voida hyödyntää kierrätettäviä aineksia, kuten ylitevettä ja metalleja, niitä tuottavalla laitoksella. (Saastamoinen & Tuorila 2022, 25–29.)

5.1 Raskasmetallisakka ja sen loppusijoitus

Teollisen kemiallisen saostuksen seurauksena syntyvä sakka tai liete on usein raskasmetalli-, sulfaatti- tai öljypitoista, mikä tekee sen hyötykäytöstä tai ainesten kierrätyksestä hankalaa ja kallista. Mainitut pitoisuudet tekevät sakasta myös terveydelle ja ympäristölle vaarallisen, joten se luokitellaan valtiokohtaisista säädöksistä riippuen ongelmajätteeksi. Tästä koituu sakkaa tuottavalle laitokselle kustannuksia, kun sakka täytyy mahdollisesti esikäsitellä, esimerkiksi kuivata, ongelmajätelaitoksen vaatimusten mukaiseksi. Sakan lastaaminen ja kuljetus, kuten myös itse ongelmajätelaitoksen palvelu, tuottavat edelleen lisäkustannuksia. (Ching-Hong, Shang-Lien, Ching-Yao, Kaimin, Wen-Hui & Ching-Lung 2008, 1694-1695.)

Kaivosteollisuudessa kaivannaisalueet sijaitsevat usein kaukana kaupungeista ja ongelmajätteen käsittelylaitoksista, jolloin vedenerotuksen jälkeinen mineraalirikas liete kasataan kaivosalueen läheisyyteen loppusijoitusta varten. Kasaaminen toteutetaan usein samaan tilaan rikastushiekan

kanssa, joka on malminrikastuksen sivutuote. Se koostuu kivistä, hiekasta, vedestä, rikastuskemikaaleista sekä saostussakan tavoin arvokkaista mineraaleista, kuten metalleista. Liete voidaan kasata myös Talvivaaran kaivoksen tavoin sivukivien läjitysalueelle tai omaan vesitiiviiseen altaaseen riippuen lietteen laadusta ja loppusijoitukselle asetetuista vaatimuksista. (Kauppila ym. 2011, 78–81.)

6 Raskasmetallit ympäristössä

Raskasmetallien määritelmä vaihtelee valtioittain, mutta esimerkiksi Suomessa raskasmetalleiksi ovat määritelty ympäristöministeriössä (Jätteen luokittelu vaaralliseksi jätteeksi – päivitetty opas 2019, 131) aakkosjärjestyksessä kaikki antimoni-, arseeni-, kadmium-, kromi-, kupari-, lyijy-, elohopea-, nikkeli-, seleeni-, telluuri-, tallium- ja tinayhdisteet. Luokitus perustuu mainittujen alkuaineiden suureen tiheyteen verrannossa muihin samankaltaisiin alkuaineisiin. Mainitut alkuaineyhdisteet ovat luetteloituna vaarallisten jätteiden listalla, vaikka ne ovat luonnollisesti esiintyviä yhdisteitä. Raskasmetallit liukunevat ympäristössä veteen, josta ne imeytyvät kasvillisuuteen ja lopulta kerääntyvät kasvissyöjien elimistöön sekä sitä myötä ihmiset sisältävään ravintoketjuun. Ne eivät hajoa elimistössä, joten lopulta ne kasautuvat ravintoketjun huipulle. Riittävän pitoisuuden kerryttyä elimistöön raskasmetallit aiheuttavat vakavia terveysongelmia kuten hermostovaurioita, syöpää, erilaisia elinsairauksia sekä ääritapauksissa kuoleman. (Barakat 2010, 361–362.)

Teollisuudessa prosessivesien sisältämien raskasmetallien pääsy ympäristöön on viemäriverkostojen, lähellä olevien vesistöalueiden ja yleisestikin lyhyempien etäisyyksien vuoksi paremmin valvottua ja kontrolloitua kuin kaivosteollisuudessa, jossa raskasmetallipitoiset rikastushiekat sekä jätevesisakat kerätään kaivosalueelle luotuihin massiiviin altaisiin riippuen valtiosta ja sen ympäristösäädöksistä. Näiden niin kutsuttujen läjitysalueiden suuri kokoluokka ja pitkäaikaisuus kasvattavat raskasmetallien ympäristöön karkaamisen riskiä. Ne ovat ajan saatossa luonnollisesti alttiimpia vuodoille sekä maanvajoamille ja -sortumille. Riskit päästöistä kasvavat kuitenkin suuremmiksi, kun kaivos suljetaan. Vettä ei enää poisteta läjitysaltaasta, jolloin vedenpinta pääsee nousemaan ja lopulta päätyy kosketuksiin ilmakehän hapen kanssa. Altaan sulfidipitoiset mineraalit hapettuvat, mikä nostaa läjitysaineksen happamuutta, jolloin liukenemattomat raskasmetallit liukenevat veteen. Mahdolliset entistä metallipitoisemmat vuodot jatkuvat ja vedenpinta jatkaa nousuaan altaassa, kunnes se vuotaa reunojen yli ja lopulta maaperään ja vesistöön. Ilmiö voidaan

välttää rikastushiekan ja jäteveden pH:n neutralisoinnilla ennen siirtämistä läjitysalueelle sekä kaivoksen sulkemisen jälkeen jatkuvalla vesihuollolla ja -valvonnalla. (Park, Tabelin, Jeon, Li, Seno, Ito & Hiroyoshi 2019, 588-606.)

7 Metallien talteenotto sakasta

7.1 Vihreä siirtymä ja kasvava metallien tarve

Vihreällä siirtymällä tarkoitetaan yhteiskunnallista muutosta kohti hiilineutraaliutta, minkä keinoina ovat esimerkiksi luopuminen fossiilisista polttoaineista, uudet ympäristöystävälliset innovaatiot, sähköistyminen uusiutuvan energian avulla sekä kiertotalous. Siirtyminen päästöttömään yhteiskuntaan edellyttää kuitenkin paljon resursseja muutoksen vaatiman modernisoidun infrastruktuurin, liikenteen, energiantuotannon ja etenevän digitalisaation nimissä. Yksi tarvituimmista resursseista vihreää siirtymää varten ovat metallit. Keskeiset vihreän siirtymän mahdollistavat innovaatiot, kuten sähköautojen akut, aurinkopaneelit, tuulivoimalat sekä digitalisaation työkalut, kuten älypuhelimet, vaativat rakennusosikseen niiden valmistusmäärään suhteutettuna valtavan määrän erilaisia metalleja. (Pirtonen 2021.) Erään Tiede-lehden artikkelin mukaan EU:n vuoden 2050 nettonollapäästötavoitteen saavuttaminen kasvattaa kaivannaismineraalien, kuten koboltin, kuparin, litiumin, nikkelin ja muiden harvinaisten maametallien, tarvetta jopa kuusinkertaiseksi (Lawton 2022).

Kasvava metallien tarve on luonnollisesti johtanut metallien louhinnan eli kaivosteollisuuden aktiivisuuden kasvuun. Tuotannon määrän kasvua voidaan mitata kaivosteollisuuden synnyttämän vaarallisen jätteen määrällä vuositasolla. Kaivosteollisuuden vaaralliset jätteet muodostuvat pääosin tuotannossa syntyneistä sivukivistä, rikastushiekoista ja lietteistä. Vuonna 2020 Suomen kaivosteollisuudessa tuotetun vaarallisen jätteen määrä oli noin 17,8 miljoonaa tonnia. Vuonna 2021 määrä oli 25 miljoonaa tonnia, mikä tarkoittaa pyöristettynä 40 prosentin kasvua. Kasvua selittää myös kyseisessä vuodenvaihteessa muuttuneet luokittelu- ja aineistomuutokset. (Vaarallisen jätteen määrä moninkertaistui kaivostoiminnassa – syynä aineiston täydentyminen ja luokittelumuutokset 2023.) Tuotannon kasvua mitataan kuitenkin tavallisesti louhitun malmin määrän perusteella. Esimerkiksi Suomessa louhittiin vuonna 2017 13 prosenttia enemmän malmia kuin vuonna 2016 kaikilla yhdeksällä metallimalmikaivoksella. (Metallimalmikaivokset ja metallinjalostus n.d.)

Kaivosteollisuus ja neitseellisten metallien kasvava louhinnan määrä ei ole ongelmatonta. Yksi tilastollisesti huomiota herättävimmistä kaivannaistoiminnan ongelmakohdista on kaivannaisjätteiden määrä. Suomen työ- ja elinkeinoministeriön mukaan kaivannaisjätteet, eli pääosin sivukivet ja rikastushiekat, edustavat jopa kolme neljäsosaa kaikesta vuosittain tuotetusta jätteestä Suomessa. Esimerkiksi vuonna 2021 kokonaisjätteiden määrä oli pyöristettynä 125 miljoonaa tonnia, ja kaivannaisjätteiden osuus oli siitä noin 94 miljoonaa tonnia. (Työryhmä esittää ratkaisuja kaivannaisjätteiden hyödyntämiseksi 2024.)

Valtiokohtaisten jätteiden syntyvää määrää halutaan luonnollisesti vähentää, ja louhinnan kasvava määrä ei sitä tavoitetta tilastollisesti tue. Läjitetyt jätteet sisältävät väärinkäsiteltyinä päästöriskejä vesistöihin, maaperään ja ilmaan. Itse kaivostoiminta tuottaa myös laajalla skaalalla erilaisia päästöjä, kuten pakokaasu-, melu-, öljy- ja pölypäästöjä. Kaivannaisalueen perustamisella on päästöjen ja jätteiden lisäksi myös muita negatiivisia ympäristövaikutuksia, kuten maisemahaitat, puuston ja kasvillisuuden raivaamistarve sekä häiriöt paikalliselle eläimistölle. (Kauppila ym. 2011, 63–88.)

Vihreän siirtymän edetessä etenkin harvinaisten maametallien saatavuus muuttuu entistä kriittisemmäksi. Hokan ja Eilun (2023) mukaan kasvava metallimineraalien kysyntä tuottaa huolen niiden riittämättömyydestä, joten varantoja eli mineraaliresursseja on löydettävä lisää. Toinen vaihtoehto metallien saamiseksi on niitä koskeva kiertotalouskonsepti. Kiertotaloudella vähennettäisiin luonnonvarojen kulutusta ja negatiivisia ympäristövaikutuksia, kuten päästöjä, sekä luotaisiin uusia toimialoja tulevaisuuden yrityksille, mikä tuottaa pitkällä jänteellä talouskasvua.

Yksi merkittävimmistä metallikiertotaloutta ajavista tekijöistä on kysynnän ja tarjonnan lain täyttämisen lisäksi omavaraisuus. Globaalien toimitusketjujen riskit metallien saannin osalta poistuisivat eikä raaka-aineiden saatavuus olisi enää niin suuri kysymysmerkki. Mainitut tekijät kasvattaisivat huoltovarmuutta sekä vähentäisivät geopoliittisten tapahtumien vaikutusta siihen. (Tulevaisuusselonteon 1. osan strateginen toimintaympäristöanalyysi 2024, 164–169.) Metallien kierrätyksellä ja talteenotolla on näin ollen suuri ja laajalla skaalalla vaikuttava potentiaali, jota ei vielä hyödynnetä täydellä mahdollisella kapasiteetilla. Jäteveden kemiallisen saostuksen jälkeisen metallipitoisen sakan uusiokäyttö on yksi merkittävimmistä mahdollisuuksista metalleja koskevan kiertotalouden edistämiseksi.

7.2 Tekniikka ja toteutus tänä päivänä

Kemiallinen saostus on yleinen ja vanha metodi metallien erottamiseksi prosessijätevedestä, mutta prosessin jälkeisen metallisakan uusiokäyttö on vielä harvinaista. Tänä päivänä erotettu metallisakka päätyy ensisijaisesti ongelmajätteenkäsittelylaitokselle, polttoon tai kaivosteollisuudessa läjitysalueelle. Ympäristön kannalta epäsuotuisimmassa skenaariossa loppusijoituksena käytetään luontoa, esimerkiksi vesistöjä. Loppusijoitukseen vaikuttavat valtion lait tai direktiivit, joiden tiukkuudet vaihtelevat suuresti. Esimerkiksi Kiinassa eräällä metallipinnoitustehtaalla syntyvä metallisakka sekoitetaan sementtiin, kalkkiin tai lentotuhkaan ja viedään kaatopaikalle loppusijoitukseen. Tämä ratkaisu aiheuttaa pitkäaikaisia ympäristöhaittoja, kun raskasmetallit pääsevät liukenemaan hitaasti maaperään ja lähivesistöihin. (Du, Zeng, Zhang, Xiao, Zhang, Cao, Li, Wang, Guan & Wu 2023, 1-3.)

Teollisessa mittakaavassa metallien kierrätys kemiallisen saostuksen jälkeisestä lietteestä on globaalisti miltei olematonta, mutta pilotteja ja laboratoriotestejä toteutetaan ympäri maailmaa. Tšekissä eräällä galvanointilaitoksella suoritettiin vuosina 2020–2022 testiajoja puoliteollisessa mittakaavassa puhtaan sinkin erottamiseksi prosessin jälkeisestä, kemiallisella saostuksella käsitellystä lietteestä. Lopputuloksena saatiin 99,95 % puhtausaste kolmivaiheisella prosessilla, johon kuuluivat natriumhydroksidiliuotus, suodatus sekä elektrolyysi. Puhdistusprosessi oli artikkelin mukaan aikaa vievä ja herkkä eri pitoisuuksille ja annostuksille, ja se vaati alhaista rautapitoisuutta, mitä galvanointiliete ei normaalisti ollut. Tutkimuksessa tuli ilmi, ettei sinkkiä ole taloudellisesti ja ajallisesti järkevää yrittää erottaa lietteestä. (Drápala, Rigoulet, Brožová, Malcharczíková, Langová, Vontorová, Nétek, Kubáč, & Janáček 2022, 24–25.)

Eräässä kiinalaisessa tutkimuksessa pyrittiin kehittämään kahden kiinalaisen galvanointitehtaan korkeasti kromi- ja rautapitoisia lietteitä loppukäyttöä varten. Tutkimusartikkelissa mainitaan muutama perinteinen tapa kyseiselle teollisuudenalalle tyypillisen metallipitoisen lietteen hyödyntämiseen. Yksi yleisin tapa on hyödyntää kromipitoista lietettä rakennusmateriaalien, kuten tiilien, sementin tai värillisen lasin, valmistuksessa. Lietteen kromi pelkistetään ja sekoitetaan sinkki-, alumiini- ja magnesiumpitoiseen seokseen, jolloin seoksesta tulee vahvarakenteista. Lietteen mahdollinen korkea rautapitoisuus estää kuitenkin rakennusmateriaalina kierrättämisen, sillä se korvaa alumiinin tai piin lopputuotteen kiderakenteessa ja tekee siitä heikomman. Tällöin lietteen muita

kierrätysvaihtoehtoja ovat lisäaineena hyödyntäminen rautasulattamolla ja sideaineena käyttäminen sekä muuntaminen KOH-aktivoiduksi hiileksi tai polymeeriseksi rautasulfaatiksi. (Yu, Ying, Yanwen, Suiyi, Dongxu, Tong, Xinfeng & Xianze 2022, 510.)

Suomessa tutkitaan jatkuvasti mahdollisia uusiokäyttökohteita lietteelle. Esimerkiksi teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:n johtamassa tutkimuksessa kartoitettiin koboltin talteenottoa rikastushiekasta bioliuotuksen avulla eräällä ruotsalaisella kaivoksella. Menetelmässä käytettiin mikro-organismeja, jotka hapettavat rautaa ja rikkiä lietteestä koboltin ja muiden arvokkaiden metallien talteen ottamiseksi. Minipilotointikokeella saatiin muun muassa bioliuotuksen lopputuloksena 100 % sinkki-, 87 % koboltti- ja 67 % nikkelipitoisuudet lopputuotteille. Metallien selkeytymisaika jatkuvassa prosessissa oli kuitenkin noin 10 päivää, joten menetelmää voidaan pitää suhteellisen hitaana. (Mäkinen, Salo, Khoshkhoo, Sundkvist & Kinnunen 2020, 1–6.)

7.3 Lainsäädäntö ja kansainväliset sopimukset

Valtiokohtaisilla lainsäädännöillä sekä muilla kansainvälisillä sopimuksilla voidaan vaikuttaa metallien talteenoton ja kierrätyksen asteeseen kemiallisen saostusprosessin jälkeisestä lietteestä. Tavoitteina ovat metallien kierrätysasteen kasvattaminen ja täten neitseellisen luonnonvarojen käytön ehkäiseminen sekä syntyvien jätteiden määrän vähentäminen. Esimerkiksi Suomessa valmistellaan uutta, nykyistä jätelakia korvaavaa kiertotalouslakia, jonka tavoitteina ovat kiertotalouden edistäminen ilmiönä ja taloudenalana. (Työryhmä valmistelemaan uutta kiertotalouslakia 2024.) Kyseisen lain takana on valtioneuvoston vuonna 2021 tekemä päätös kiertotalouden strategisesta ohjelmasta, jonka tavoitteena on tehdä Suomesta hiilineutraali kiertotalousyhteiskunta vuoteen 2035 mennessä. Resurssien tuottavuus ja materiaalien, kuten metallien, kiertotalousaste aiotaan kaksinkertaistaa vuoteen 2035 mennessä. Muutos on tarpeellinen, sillä vuonna 2021 Suomen materiaalikulutus per henkilö oli Euroopan suurin sekä kansallisen kiertotalousaste oli matalampi kuin EU:n keskiarvo. (Kiertotalouden strategisen ohjelman toimeenpano 2021.)

Kiertotalouden strateginen ohjelma perustuu osin Euroopan unionin ilmastoneutraaliustavoitteeseen vuoteen 2050 mennessä, jonka saavuttamiseksi luotiin vuonna 2015 EU:n kiertotalouden toimintasuunnitelma. Toimintasuunnitelman pohjalta EU luo lainsäädäntöehdotuksia ja direktiivejä jäsenvaltioilleen, kuten Suomelle, ilmasto- ja kiertotaloustavoitteiden saavuttamiseksi. Kiertota-

louden edistämisen kannalta keskeiset toimintasuunnitelman pohjalta luodut direktiivit koskettavat jäsenmaiden jätehuoltoa. (Kiertotalouden edistäminen EU:ssa n.d.) Esimerkiksi EU:n jätedirektiivin mukaan jäsenvaltioiden tulee kierrättää jopa 60 % syntyneestä yhdyskuntajätteestä vuoteen 2030 mennessä (Kestävä jätehuolto: EU:n toimet 2018). Vuonna 2006 luodulla kaivannaisjätedirektiivillä pyritään muun muassa kehittämään kaivannaisjätteiden varastointia sekä turvallisuutta happamien valumien ja maaperän pilaantumisen ehkäisemiseksi (Direktiivi 2006/21/EY).

Maaliskuussa 2024 hyväksytty EU:n kriittisiä raaka-aineita koskeva säädös on tuorein ja eniten teollisuuden ja kaivosteollisuuden metallien talteenottoa ja kierrätystä koskeva kansainvälinen sopimus. Säädöksen mukaan vihreässä siirtymässä vaaditut metallit, kuten nikkeli, koboltti, litium ja kupari, luokitellaan kriittisiksi ja strategisiksi raaka-aineiksi. Kuvailevat nimikkeet perustuvat raaka-aineiden globaaliin kysyntään, taloudelliseen merkitykseen sekä suureen toimitushäiriöiden riskiin. Säädöksen tavoitteena on muun muassa EU:ssa kulutettujen ja kriittisten raaka-aineiden 25 % vuosittainen omavaraisuus kierrätyksen kautta. Motivaatio säädöksen takana piilee geopolitiikan ja omavaraisuuden kasvattamisen takana; kriittiset raaka-aineet tulevat pääosin EU:n ulkopuolelta, ja resurssiriittävyyden sekä huoltovarmuuden vuoksi niitä halutaan kierrättää EU:n sisällä enemmän. (EU:n kriittisiä raaka-aineita koskeva säädös EU:n tulevien toimitusketjujen tueksi 2024.)

8 Hiilidioksidiekvivalenttipäästöt

8.1 Kasvihuoneilmiö ja ilmastonmuutos

Vihreän siirtymän, kiertotalouden sekä kokonaisuudessaan koko energiamurroksen alkamisen yhtenä merkittävimpänä syynä on pyrkimys ihmisen toiminnan seurauksena syntyvien kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen. Kaasujen ylläpitämä kasvihuoneilmiö on elämän edellytys maapallolla ja luonnollinen ilmiö, jossa ilmakehän kasvihuonekaasut päästävät auringon lämpösäteilyn läpi maan pintaan asti ja estävät osittain lämmön karkaamista takaisin ilmakehän ulkopuolelle. Ilmiön ansiosta maan pinnan keskilämpötila on noin +14°C ja ilman ilmiötä se olisi noin -18°C. Luonnollisia kasvihuonekaasuja maapallon ilmakehässä ovat hiilidioksidi (CO_2), vesihöyry (H_2O), metaani (C_4), otsoni (O_3) sekä dityppioksidi (N_2O). Ihmiskunta on kasvattanut runsaasti joidenkin mainittujen kaasujen pitoisuutta toiminnallaan, kuten fossiilisten polttoaineiden polttamisella, jolloin kasvihuoneilmiö on voimistunut. Maapallo on sitä myötä lämmennyt nopeasti verrattuna esi-

teolliseen aikaan, mikä on johtanut kiihtyneeseen ilmastonmuutokseen, yhteen suurimpaan maailmanlaajuiseen kriisiin. Merkittävin ilmastonmuutosta kiihdyttävä kasvihuonekaasu on fossiilisten polttoaineiden polttamisesta syntyvä hiilidioksidi. (Mitä ilmastonmuutos on n.d.)

8.2 Ilmastosopimukset

Globaali huoli ilmastonmuutoksen aiheuttamista muutoksista maapallolla on aikaansaanut lukuisia kansainvälisiä sekä kansallisia sopimuksia ja lainsäädännöllisiä keinoja ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi. Ensimmäinen suuri kansainvälinen ilmastosopimus solmittiin Rio De Janeirossa Yhdistyneiden Kansakuntien, lyhennettynä YK:n, kesken vuonna 1992. Kyseisessä puitesopimuksessa sovittiin tavoitteet ilmastonmuutoksen hillitsemisen keinoille sekä vastuunjaosta teollisten ja kehittyvien maiden kesken. Vuoden 1992 sopimus oli ensimmäinen askel päästöjen raportoinnin kannalta, sillä siinä vaadittiin teollisuusmailta vuosittaisia kasvihuonekaasupäästöjen inventaarioraportteja. Sopimus ei itsessään sisältänyt vaatimuksia päästöjen vähentämisestä jäsenvaltioille. (Kansallisen kasvihuonekaasujen päästölaskennan tietojen hyödyntäminen ilmastotyön tukena 2023, 60–61.)

Vuonna 1997 laadittu alkuperäisen ilmastosopimuksen alainen Kioton pöytäkirja oli ensimmäinen jäsenvaltioiden kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen oikeudellisesti sitova sopimus. Kyseisessä sopimuksessa sovittiin teollisuusmaiden päästöjen vähentämisestä 1. vertailukaudelle 2008–2012 vähintään viisi prosenttia verrattuna valtiokohtaisiin vuoden 1990 päästöihin. Vuonna 2012 ensimmäisen vertailukauden päätyttyä sovittiin Dohassa Kioton ilmastosopimuksen jatkamisesta 2. vertailukaudelle 2013–2020. Yhteinen keskimääräinen päästövähennystavoite oli 18 prosenttia verrattuna vuoden 1990 päästöihin. EU:n yhteiseksi sovittu tavoite oli 20 prosenttia. (Mts. 61–62.)

Pariisin ilmastosopimus allekirjoitettiin vuonna 2015. Kioton pöytäkirjasta poiketen siinä ei sovittu valtiokohtaisista sitovista päästövähennysvelvoitteista, vaan yhteisestä tavoitteesta, jonka pohjalta valtiot ovat luoneet kansalliset panoksensa. Yhteinen tavoite tähtää globaalin lämpötilan nousun jäämiseen alle kahteen asteeseen verrattuna esiteolliseen aikaan. Esimerkiksi EU:lla on jäsenmaidensa kesken yhteinen panos, jonka mukaan EU:n tulisi vähentää kasvihuonepäästöjensä nettopäästöjä vähintään 55 prosenttia vuoteen 2030 mennessä. (Mts. 63.)

8.3 EU, Suomi ja hiilidioksidipäästöjen raportointi

Vuonna 2021 luodun EU:n ilmastolain mukaan alueen hiilinielujen määrä tulee olla hiilipäästöjä suurempi vuoteen 2050 mennessä. Sitä ennen, vuonna 2030, kasvihuonekaasupäästöistä tulisi olla leikattu 55 prosenttia Pariisin ilmastosopimuksen mukaisesti. (Asetus 2011/1119.) Tavoitteen saavuttamiseksi EU:n sisällä luotiin 55-valmiuspaketti, jonka avulla Euroopan Unionin lainsäädäntöä päivitetään ilmastotavoitteiden mukaisesti. Euroopan komissio luo ehdotuksia uusista ilmastotoimista tai olemassa olevien säädösten päivittämisestä ja ehdotus etenee EU:n neuvoston käsiteltäväksi. Neuvoston eri osastojen käsiteltyä ehdotuksen jäsenmaiden ministerit kokoontuvat keskustelemaan ehdotuksesta yhteisymmärryksen saamiseksi. Neuvostosta menettely etenee kolmikantaneuvotteluihin, jossa puheenjohtajamaa, parlamentti ja komissio neuvottelevat ehdotuksen yksityiskohdat ja laativat sopimuksen sekä sen sovellettavan lainsäädännön. Lopulta 55-valmiuspaketin menettelyjen tuloksena ovat erilaiset ilmastotoimia koskevat asetukset ja niiden säännöt sekä direktiivit EU:n jäsenmaille. (55-valmiuspaketti: miten EU muuttaa ilmastotavoitteet lainsäädännöksi 2024.)

Suoran lainsäädännön lisäksi EU vaikuttaa jäsenmaidensa kasvihuonekaasujen vähentämistoimiin esimerkiksi jakamalla kansallisia tavoitteita taakanjakoasetuksen kautta. Tavoitteet ovat jaettu jäsenvaltioille suhteellisen vaurauden mukaan, eli toisin sanoen taloudellisesti heikoimmille valtioille on jaettu vähemmän kunnianhimoiset tavoitteet. Jaettujen tavoitteiden saavuttamiskeinot saavat jäsenmaat päättää itse. (EU:n kasvihuonekaasupäästöjen leikkaaminen: vuoden 2030 kansalliset tavoitteet 2018.) Taakanjakoasetuksen koskettamien alojen, eli meriliikenteen, rakennusteollisuuden, maatalouden, jätehuollon ja pienteollisuuden alojen osalta Suomen päästöt tulisivat pienentyä asetuksen mukaan 50 prosenttia vuoteen 2030 mennessä (Asetus 2023/857).

EU:n ilmastolain, asetusten ja direktiivien sekä taakanjakoasetuksen pohjalta Suomi on luonut oman kansallisen ilmastopolitiikansa YK:n, EU:n ja omat tavoitteet huomioiden. Luodun ilmastolain (423/2022) mukaan Suomen tulee olla hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä. Ilmastolaissa määritellään myös päästövähennystavoitteet vuosille 2030, 2040 ja 2050, jotka ovat -60 %, -80 % ja -90 % per vuosikymmen verrattuna vuoden 1990 päästötasoon. Tavoitteita pyritään saavuttamaan kansallisen lainsäädännön toimin. (Suomen kansallinen ilmastopolitiikka n.d.)

Ilmastopolitiikan suunnittelemista ja tavoitteiden saavuttamista varten tarvitaan kansallisella tasolla ajankohtaista tietoa kasvihuonekaasupäästöistä. Tietoa kerätään kansallisella tasolla seurannalla ja raportoinnilla, jonka jälkeen luodaan niin kutsuttu valtiokohtainen kasvihuonekaasuinventaario, joka raportoidaan vuosittain YK:lle. Euroopan Unionin jäsenmaat raportoivat myös EU:lle. Suomen kansalliseksi vastuuyksiköksi vuosittaisen kasvihuonekaasuinventaarion keräämiseen on valittu ilmastolaissa (423/2022) Tilastokeskus. (Mt.)

8.3.1 CSRD-direktiivi, GHG-Protokolla, hiilidioksidiekvivalentti ja päästökertoimet

Yritysten kestävyysraportoinnin vahvistamiseksi allekirjoitettiin vuonna 2023 kestävyysraportointidirektiivi CSRD. Myöhemmin samana vuonna sen alaiseksi laadittiin ESRS-kestävyysraportointistandardit. CRSD-direktiivi kehittää yritysten kestävyysraportointia ja tekee siitä lakisääteistä. CSRD-direktiivi koskettaa vuonna 2024 suuria yrityksiä, mutta se laajentuu vuonna 2025 myös keskisuuriin ja pieniin yhtiöihin. ESRS-standardeilla tarkennetaan kestävyysraportoinnin yhteisiä tapoja ja keinoja. ESRS-standardit vaativat yritysten toimintakertomuksiin erinäisistä standardeista koostuvan erillisen kestävyysselvityksen. Näitä standardeja on yhteensä 12, joista viisi koskettaa ympäristöasioita. Ne jaetaan keskenään osiin ESRS-E1-E5. E1 on kasvihuonekaasupäästöjen raportoinnin osalta osioista merkittävin, sillä se vaatii tiedot kasvihuonekaasupäästöistä koko yrityksen tasolla. Päästöt tulee raportoida GHG-protokollan mukaisesti. (Niskala & Palmuaro 2023, 13–14, 42–43, 59.)

GHG-protokolla on yritysten laajasti käyttämä maailmanlaajuinen päästölaskentastandardi, jossa yrityksen, alueen tai organisaation päästöt jaetaan kolmeen eri osioon, Scope 1–3. Scope 1 kattaa suorat päästöt, kuten kattiloiden ja ajoneuvojen polttoainepäästöt. Scope 2 sisältää epäsuorat päästöt, kuten ostoenergian tai -sähkön tuotannon päästöt. Scope 3 huomioi muut epäsuorat päästöt, kuten kulutettujen palveluiden ja tuotteiden tuotantopäästöt sekä organisaatiossa kulutetun energian tuotantopäästöt. (Kansallisen kasvihuonekaasujen päästölaskennan tietojen hyödyntäminen ilmastotyön tukena 2023, 44.)

GHG-protokollassa, kuten monissa muissakin päästölaskentatavoissa, kasvihuonekaasut raportoidaan hiilidioksidiekvivalentteina CO_2e. Eri kaasuille on määritetty hallitustenvälisessä ilmastonpuutospaneelissa (IPCC) GWP-kertoimet, jotka kertovat tietyn kaasupäästön aiheuttaman lämmitysvaikutuksen eli säteilypakotteen verrannossa hiilidioksidiin. Hiilidioksidille on asetettu GWP-

kerroin 1 tarkasteluajanjaksoille 20 ja 100 vuotta. Esimerkiksi metaanin GWP-kerroin 20 vuoden tarkastelujaksolla on 84 ja 100 vuoden tarkastelujaksolla 28. Tuotetut kaasupäästötonnit kerrotaan kaasulle osoitetulla GWP-kertoimella halutulla tarkasteluajalla. Lopulta GWP-kertoimilla muokatut kasvihuonekaasupäästöt lasketaan yhteen ja summaa kutsutaan yleisnimellä hiilidioksidiekvivalentti. (Mts. 26–27.) Kaasujen lisäksi myös erilaisille kulutettaville asioille, kuten sähkölle, kaukolämmölle, polttoaineille sekä esimerkiksi jossain prosessissa kulutetuille kemikaaleille on luotu samalla periaatteella päästökertoimia päästöinventaarioiden avuksi. (CO2-päästökertoimet 2024.)

9 Opinnäytetyön toteutus

9.1 Tutkimusmenetelmä

Opinnäytetyö toteutettiin toiminnallisen kehittämistyönä. Toiminnallisella kehittämistyöllä tarkoitetaan toimintaa, jossa toimeksiantajalle kehitetään haluttu tuotos, kuten opas, malli, video tai jokin muu käytännön sovellus ja sen tekemisestä sekä vaiheista kirjoitetaan raporttimuotoinen kirjallinen selvitys. Toiminnallinen kehittämistyö tehdään tutkimuksellisella otteella, mutta uuden tiedon hankkimista erilaisia tutkimusmenetelmiä hyödyntäen ei välttämättä vaadita halutun tuotoksen luomista varten tarvitun tiedon ollessa jo valmiina toimeksiantajan puolesta tai aiheeseen liittyvässä kirjallisuudessa. Uuden tiedon hankkimisen puutteen vuoksi kyseistä kehittämistyötä ei kutsuta tutkimukselliseksi, vaan toiminnalliseksi kehittämistyöksi. (Kostamo, Airaksinen & Vilkka 2022, 11–16, 90.)

Opinnäytetyön tuotoksen ollessa numeraalinen vertailulaskuri sen valmistuksen menetelmää voidaan kutsua määrälliseksi eli kvantitatiiviseksi analyysiksi. Työssä keskityttiin laskurin kannalta olennaisten numeeristen tietojen keräämiseen olemassa olevan kirjallisen tiedon perusteella. Kyseiset numeeriset arvot lisättiin Microsoft Excel-taulukkolaskentaohjelmaan ja sinne luotuihin taulukkoihin sekä laskukaavoihin. Havainnollistavien Microsoft Excel-sovellukseen luotujen laskureiden luonnissa numeerisia tietoja on koottu ja järjestetty, visualisoitu sekä laskettu että vertailtu keskenään. Mainitut työvaiheet kyseisessä kehittämistyössä täyttävät määrällisen analyysin tunnusmerkkejä (Määrällinen analyysi n.d.)

9.2 Aineistonkeruu ja -analyysi

Opinnäytetyön käytännöllisen osuuden taustamateriaali saatiin kirjallisuudesta sekä toimeksiantajan omista projekteista ja tietokannoista. Ne ovat salassa pidettäviä tiedostoja ja niitä varten laadittiin aineistonhallintasuunnitelma. Uutta tutkimusaineistoa opinnäytetyön käytännöllistä osuutta varten ei tarvittu. Kirjallisuuteen perustuvaa aineistoa tarvittiin laskurin näkökulmasta oleellisten päästökertoimien etsimiseen. Kerätty ja lopulta rajattu aineisto koottiin Microsoft Excel-taulukkolaskentaohjelmaan, jolla itse laskuri myös tehtiin.

Käytännön osuutta varten kerätyn aineiston, eli päästökertoimien sekä niiden taustatutkimusten, etsiminen ja suodattaminen kansainvälisistä verkkolähteistä laskuria varten osoittautui lopulta monimutkaisemmaksi kuin odotettiin. Julkiset, ilmaiset ja laajasti päästöraportointia varten käytetyt tietokannat eivät sisältäneet esimerkiksi eri saostuskemikaalien valmistuspäästökertoimia sekä muita laskurin spesifiin luonteeseen sopivia tietoja. Ne keskittyvät enemmän arkisempiin sektoreihin, kuten energia-, polttoaine-, yhdyskuntajäte-, rakennus- ja matkustussektoriin. Tällaisia tietokantoja ovat esimerkiksi DEFRA:n (Greenhouse gas reporting: conversion factors 2024), EPA:n (GHG Emission factors hub 2025) sekä virallisen GHG-protokollan (Calculation Tools and Guidance n.d.) tietokannat. Tästä syystä useimmat työtä varten tarvitut kertoimet etsittiin aiheeseen liittyvistä erillisistä tutkimusartikkeleista sekä erinäisten kaupunki- tai yrityskohtaisten projektien omista selvityksistä. Aineisto oli osin miltei 20 vuotta vanhaa ja osittain yksityisesti tuotettua, mikä loi aineiston luotettavuuden kannalta epävarmuutta.

10 Tulokset

10.1 Kemiallinen saostusprosessi ja CO2e -päästöt

Projekti aloitettiin perehtymällä kemiallisen saostusprosessin CO2e -päästöjä synnyttäviin tekijöihin. Julkista tutkimustietoa aiheesta ei ole verkossa saatavilla, joten asiaa lähdettiin tarkastelemaan toimeksiantajan asiakkaiden salassa pidettävistä prosessikaavioista sekä kemikaalinkulutustiedoista. Kemiallinen saostusprosessi on prosessiteknisessä mielessä yksinkertainen, joten mahdollisten päästöjä tuottavien tekijöiden listaaminen ja yleistäminen hoituivat tehokkaasti.

Prosessi kuluttaa sähköenergiaa muun muassa saostusaltaiden mahdollisten sekoittajien toimintaan sekä vesijakeen liikuttamiseen, joten listaaminen aloitettiin siitä. Jotkut saostuskemikaalit ja -prosessit vaativat EPSE™ Menetelmästä poiketen lämpöenergiaa, jonka luominen tuottaa CO2e -päästöjä riippuen lämmöntuottotavasta. Näin energiankulutukseen liittyvät päästötuottajat saatiin listattua prosessia yleistävästä näkökulmasta.

Listaamista jatkettiin prosessissa kuluvista saostuskemikaaleista, joita on toimialalla lukuisia. Jokainen kemikaali tuottaa CO2e -päästöjä sen valmistuksessa ja siinä kuluvissa raaka-aineissa. Yleisimpiä perinteisissä kemiallisessa saostusprosesseissa käytettäviä kemikaaleja ovat muun muassa kalkki, natriumhydroksidi sekä erilaiset polymeerit ja hapot. Kemikaalien tarkempi listaus sekä EPSE™ Menetelmän käyttämät kemikaalit pidetään sopimuksen mukaan salassa.

Prosessista lähtevät jakeet, ylitevesi ja metalliliete tai -sakka, tuottavat päästöjä loppusijoituksesta riippuen. Esimerkiksi metallisakan vaarallisen jätteen käsittelyyn päätyminen tuottaa CO2e -päästöjä ja sille on määritetty Suomessa yleinen päästökerroin. Päästöt vähentyvät tai muuttuvat jopa negatiivisiksi, jos metallisakka kierrätetään. Kaivosteollisuudessa saostunut liete voidaan läjittää sille tarkoitettuun altaaseen (ks. luku 5.1), mille voidaan määritellä päästökerroin valtiosta ja tarkemmista teknisistä yksityiskohdista riippuen.

Muita prosessissa päästöjä synnyttäviä tekijöitä ovat kulutettu prosessivesi sekä kemikaalien ja lähtevän jakeen kuljetukset. Jotkut perinteisissä saostusmetodeissa käytettävät kemikaalit joudutaan laimentamaan tai käsittelemään vedellä ennen prosessia, kuten kalkki (ks. luku 4.1), ja vedenkulutus tuottaa päästöjä, joten sille on määritetty päästökertoimet. Kemikaalien ja lähtevän jakeen kuljetukset ja ajoneuvojen pakokaasut tuottavat myös kasvihuonekaasupäästöjä. Muita prosessissa epäsuoria päästöjä synnyttäviä tekijöitä ovat sen laitteistot ja niiden valmistuksen elinkaaripäästöt, mutta ne rajattiin yhdessä toimeksiantajan kanssa pois laskurin yleistävästä luonteesta johtuen.

10.2 Laskuri

Laskurin rakentaminen ja suunnittelu alkoivat siihen sisällytettävien tekijöiden rajaamisella. Rajaamisprosessia helpotti heti projektin alussa tehty päätös, että laskurista tulee kaksiosainen; toiselle Microsoft Excel-taulukkolaskentatyökalun välilehdelle tulee toimeksiantajan EPSE™ Menetelmän

hiilidioksidiekvivalenttipäästöjen laskuri ja toiselle vertailumenetelmän CO2e-laskuri. Tämä päätetty menettely teki Excel-kokonaisuuden käytöstä ja etenkin käyttökokemuksesta kätevämmän ja selkeämmän. EPSE™ Menetelmän olennaisten prosessiteknisten tekijöiden ollessa paremmin tiedossa oli tekijöiden rajaaminen käytännöllisempää aloittaa siitä.

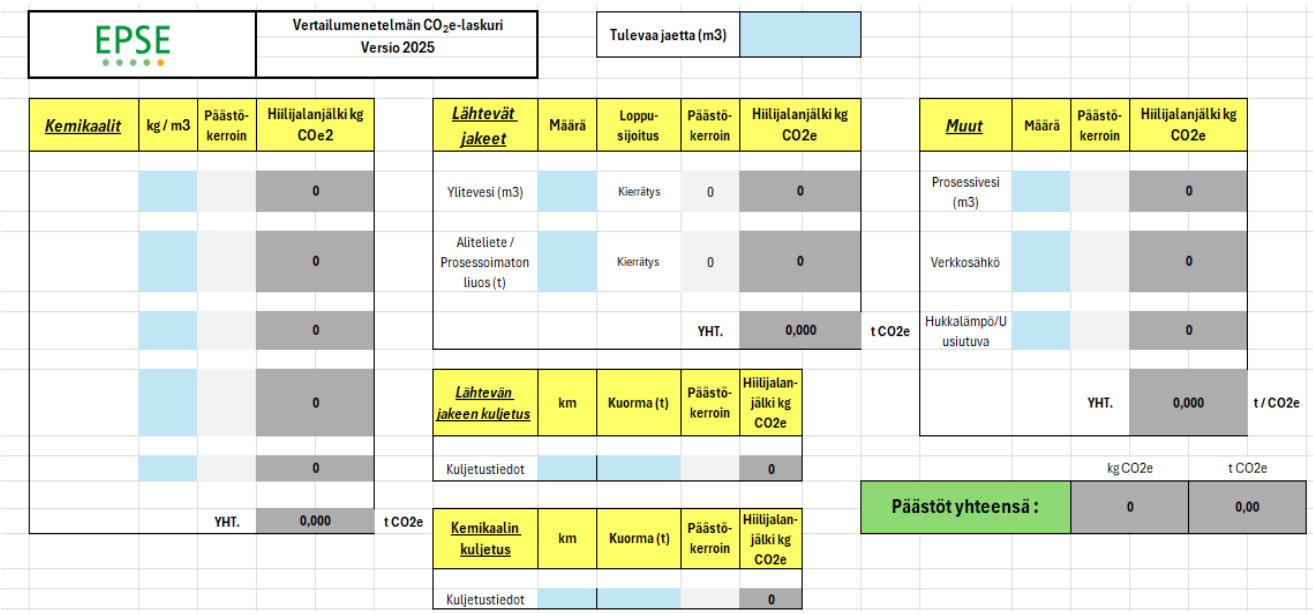
EPSE™ Menetelmän CO2e-laskuriin päätettiin aluksi sisällyttää kulutetut saostuskemikaalit ja sähköenergia sekä kemikaalien ja prosessista lähtevien jakeiden loppusijoitukset ja kuljetukset. Vertailumenetelmän CO2e-laskuriin sisällytettiin samat tekijät, mahdollisesti prosessissa kulutettu lämpöenergia sekä muutama muu teollisuudessa ja kaivosteollisuudessa usein käytetty saostuskemikaali (ks. kuvio 2). Laskureihin sisälletyt tekijät, tietyt valintaväliehdot sekä yksityiskohdat tietyille prosessinosille pidetään sopimuksen mukaan salassa.

Laskureihin sisällytettävät tekijät rajoitettiin täten koskemaan kemialliseen saostusprosessiin kulutettua kemikaaliannostusta, energiaa, prosessissa syntyvän jakeen loppusijoituksia sekä logistiikkaa kuvion 2 mukaisesti. Laskurista rajattiin pois laiteinvestoinnit sekä niiden elinkaaren synnyttämät päästöt, GHG-protokollan mukainen Scope-lajittelu (ks. luku 8.3.1) sekä metallisakan kierrätyksen tuoma päästövähennyspotentiaali. Tekijöiden rajaus yhdessä toimeksiantajan edustajien kanssa käydyissä kokouksissa selvensi molemmille osapuolille olennaisia kemiallisen saostusprosessin CO2e-päästöjä synnyttäviä tekijöitä opinnäytetyön toisen kehittämistavoitteen mukaisesti, minkä jälkeen laskuriprojektia oli yksinkertaisempi jatkaa.

Tekijöiden rajauksen jälkeen jatkettiin päästökertoimien etsimisellä, mikä oli edellisessä luvussa (ks. luku 9.2) mainitusti odotettua hankalampaa. Kaikki tarvittavat päästökertoimet löydettiin lopulta erinäisistä päästökerrointietokannoista, tutkimuksista, valmistajien verkkosivuilta sekä yksityisten ja julkisten hankkeiden koonneista. Päästökertoimille luotiin omalle “Lähteet” Excel -välilehdelleen niiden listauspaikka, minkä lisäksi sieltä löytyvät myös kerroinkohtaiset lähteet sekä niiden lisätiedot. Toimeksiantajalla on täten mahdollisuus vaihtaa ja päivittää päästökertoimia kyseiselle välilehdelle asiakaskohtaisesti sekä tulevaisuudessa päästökerrointietokantojen mahdollisesti kehittyessä ja tarkentuessa. Välilehti sisältää salassa pidettävää materiaalia, minkä takia siitä ei julkaista tähän työhön kuvaa.

Päästökertoimet istutettiin ”Lähteet”-välilehdeltä suoraan laskureihin luotuihin laskukaavoihin hiilidioksidiekvivalenttipäästöjen laskemiseksi. Laskukaavat ja päästölaskut perustuvat osioittain kulutustietoihin, kuten sähkön osalta kilowattitunteihin ”kWh”, missä kulutetun sähkön määrä kerrotaan sille osoitetulla päästökertoimella, jolloin saadaan lopputulos kg CO2e/kWh. Esimerkiksi kuljetusten päästöarvot lasketaan tonnikilometrien ”tkm” mukaan, eli kuljettu matka kerrotaan kuorman tonnimäärällä sekä lopulta kyseisen kuljetusajoneuvon päästökertoimella kg CO2e/tkm.

Kemikaalien päästöarvot päätettiin laskea tulevan jakeen määrän mukaan; Laskureihin syötetään kuvion 2 mukaisesti kemikaalikohtainen kulutusmäärä kg/m^3, joka kerrotaan prosessiin tulevan jakeen määrällä (m^3) ja edelleen kemikaalikohtaisella päästökertoimella, jolloin saadaan päästöarvo saostusprosessissa kulutetuille kemikaaleille halutulla aikavälillä, kuten vuodessa. Osa soluista, kuten lähtevien jakeiden loppusijoitus, ovat monivalintasoluja, joista valitaan laskentakohtaisen asiakastapauksen mukainen loppusijoitusvaihtoehto. Sen mukaan valikoituu myös päästökerroin automaattisesti. Lopulta eri tekijöiden lasketut päästöarvot summataan erilliseen osioon, jossa vertaillaan menetelmien välisiä päästöarvoeroja sekä vältettyjä päästöjä lopputuloksen tarkastelun helpottamiseksi. Tämä erillinen osio ja EPSE™ Menetelmän laskurivälilehti pidetään salassapitosopimuksen mukaan salattuna.



Kuvio 2. Hahmotelmakuva vertailumenetelmän laskurin rakenteesta. Kemikaalien nimet ja päästökertoimet ovat poistettu kuvasta tarkoituksellisesti.

Laskurivälilehtien ja ”Lähteet”-välilehden lisäksi Excel-kokonaisuuteen lisättiin myös loppuraportille sekä käyttöohjeille omat välilehdet. Raporttivälilehti kokoaa automaattisesti tiedon laskureista pylväsdiagrammeihin, jotka kuvaavat EPSE™ Menetelmän ja vertailumenetelmän välisiä kokonaispäästöjä sekä kemikaalinkulutuksen päästöjä yhdessä, viidessä sekä kymmenessä vuodessa. Kemikaalinkulutustiedot ovat salassa pidettävää materiaalia, minkä vuoksi raporttivälilehden näyttökuvaa ei tässä yhteydessä julkaista. Niiden lisäksi luotiin pylväsdiagrammi, joka kuvaa vältettyjä kokonaispäästöjä menetelmien välillä samoilla vuosiskenaarioilla. Raporttivälilehden toimivuus vaatii sitä, että CO2e-laskureiden kulutustiedot vastaavat laskennallisesti yhden vuoden kulutusmääriä. Lopuksi välilehdet siistittiin sekä väritettiin käyttökokemuksen parantamiseksi.

Laskureita sekä raporttivälilehden toimivuutta testattiin toimeksiantajan kanssa käydyssä kokouksessa eräästä asiakastapauksesta kerätyillä kulutustiedoilla. Muutama kehityskohde huomattiin ja korjattiin, minkä jälkeen kokonaisuus todettiin kyseiselle asiakastapaukselle toimivaksi. Laskurikokonaisuutta testattiin jälkikäteen myös toisen asiakastapauksen kulutustiedoilla, ja lopputulos pysyi toimivana. Laskurikokonaisuuden todettiin olevan toimeksiantajan tarkoituksiin sekä useimpiin asiakastapauksiin pätevä.

11 Pohdinta

11.1 Työn luotettavuus ja eettisyys

Opinnäytetyön käytännöllisen osuuden tuotoksena ollessa useimpiin asiakastapauksiin yleispätevä laskuri, osoittautui sen rakentamisessa ongelmaksi juuri oikeiden ja ajankohtaisten päästökertoimien löytäminen kirjallisuudesta. Toimeksiantajalla on asiakkaita globaalisti, ja päästökertoimet eroavat todellisuudessa toisistaan alueellisesti. Täten laskuriin täytyi etsiä mahdollisimman keskiarvoiset ja yleispätevät päästökertoimet jokaiselle muuttujalle erikseen. Kirjallisuusaineiston luotettavuuden ja paikkansapitävyyden epävarmuuskysymykset tuottivat tässä tapauksessa laskurin yleispätevän luonteen vuoksi mahdollisia lopputuloksellisia epätarkkuuksia. Itse CO2e-päästötietojen raportointi-ilmiö on globaalisti vielä suhteellisen tuore menetelmä ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi (ks. luku 8.3) minkä vuoksi aiheesta ei löydy sen luotettavuutta arvioivaa kirjallisuutta.

Koko opinnäytetyötä tarkastellessa sen lähteinä pyrittiin käyttämään esimerkiksi teoriapohjassa vain vahvistettua, legitiimiä tutkimustietoa sekä julkisten hallinnollisten organisaatioiden tiedotteita työn luotettavuuden varmistamiseksi. Halutun tiedon puuttuessa esimerkiksi tutkimuskirjallisuudesta jouduttiin työssä viittaamaan myös lehtiartikkeleihin ja yksityisten organisaatioiden tiedotteisiin, mikä tuo epävarmuuskysymyksiä julkaistun tiedon puolueellisuudesta ja oikeellisuudesta. Kaikki käytetyt lähteet löytyvät lähdeluettelosta ja niistä opinnäytetyöhön haalittu tieto on hyvän tieteellisen käytännön periaatteiden mukaisesti referoitu luotettavasti, rehellisesti ja vastuun siitä kantaen. (Hyvä tieteellinen käytäntö ja sen loukkausepäilyjen käsitteleminen Suomessa 2023, 11.)

Opinnäytetyön eettisyyden takaamiseksi salassapitovelvollisuuden osalta työ lähetettiin kokonaisuudessaan toimeksiantajalle luettavaksi, tarkistettavaksi ja hyväksytettäväksi. Opinnäytetyö tarkistettiin myös yleisen toimintatavan mukaan Turnitin -ohjelmalla plagioinnin mahdollisuuden ehkäisemiseksi. Itse kirjoitus- ja käännöstyössä pidettiin kiinni tutkimuksellisista eettisistä periaatteista koskien lähdetietojen oikeellisuutta niitä tiivistäessä ja käännettäessä kieleltä toiselle. (Mts. 17.)

Opinnäytetyön aineistoina olivat toimeksiantajalta saatujen salassa pidettävien aineistojen lisäksi päästökertoimista kertovat julkiset päästötietokannat, niitä koskevat tutkimusartikkelit sekä yksityisellä ja julkisella sektoreilla julkaistut tiedotteet (ks. luku 9.2). Tekijän alakohtaisella koulutuksella ja laajalla perehtymisellä aiheeseen sekä erityisesti lähteiden paikkaansa pitävyyteen ja legitiimiyteen taataan niiden oikeellisuus ja sitä myötä eettisyys hyvää tieteellistä käytäntöä noudattaen (Ammattikorkeakoulujen opinnäytetöiden eettiset suositukset 2025, 8–9).

11.2 Tulosten hyödynnettävyys ja kehittämisehdotukset

Laskurikokonaisuutta hyödynnetään toimeksiantajan potentiaalisten asiakkaiden kanssa käytäviin neuvotteluihin ja päästötaseen tarkasteluun. Yritysten hiilidioksidipäästöjen tarkastelu ja raportointi tulevat ajan myötä entistä tärkeämmäksi (ks. luku 8.3.1) minkä vuoksi toimeksiantaja näki mahdollisen CO2e-laskurin olevan ajankohtainen ja hyödyllinen työkalu sen käyttötarkoitukseen. Työ tilattiin sekä opinnäytetyön tekijän toimesta tehtiin ja toimitettiin. Laskurikokonaisuuden käytännön hyöty selviää varsinaisesti vasta tulevaisuudessa, kun nähdään onko sillä vaikutusta poten-

tiaalisten asiakkaiden vakuuttamisessa. Siitä huolimatta laskurikokonaisuuteen oltiin jo ilman asiakaskontaktikokeilua tyytyväisiä ja sen roolin uskotaan kasvavan tulevaisuudessa kyseisen toimialan tiukentuvassa kilpailussa.

Prosessikohtaisella CO2e-laskurilla voi olla asiakasneuvotteluedun lisäksi myös muita epäsuoria hyötyjä. Ympäristön hyvinvoinnin näkökulmasta asiakkaalle laskurilopputuloksen myötä ilmenneet saostusprosessin päästöarvot voivat vaikuttaa positiivisesti motivaatioon vähentää päästöjä myös muilla tavoilla kuin EPSE™ Menetelmään investoimalla. Suuret prosessikohtaiset CO2e-päästöt voivat niin sanotusti herättää asiakkaan tarkastelemaan myös prosessikohtaista sähkön- ja lämmönkulutusta, kemikaalintoimittajakohtaisia päästökerroineroja sekä lähtevän jakeen kuljetuksen tehostamista vähempiä kilometrejä tavoitellessa. Selitetyn ilmiön ja mahdollisten päästösäästöjen myötä kasvihuonekaasupäästöjen määrä vähenisi teoriapohjassa selitettyjen tavoitteiden (ks. luku 8.2) saavuttamiseksi sekä se voi tuoda yritykselle myös taloudellisia hyötyjä, mitä ei välttämättä alustavasti ole tajuttu huomioida.

Varsinainen suuremman mittakaavan käytännön hyöty piilee prosessista erotetun raskasmetallisakan kierrätyspotentiaalin monipuolisissa mahdollisuuksissa. Kun asiakkaalle esitetään heidän saostusprosessinsa päästöarvot, on ensimmäinen ajatus todennäköisesti niiden vähentämisessä. EPSE™ Menetelmällä erotetun metallisakan kierrätyksellä voidaan prosessin sekä koko yrityksen tuottamia hiilidioksidiekvivalenttipäästöjä vähentää huomattava määrä. En näe syytä, miksei tehokas ja energiaviisas metallien erotus ja kierrätys teollisuuden ja kaivosteollisuuden jätevesistä voisi tehdä prosessista hiilidioksidipäästöiltään jopa negatiivisen tapauksesta riippuen.

Kyseisen opinnäytetyön käytännön osuuden lopputuloksen, eli CO2e-laskurin, merkittävin kehittämisehdotus ja -ongelma löytyykin juuri kysymyksestä: ”Miten kierrätyspotentiaali ja sen tuomat päästösäästöt voitaisiin huomioida useimpiin asiakastapauksiin soveltuvassa CO2e-laskurissa?”. Tässä työssä sen huomioiminen rajattiin projektin alussa pois, sillä se olisi tehnyt työstä opinnäytetyön kaltaista projektia varten liian laajan.

Kierrätyspotentiaalin huomioimista laskurissa vaikeuttaa useat tekijät. Asiakkaiden jätevesilaadut ja etenkin erotetun metallisakan metallit ja metallipitoisuudet vaihtelevat toisistaan laajalla skaa-

lalla. Metallien talteenottoon sakasta ei ole yhtä tiettyä proseduuria, minkä mukaan koko kierrätysprosessia sakkatalteenotosta taas tuotantoprosessin raaka-aineeksi voitaisiin tarkastella ja sen päästöjä laskea. Koko ilmiö on niin tuore, ettei sillä ole maailmalla yhtään teollisen kokoluokan esimerkkiä, mistä voitaisiin hakea osviittaa tätä kyseistä laskurimahdollisuutta varten (ks. luku 7.2). Asiaa monimutkaistaa myös toimeksiantajan asiakkaiden globaali toiminta-alue, minkä myötä yleiset toimintatavat, metallipitoisuudet, toimialueet sekä valtiokohtainen tekniikan alan kehitysaste vaihtelevat suuresti. Mainitut tekijät perustelevat myös laiteinvestointien ja niiden elinkaarien rajaamisen laskurista pois.

Olisi yksinkertaista vaan todeta että kierrätyspotentiaalia täytyy tarkastella asiakaskohtaisesti ja jokaista tapausta varten pitäisi luoda erillinen laskuri, mutta voisiko tarkoitusta varten luoda valmiin yleispätevän pohjan esimerkiksi Microsoft Excel-taulukkolaskentasovellukseen? Mahdollinen kierrätyspotentiaali- ja päästösäästöosio sopisi loistavasti tämän opinnäytetyön ohessa rakennetun laskurin jatkoksi. Päästösäästöjen lisäksi metallien kierrätyksen kasvamisella kemiallista saostusta hyödyntävillä toimialoilla olisi massiivinen vaikutus kiertotalouteen ja taisteluun ilmastonmuutosta vastaan, kuten teoriapohjan luvussa 7.1 on avattu.

Laskurikokonaisuudessa näkyy tekijän persoonallinen jälki, ja sen valmistuttua tajuttiin, että se on lopulta vain mallipohja. Lopputuloksesta yritettiin hioa käyttötarkoitustaan varten virheetöntä, mutta virheettömyys on tässä tapauksessa käyttäjän silmissä. Koko prosessikohtainen CO2e-laskuri-ilmiö on niin tuore, että esimerkkimallia ei ollut julkisesti tarjolla missään. Toimeksiantaja voi kehittää ja muokata laskurikokonaisuutta halutessaan mihin suuntaan tahansa, ja näin varmasti tapahtuukin toimeksiantajayrityksen ja toimialan dynamiikan muuttuessa ajan myötä. Laskurikokonaisuuden muokkausmahdollisuuden voisi nimetäkin yhdeksi sen vahvuudeksi ja erityisesti hyödyksi.

Lähteet

55-valmiuspaketti: miten EU muuttaa ilmastotavoitteet lainsäädännöksi. 2024. Infografiikka Eurooppa-neuvoston verkkosivuilla. Viitattu 19.12.2024. https://www.consilium.europa.eu/fi/infographics/fit-for-55-how-the-eu-will-turn-climate-goals-into-law/.

Adlan, N. Ariffin, K. & Aziz, H. 2008. Heavy metals (Cd, Pb, Zn, Ni, Cu and Cr(III)) removal from water in Malaysia: post treatment by high quality limestone. Bioresource Technology 99(6), 1578-1583. Viitattu 21.11.2024. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.04.007.

Alakangas, E., Hurskainen, M., Korhonen, J. & Laatikainen-Luntama, J. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Teknologian tutkimuskeskus VTT. Viitattu 20.11.2024. https://publications.vtt.fi/pdf/technology/2016/T258.pdf.

Ammattikorkeakoulujen opinnäytetöiden eettiset suositukset. 2025. Ammattikorkeakoulujen rehtorineuvosto Arene ry. Viitattu 5.3.2025. https://arene.fi/wp-content/uploads/Raportit/2025/AMMATTIKORKEAKOULUJEN%20OPINN%C3%84YTET%C3%96IDEN%20EETTISET%20SUOSITUKSET%202025.pdf?_t=1739803988.

Asetus 2021/1119. Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus eurooppalaisesta ilmastolaista. Euroopan Unionin verkkosivut. Viitattu 19.12.2024. https://eur-lex.europa.eu/FI/legal-content/summary/european-climate-law.html.

Asetus 2023/857. Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus sitovista vuotuisista kasvihuonekaasupäästöjen vähennyksistä jäsenvaltioissa vuosina 2021–2030, joilla edistetään ilmastotoimia Pariisin sopimuksen sitoumusten täyttämiseksi. Euroopan Unionin verkkosivut. Viitattu 19.12.2024. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=CELEX:32023R0857.

Aubé, B. & Lee, D. 2015. The High-Density Sludge (HDS) Process and Sulphate Control. 10th International Conference on Acid Rock Drainage & IMWA Annual Conference. Viitattu 12.11.2024. https://www.imwa.info/docs/imwa_2015/IMWA2015_Aube_188.pdf.

Barakat, M. A. 2010. New trends in removing heavy metals from industrial wastewater. Arabian Journal of Chemistry 4(4), 361–377. Viitattu 14.11.2024. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2010.07.019.

Bratby, J. 2016. Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment. 3. Edition. London: IWA Publishing.

Calculation Tools and Guidance. N.d. GHG-protokollan verkkosivut. Viitattu 12.2.2025. https://ghgprotocol.org/calculation-tools-and-guidance.

Ching-Hong, H., Shang-Lien, L., Ching-Yao, H., Kaimin, S., Wen-Hui, K. & Ching-Lung, C. 2008. Thermal detoxification of hazardous metal sludge by applied electromagnetic energy. Chemosphere, Volume 71, Issue 9, 1693-1799. Viitattu 21.11.2024. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.01.006.

CO2-päästökertoimet. 2024. Motivan verkkosivut. Viitattu 19.12.2024. https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiankaytto_suomessa/co2-paastokertoimet.

Direktiivi 2006/21/EY. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi kaivannaisteollisuuden jätehuollosta. Euroopan unionin verkkosivut. Viitattu 10.12.2024. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/ALL/?uri=CELEX%3A32006L0021.

Drápala, J., Rigoulet, H., Brožová, S., Malcharcziková, J., Langová, S., Vontorová, J., Nétek, V., Kubáč, J. & Janáček, D. 2022. Processing of Metal Waste—Sludge from the Galvanizing Plants. Metals, 12, 1947. Viitattu 5.12.2024. https://doi.org/10.3390/met12111947.

Du, J., Zeng, L., Zhang, S., Xiao, C., Zhang, G., Cao, Z., Li, Q., Wang, M., Guan, W. & Wu, S. 2023. Complete recycling of valuable metals from electroplating sludge: Green and selective recovery of chromium. Chemical Engineering Journal, 467, 143484. Viitattu 5.12.2024. https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.143484.

EPSE Oy. 2024. Yrityksen verkkosivut. Viitattu 28.11.2024. https://www.epse.fi/.

EU:n kasvihuonekaasupäästöjen leikkaaminen: vuoden 2030 kansalliset tavoitteet. 2018. Artikkeli Euroopan parlamentin verkkosivuilla. Viitattu 19.12.2024. https://www.europarl.europa.eu/topics/fi/article/20180208STO97442/eu-n-kasvihuonekaasupaastojen-leikkaaminen-vuoden-2030-kansalliset-tavoitteet.

EU:n kriittisiä raaka-aineita koskeva säädös EU:n tulevien toimitusketjujen tueksi. 2024. Tiedote Eurooppa-neuvoston verkkosivuilla. Viitattu 10.12.2024. https://www.consilium.europa.eu/fi/infographics/critical-raw-materials/.

Finnish industrial wastewater guide. Conveying non-domestic wastewater to sewers. 2018. Vesilaitosyhdistys. Publication series no. 69 of the Finnish Water Utilities Association. Helsinki. Viitattu 21.11.2024. https://www.vesilaitosyhdistys.fi/site/assets/files/4925/finnish_industrial_wastewater_guide.pdf.

GHG Emission factors hub. 2025. EPA. Yhdysvaltain ympäristönsuojeluviraston verkkosivut. Viitattu 12.2.2025. https://www.epa.gov/climateleadership/ghg-emission-factors-hub.

Greenhouse gas reporting: conversion factors 2024. Defra. Yhdistyneen kuningaskunnan ympäristö-, elintarvike- ja maaseutuasioiden ministeriön verkkosivut. Viitattu 12.2.2025. https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2024.

Grifoni, M., Pedron, F., Petruzzelli, G. & Rosellini, I. 2019. From waste to resource: Sorption properties of biological and industrial sludge. Industrial and Municipal Sludge, 26, 595-621. Viitattu 19.11.2024. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815907-1.00026-X.

Hokka, J. & Eilu, P. 2023. Raaka-aineet ja huoltovarmuus – kohta on kiire. Artikkeli Geologian tutkimuskeskuksen verkkosivuilla. Viitattu 4.12.2024. https://www.gtk.fi/ajankohtaista/raaka-aineet-ja-huoltovarmuus-kohta-on-kiire/.

Hyvä tieteellinen käytäntö ja sen loukkausepäilyjen käsitteleminen Suomessa. 2023. Tutkimuseettinen neuvottelukunta. Tutkimuseettisen neuvottelukunnan julkaisuja 2/2023. Helsinki. Viitattu 5.3.2025. https://tenk.fi/sites/default/files/2023-03/HTK-ohje_2023.pdf.

Ichlas, Z. T., Mubarok, M. Z., Magnalita, A. Vaughan, J. & Sugiarto, A. T. 2020. Processing mixed nickel-cobalt hydroxide precipitate by sulfuric acid leaching followed by selective oxidative precipitation of cobalt and manganese. Hydrometallurgy. Volume 191, 105185. Viitattu 21.11.2024. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.105185.

Ilmastolaki 423/2022. Oikeusministeriön omistaman Finlexin verkkosivut. Viitattu 19.12.2024. https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2022/20220423.

Jätteen luokittelu vaaralliseksi jätteeksi – päivitetty opas. 2019. Ympäristöministeriön julkaisuja 2019:2. Helsinki: Ympäristöministeriö. Viitattu 25.11.2024. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161316/YM_2019_02.pdf?sequence=5&isAllowed=y.

Kansallisen kasvihuonekaasujen päästölaskennan tietojen hyödyntäminen ilmastotyön tukena. 2023. Ympäristöministeriö. Ympäristöministeriön julkaisuja 2023:34. Viitattu 16.12.2024. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/165148/YM_2023_34.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Kauppila, P., Räisänen, M, L. & Myllyoja, S. 2011. Metallimalmikaivostoiminnan parhaat ympäristökäytännöt. Suomen ympäristö, 2, 34–36. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. Viitattu 14.11.2024. https://helda.helsinki.fi/server/api/core/bitstreams/6a3bf502-7715-4ad2-9476-403cb6a2ed50/content.

Kestävä jätehuolto: EU:n toimet. 2018. Artikkeli Euroopan parlamentin verkkosivuilla. Viitattu 10.12.2024. https://www.europarl.europa.eu/topics/fi/article/20180328STO00751/kestava-jatehuolto-eu-n-toimet.

Kestävä kehitys. N.d. Suomen YK-liiton verkkosivut. Viitattu 8.1.2024. https://www.ykliitto.fi/kestava-kehitys.

Kierrätyksestä kiertotalouteen. Valtakunnallinen jätesuunnitelma vuoteen 2027. 2022. Ympäristöministeriö. Valto. Viitattu 19.11.2024. http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-361-266-2.

Kiertotalouden edistäminen EU:ssa. N.d. Tiedote ympäristöministeriön verkkosivuilla. Viitattu 10.12.2024. https://ym.fi/kiertotalouden-edistaminen-eu-ssa.

Kiertotalouden strategisen ohjelman toimeenpano. 2024. Tiedote valtioneuvoston verkkosivuilla. Viitattu 10.12.2024. https://valtioneuvosto.fi/hanke?tunnus=YM046:00/2021.

KnowPap 2014. Paperitekniikan ja tehtaan automaation oppimisympäristö. Rajattu käyttöoikeus. Viitattu 14.11.2024.

Kostamo, P., Airaksinen, T. & Vilkka, H. 2022. Kirjoita itsesi asiantuntijaksi: Opas toiminnalliseen opinnäytetyöhön. Helsinki: Art House.

Lawton, G. 2022. Puhtaan energian likainen salaisuus. Artikkeli Tiede- lehden numerossa 6, 38-47. Käännetty ja tiivistetty suomen kielelle. Kääntäjä Riikonen, P. Helsinki. Sanoma Media Finland.

Li, Y., Shammas, N. K., Vaccari, D. A. & Wang, L. K. 2005. Physicochemical Treatment Processes. Volume 3. New Jersey: Humana press.

Määrällinen analyysi. N.d. Jyväskylän yliopiston verkkosivut. Viitattu 26.12.2024. https://sites.app.jyu.fi/mehu/fi/menetelmapolku/aineiston-analyysimenetelmat/maarallinen-analyysi.

Mäkinen, J., Salo, M., Khoshkhoo, M., Sundkvist, J.E. & Kinnunen, P. 2020. Bioleaching of cobalt from sulfide mining tailings; a mini-pilot study. Hydrometallurgy, 196, 105418. Viitattu 5.12.2024. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105418.

Metallimalmikaivokset ja metallinjalostus. N.d. Artikkeli Kaiva.fi verkkosivuilla. Kaivannaisalan opetusportraali. Viitattu 28.11.2024. https://kaiva.fi/kaivannaisala/kaivostoiminta/metallimalmikaivokset/.

Mitä ilmastonmuutos on? N.d. Artikkeli Ilmasto-oppaan verkkosivuilla. Viitattu 16.12.2024. https://www.ilmasto-opas.fi/artikkelit/kasvihuoneilmio-ja-ilmakehan-koostumus.

Mroczko, D. & Zimoch, I. 2018. Coagulation of pollutions occurring in surface waters during time of dynamic water flow. Inżynieria Ekologiczna. Ecological Engineering, 19(2), 15-22. Viitattu 21.11.2024. http://dx.doi.org/10.12912/23920629/86053.

Niskala, M. & Palmuaro, S. 2023. Uudet kestävyysraportointivaatimukset. Mitä ne tarkoittavat käytännössä? Helsinki: Alma Talent.

Park, I., Tabelin, C.B., Jeon, S., Li, X., Seno, K., Ito, M. & Hiroyoshi, N. 2019. A review of recent strategies for acid mine drainage prevention and mine tailings recycling. Chemosphere, 219, 588-606. Viitattu 21.11.2024. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.053.

Pirtonen, H. 2021. Älykäs yhteiskunta hyödyntää metalleja nykyistä monipuolisemmin myös arvoketjun loppupäässä. Artikkeli Tilastokeskuksen verkkosivuilla. Viitattu 28.11.2024. https://stat.fi/tietotrendit/artikkelit/2021/alykas-yhteiskunta-hyodyntaa-metalleja-nykyista-monipuolisemmin-myos-arvoketjun-loppupaassa.

Saastamoinen, A. & Tuorila, H. 2022. Ulkoistaminen ja yksityisten toimijoiden rooli vesihuollossa. Kilpailu- ja kuluttajaviraston tutkimusraportteja 4/2022. Kilpailu- ja kuluttajavirasto. Viitattu 20.11.2024. https://www.kkv.fi/uploads/sites/2/2022/04/2022-04-tutkimusraportteja-vesihuolto-ulkoistaminen.pdf.

Siham, E, I. 2023. Modern treatment of tailings. Kandidaatintyö. Lappeenranta-Lahti teknillinen yliopisto. Kemiantekniikka. Bachelor´s Degree in Chemical Engineering. Viitattu 21.11.2024. https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2023060552453.

Suomen kansallinen ilmastopolitiikka. N.d. Tiedote Ympäristöministeriön verkkosivuilla. Viitattu 19.12.2024. https://ym.fi/suomen-kansallinen-ilmastopolitiikka.

Termonen, M. 2022. Metsäteollisuuden kuitulietteiden peltoviljelykäyttö karkeilla kivennäismailla. Artikkeli Suomen maataloustieteellisen seuran tiedotteessa. Nro 40. Maataloustieteen päivät 2022. Viitattu 20.11.2024. https://journal-fi.ezproxy.jamk.fi:2443/smst/article/view/115864/70969.

Toimintamallit teollisuusjätevesisopimusten haastaviin tilanteisiin. 2023. AFRY Finland Oy. Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 86. Helsinki: Suomen Vesilaitosyhdistys ry. Viitattu 21.11.2024. https://www.vesilaitosyhdistys.fi/site/assets/files/7949/toimintamallit_teollisuusjatevesisopimusten_haastaviin_tilanteisiin_liitteet.pdf.

Tulevaisuusselonteon 1. osan strateginen toimintaympäristöanalyysi. 2024. Valtioneuvoston skenaariotyö. Valtioneuvoston julkaisuja 2024:54. Viitattu 4.12.2024. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/165940/VN_2024_54.pdf.

Työryhmä esittää ratkaisuja kaivannaisjätteiden hyödyntämiseksi. 2024. Tiedote työ- ja elinkeinoministeriön verkkosivuilla. Viitattu 4.12.2024. https://tem.fi/-/tyoryhma-esittaa-ratkaisuja-kaivannaisjatteiden-hyodyntamiseksi.

Työryhmä valmistelemaan uutta kiertotalouslakia. 2024. Tiedote valtioneuvoston verkkosivuilla. Viitattu 10.12.2024. https://valtioneuvosto.fi/-//1410903/tyoryhma-valmistelemaan-uutta-kiertotalouslakia.

Uudistuvan teollisuuden strategia: Suomen tarjottava teollisuudelle kilpailukykyinen ja ennustettava toimintaympäristö. 2021. Työ- ja elinkeinoministeriön verkkosivut. Viitattu 9.1.2024. https://tem.fi/-/uudistuvan-teollisuuden-strategia-suomen-tarjottava-teollisuudelle-kilpailukykyinen-ja-ennustettava-toimintaymparisto.

Vaarallisen jätteen määrä moninkertaistui kaivostoiminnassa – syynä aineiston täydentyminen ja luokittelumuutokset. 2023. Uutinen Tilastokeskuksen verkkosivuilla. Viitattu 28.11.2024. https://stat.fi/uutinen/vaarallisen-jatteen-maara-moninkertaistui-kaivostoiminnassa-syyna-aineiston-taydentyminen-ja-luokittelumuutokset.

Yu, C., Ying, Z., Yanwen, L., Suiyi, Z., Dongxu, L., Tong, S., Xinfeng, X. & Xianze, W. 2022. Resource utilization of hazardous Cr/Fe-rich sludge: synthesis of erdite flocculant to treat real electroplating wastewater. Journal of Environmental Health Science & Engineering, 20, 509-519. Viitattu 5.12.2024. https://doi.org/10.1007/s40201-022-00796-0.

Liitteet

Liite 1. Microsoft Excel -CO2e laskuri (salassa pidettävä)