

Ydinvoiman ympäristövaikutukset -
esimerkkeinä jäähdytysvedet ja kasvihuonekaasupäästöt

Eemeli Jurvakainen

LuK-seminaari ja -tutkielma 790351A

Maantieteen tutkimusyksikkö

Oulun Yliopisto

28.4.2022

Tiivistelmä

Ydinvoima on tehokas ja energiavarma sähköntuotantomuoto, joka polarisoi hyvin vahvasti mielipiteitä. Kaikella energiantuotannolla on kuitenkin vaikutuksia ympäröivään luontoon, niin ydinvoimallakin. Ydinvoima perustuu raskaiden atomiytimien halkeamis- eli fissioreaktioon, jossa vapautuu merkittäviä määriä sidosenergiaa. Tätä energiaa saadaan muun muassa höyrystetyn veden avulla muutettua ydinvoimalan generaattorissa sähköksi. Ydinvoimalan rakentaminen on pitkän aikavälin prosessi, joka vaatii suuria päätöksiä ja investointeja. Lisäksi polttoaineen, eli yleensä uraanin, hankinta ja jalostus ovat merkittävässä asemassa arvioitaessa ydinvoimalan kannattavuutta.

Biodiversiteetin kannalta ennakolta merkittävin riski liittyy jäähdytysvesiin. Vesistöistä otetut jäähdytysvedet lämpenevät ydinvoimalan lauhduttimessa, jonka jälkeen ne lasketaan takaisin luontoon. Jäähdytysvedet nostavat vesistöjen lämpötiloja, millä voi olla paikallisesti dramaattisia vaikutuksia ekosysteemiin. Monien levien ja planktonien tuottavuus ja lisääntymismenestys saattavat häiriintyä lämpötilan nousun takia. Tämän lisäksi useiden vesilajien aineenvaihdunta lisääntyy ja sitä kautta ravinnontarve kasvaa. Tällaiset häiriöt ekosysteemeissä voivat pahimmillaan aiheuttaa joidenkin lajien katoamisen alueelta. Häviämisen myötä biodiversiteetti köyhtyy ja ekosysteemin dynamiikka järkkyy.

Jäähdytysvesien lisäksi ongelmakohtaksi on nostettu kasvihuonekaasupäästöt. Ydinvoimalaitoksen sähköntuotantovaiheessa nämä päästöt ovat hyvin vähäisiä, mutta laitosta rakentaessa, polttoainetta hankkiessa ja ydinjätettä käsiteltäessä syntyy huomattavia määriä kasvihuonekaasupäästöjä. Elinkaariarvioiden haasteena onkin, että päästöt syntyvät suurimmilta osin muualla kuin itse laitosalueella. Ilmastonmuutoksen torjunnassa onkin siis elintärkeää selvittää ydinvoiman ilmastokuormitus. Arvioiden jälkeen on lopulta helpompi päättää, mikä energiantuotantomuoto on tulevaisuudessa kannattavin.

Sisällysluettelo

1. Johdanto.....	4
2. Ydinvoima.....	5
2.1 Ydinvoimalan rakentaminen.....	6
2.2 Ydinpolttoainekierto.....	7
2.3 Ydinreaktorit.....	9
3. Ydinvoiman ympäristövaikutukset.....	10
3.1 Jäähdytysvedet.....	10
3.2 Kasvihuonekaasupäästöt.....	15
4. Pohdinta ja johtopäätökset.....	18
5. Lähteet.....	21

1. Johdanto

Tässä opinnäytetyössä tarkoitukseni on perehtyä ydinvoiman ympäristövaikutuksiin. Ydinvoima on erittäin ajankohtainen ja mielenkiintoinen aihe johtuen erityisesti Ukrainan sodasta ja alati kasvavasta energiantarpeesta. Energiantuotantomuotona ydinvoimaa voidaan pitää hyvin tehokkaana ja omalaatuisena. Työssäni paneudun tarkemmin jäähdytysvesien aiheuttamaan vesistöjen lämpenemiseen sekä koko ydinvoiman elinkaaren tuottamiin kasvihuonekaasupäästöihin. Pohdinnassa arvioin hieman ydinvoiman tulevaisuutta ja sen sijoittumista energia-alan kentällä. Kaikkinensa energiantuotanto onkin hyvin kiistelty aihe, sillä ongelmatonta tapaa tuottaa energiaa ei ole olemassa.

Tällä hetkellä ydinvoima kattaa koko maailman sähköntuotannosta noin 10 % (Pomponi & Hart 2021: 1). Varsinkin nykyisen ilmastokriisin vallitessa tätä osuutta olisi mahdollista kasvattaa. Zinklen ja Wasin (2013) mukaan ydinvoima tulee olemaan avainasemassa ilmastonmuutoksen torjunnassa. Kuitenkin ydinvoiman takia on koettu muutamia suuria onnettomuuksia, jotka ovat aiheuttaneet merkittäviä säteilypitoisuuksia ympäristöön. Nämä onnettomuudet saavat, toisaalta aiheestakin, miettimään ydinenergian turvallisuutta tulevaisuuden energiantuotantotapana. Tässä työssä sivuutan ydinvoimaloiden säteilyhaitat, koska niiden rooli normaaliolosuhteissa on hyvin merkityksellinen. Nykyiset tutkimukset säteilylaskeumista perustavatkin hyvin pitkälti edellisiin onnettomuuksiin ja erilaisiin skenaarioihin, joten näiden tarkastelu ei ollut mielekästä. Tietenkin ydinjätteellä voidaan nähdä olevan säteilyseurauksia, mutta turvallisella käsittelyllä ja loppusijoituksella nämäkin uhat saadaan minimoitua.

Turvallisuus onkin yksi tärkeimmistä ydinvoimaan liittyvistä termeistä, sillä se nousee esiin kaikessa ydinvoimaan liittyvässä keskustelussa ja sääntelyssä (Thurner ym. 2014: 163). Ydinvoiman valoisan tulevaisuuden takeena on oltava siis täydet tieteelliset ja poliittiset edellytykset. Kandidaatintyössäni tuon alussa esiin yleistä tietoa ydinreaktoreista, ydinpolttoaineesta sekä ydinvoimasta energiantuotantotapana. Näiden jälkeen keskityn käsittelemään kahta mielestäni merkittävintä ydinvoiman haittavaikutusta ympäröivään luontoon. Lopuksi pohdinnassa vertailen hieman ydinvoiman haittavaikutusten merkittävyyttä suhteessa muun muassa fossiilisiin polttoaineisiin. Khosravin ym. (2015: 1) mukaan Suomen kaukolämpöverkosto on vielä hyvin riippuvainen fossiilisista polttoaineista ja turpeesta, vaikka

hiilineutraalisuustavoitteita onkin asetettu. Halusin siis tutkia olisiko ydinvoiman lisääminen yksi mahdollinen, kestävä ratkaisu nykyisiin energia- ja ilmastohaasteisiin.

Tämän tutkielman tutkimuskysymykset ovat siis seuraavat:

1. Miten ydinvoimalan lämpimät jäähdytysvedet vaikuttavat vesistöjen ekosysteemiin?
2. Kuinka paljon ydinvoima aiheuttaa kasvihuonekaasupäästöjä koko elinkaarensa aikana?

2. Ydinvoima

Ydinvoima on luotettava ja kohtuuhintainen energianlähde (Zinkle & Was 2013: 735). Ydinvoimalla on kasvihuonekaasupäästöjä esimerkiksi laitosten rakentamiseen liittyen, mutta kokonaisuudessaan nämä päästöt ovat murto-osia verrattuna fossiilisten polttoaineiden käytön aiheuttamiin päästöihin (Rashad & Hammad 2000: 211; Fthenakis & Kim 2007: 2549) Noin 30 % kaikesta maailmalla tuotetusta ydinenergiasta tulee Yhdysvalloista (Chu & Majumdar 2012: 294). Kansainvälisen atomienergiajärjestön IAEA:n tilastojen (2020) mukaan muita suuria ydinenergian tuottajia ovat Kiina, Ranska ja Venäjä. Ranskassa ydinvoiman osuus kokonaisenergiantuotannosta on suurin 70,6 % (IAEA 2020). Työ- ja elinkeinoministeriön (TEM) julkaisema strategia (2017) Suomen energiapolitiikan tavoitteista sisälsi ydinvoimakapasiteetin lisäämistä. Ydinvoimaa olisi tarkoitus lisätä noin 40 % kansallisesta sähköntarjonnasta vuoteen 2030 mennessä. Tällä hetkellä Suomessa kaikesta tuotetusta energiasta 33,9 % tulee ydinreaktoreista (IAEA 2020). Olkiluotoon valmistunut Suomen viides reaktori vähentääkin jo riippuvuutta naapurimaista tulevalta energialta kasvattaen ydinenergian osuutta (Khosravi ym. 2020: 6). Ydinenergia onkin nykyään ainoa energiantuotantomuoto, jolla saadaan vakaasti perussähköä ilman merkittäviä kasvihuonekaasupäästöjä (Warner & Heath 2012: 73; Aliyu ym. 2014: 1897).

2.1 Ydinvoimalan rakentaminen

Ilmastonmuutos ja fossiilisten polttoaineiden hintojen nousu ovat nostattaneet ydinvoiman suosiota (Locatelli & Mancini 2012: 623). Kuitenkin tutkimusten perusteella ydinvoimaloiden keskimääräinen rakentamisaika on vain pidentynyt ajan mittaan johtuen projektien monimutkaisuudesta ja laajasta yhteiskunnallisesta keskustelusta (Thurner ym. 2014: 163). Locatellin ja Mancinin mukaan (2012: 624) ydinvoimaloiden rakentamiseen liittyy myös lukuisia turvallisuusvaatimuksia, joiden takia rakennusprojektit yleensä ylittävät asetetut aika- ja kustannusennusteet. Thurner ym. (2014: 170) havaitsivat, että Harrisburgin tai Tšernobylin ydinvoimalaonnettomuudet eivät ole kuitenkaan pidentäneet lisää viime vuosien rakennushankkeita.

Teknisten turvallisuussäädösten lisäksi ydinvoimalan rakentamisessa on otettava huomioon geodynaamiset prosessit (Demek & Kalvoda 1992: 395). Erityisesti alueen maankuoren tektoniset liikkeet ovat arvokasta tietoa ydinvoimalahanketta suunniteltaessa (Demek & Kalvoda 1992: 399). Mahdolliset maanjäristykset otetaan huomioon rakentamisessa eristysjärjestelmien avulla (Perotti ym. 2013: 189). Nämä järjestelmät pienentävät maanjäristysten aiheuttaman riskin yhtä pieneksi kuin ydinreaktorin sisäisten onnettomuuksien riskin.

Ympäristöriskien vähentämiseksi ydinvoimalaitoshankkeen yhteydessä tehdään aina ympäristövaikutusten arviointi (Vuori ym. 2002: 15). Aliyu ym. (2014: 1898) kirjoittavat Desnoyers'n ym. mukaan (2011), että ydinvoimalan rakentamis- ja purkamisprosessit vaativat kattavat turvallisuusanalyysit mahdollisten onnettomuuksien varalle. Säteilyn leviämismalleihin on otettava huomioon esimerkiksi meteorologiset tiedot, kuten sateisuus ja tuulisuus, sekä maankäytön ja asutuksen jakautuminen (Aliyu ym. 2014: 1898). Onnettomuustilanteet on otettava huomioon heti laitoksen paikanvalinnasta lähtien (Zhang ym. 2014: 585). Täten esimerkiksi hätätoimenpiteet ja inhimilliset virheet on huomioitava jo rakentamisvaiheessa. Vuoren ym. mukaan (2002: 16) turvallisen rakentamisen lähtökohtana on estää tai rajoittaa radioaktiivisten aineiden pääsy ympäristöön. Purkamisprosesseista aiheutuneita ympäristövaikutuksia on puolestaan tutkittu vähän, sillä toistaiseksi ydinvoimaloita ei ole merkittävästi purettu (Zinkle & Was 2013: 735).

Koko ydinvoimalan rakennusprosessi on siis erittäin tarkkaa, sillä pienetkin suunnittelu- tai toteutusvirheet voivat olla katastrofaalisia niin ympäristön, valtioiden kuin

mukana olevien yritystenkin kannalta (Locatelli & Mancini 2012: 624). Erilaiset odottamattomat häiriöt voivat viivästyttää voimalan valmistumista vuosilla johtuen tiukoista turvallisuusmääräyksistä (Ahmad 2021: 755). Thurnerin ym. (2014) mukaan ydinvoimaan panostaminen on pitkän aikavälin suunnitelma, minkä toteuttamista tietenkin vaikeuttaa demokratiassa muuttuvat hallitukset ja talouden laskukaudet. Vujić ym. (2012) todistivat analyyseissään, että ydinvoima on toisaalta hyvin ylisäänneltyä, mikä johtaa muun muassa kustannusten merkittävään kasvuun.

2.2 Ydinpolttoainekierto

Ydinvoimalaitosten sähköntuotanto perustuu uraani-235 tai plutonium-239 isotooppien fission eli halkeamisreaktioon (Fthenakis & Kim 2007: 2552; Rondinella & Wiss 2010: 25). Polttoaineena ydinvoimaloissa käytetään usein uraanidioksidia (UO_2), jota rikastetaan yleensä fissiokelpoisella uraani-235:llä (Rondiella & Wiss 2010: 25; Ewing 2015: 252). Uraanidioksidin sekaan voidaan myös sekoittaa plutoniumdioksidia (PuO_2) (Olander 2009: 2). Zinklen ja Wasin (2013: 735) mukaan uraani-235:n fissiosta saadaan kahdeksan kertaa enemmän energiaa (n. 200 MeV) atomia kohden kuin esimerkiksi fossiilisten polttoaineiden polttamisesta. Ydinpolttoaineen fissiossa syntyy kaksi keskiraskasta ydintä, joiden liike-energia kattaa noin 80 % fission kokonaisenergiasta. (Rondinella & Wiss 2010: 25). Kahden keskiraskaan ytimen lisäksi fissiossa vapautuu myös neutroneja, jotka osuessaan toisiin ytimiin saavat aikaan uusia fissioita ja täten ketjureaktion (Ewing 2015: 252). Vapautuneiden neutronien liike-energia kokonaisenergiasta on vain noin 3 % (Rondinella & Wiss 2010: 25). Rondinellan ja Wissin mukaan (2010: 25) energiaa syntyy myös gammasäteistä, neutriinoista ja fissiotuotteiden radioaktiivisesta hajoamisesta.

Nianin (2015: 438) mukaan ydinvoimalassa yksi kilogramma uraania vastaa energiamäärältään noin 45 000 kiloa puuta ja 22 000 kiloa hiiltä. Ydinenergia tuotetaan yleisesti uraanista valmistetuista ja päällekkäisistä polttoainepelleteistä, jotka on pakattu useisiin vierekkäisiin polttoainesauvoihin (Ashley 2015: 142). Ydinvoimalassa käytetty polttoaine on ydinjätettä, jonka vaarallisuus johtuu pääosin plutoniumin, neptuniumin ja curiumin radioaktiivisuudesta (Salvatores 2005: 805). Näistä plutonium on pisimpään radioaktiivinen (yli 100 000 vuotta), mutta loppusijoituksen yhteydessä plutoniumia voidaan

poistaa jätteestä ja heikentää sen radioaktiivisuutta jopa kymmenesosaan (Salvatores 2005: 806).

Uraania taas esiintyy kallio- ja maaperässä riittävästi, sillä sitä on laskettu olevan noin 3 grammaa tonnia kohden (Nian 2015: 438). Maailman ydinenergiajärjestön mukaan (World Nuclear Association 2021) suurimmat uraanin tuottajat vuonna 2020 olivat Kazakstan, Australia ja Namibia. Näistä Australialla on maailman suurimmat uraanivarannot (Lenzen 2008: 2180). Uraania voidaan saada avolouhoksesta, maanalaisesta kaivoksesta tai liuottamalla se maaperästä (Ashley 2015: 140). Sitä on kuitenkin aina jalostettava käyttökelpoiseen muotoon, mikä aiheuttaa ympäristövaikutuksia (Nian 2015: 438). Esimerkiksi avolouhoksen ja maanalaisen kaivoksen murskatusta kiviaineksesta on kemiallisesti rikastettava uraanioksidia (U_3O_8) eli ”keltaista kakkua”, jossa käyttökelpoista uraani-235:ttä on vain noin 0,7 % (Vuori ym. 2002: 29). Uraanioksidi muutetaan heksafluoridiksi (UF_6), josta uraani-235:ttä rikastetaan runsaspitoisemmasta uraani-238:sta (kaasudiffuusiolla tai -sentrifugilla) (Fthenakis & Kim 2007: 2552). Uraani-238 ei ole ydinenergiatuotantoon sopivaa polttoainetta sen stabiiliuden takia, mutta lopullisissa UO_2 -polttoainepelleteissä sitä on edelleen jopa 97 % (Fthenakis & Kim 2007: 2552).

Polttoainepelletit ovat käytössä ydinvoimalassa noin kolme tai neljä vuotta ennen niiden poistamista (Vujić ym. 2012: 39). Käytetyt polttoainepelletit ovat hyvin radioaktiivisia, jonka takia ne on käsiteltävä erittäin tarkasti (Ewing 2015: 252). Käytetyssä polttoaineessa uraanin osuus suhteessa plutoniumiin on pienentynyt fissiotoiminnan takia (Ewing 2015: 252). Suomessa vallitseva ratkaisu ydinjätteen suhteen on pitkäikäinen varastointi ja geologinen loppusijoitus (Vuori ym. 2002: 24). Varastoinnissa ydinjäte laitetaan muutamaksi vuosikymmeneksi jäädytysaltaaseen radioaktiivisuuden ja lämmön vähentämiseksi ennen lopullista sijoittamista kallioperään (Vujić ym. 2012: 39).

2.3 Ydinreaktorit

Yleisimmät ydinvoimaloissa käytettävät reaktorit ovat painevesireaktori ja kiehumisvesireaktori, jotka molemmat ovat kevytvesireaktoreita (Zinkle & Was 2013: 736). Kevytvesireaktorit ovat reaktorityyppejä, jotka käyttävät jäädytyksessä normaalia,

puhdistettua vettä (Lin 2009: 207). Näistä painevesireaktoreiden osuus on globaalisti yli 60 % ja kiehutusvesireaktoreiden noin 21 % (Zinkle & Was 2013: 736). Nykyiset, onnettomuuksien jälkeen parannellut reaktorit edustavat uutta sukupolvea ydinreaktoreiden historiassa (Olander 2009: 2). Uusissa reaktoreissa on tavoitteena saada parempaa tehokkuutta, turvallisuutta ja suorituskykyä (Vujić ym. 2012: 39). Siltikin nykyisillä reaktoreilla vain noin kolmasosa fissioenergiasta saadaan muutettua sähköksi (Safa 2012: 553). Olander (2009: 2) ja Vujić ym. (2012: 39) esittävät, että painevesireaktorin ytimessä on zirkonium-tinaseoksesta valmistettuja polttoainesauvoja, joiden sisällä on UO_2 -pellettejä tai UO_2 :n ja PuO_2 :n seosta. Tulevaisuudessa on myös mahdollista, että toriumista tulee tärkeä ydinenergian lähde reaktoreissa (Ashley 2015: 137). Lähivuosina monet vanhat ydinreaktorit ovat tulossa käyttöikänsä päähän, mikä näkyy esimerkiksi reaktoreiden ruostumisena ja haurastumisena (Zinkle & Was 2013: 735).

Reaktoreiden toimintaperiaate perustuu fissiona syntyneiden neutronien aiheuttamaan ketjureaktioon (Ewing 2015: 252). Ketjureaktiota säädellään liikuteltavien, neutroneja absorboivien säätösauvojen avulla (Olander 2009: 2). Pudottamalla nämä säätösauvat polttoainesauvojen väliin kokonaisuudessaan voidaan reaktori sammuttaa jopa sekunneissa (Yoon ym. 2009: 1858). Onnettomuuksien estämiseksi ydinreaktoreiden säätösauvoille onkin asetettu vaatimuksia, että niiden pitää päästä liikkumaan vapaasti 90 % reaktorin sisään maanjäristyksen tai jäähdytysveden vuodon sattuessa (Yoon ym. 2009: 1857). Reaktorissa kulkee lisäksi polttoainesauvojen välissä jäähdytysvettä, joka imee ydinreaktioista syntynyttä lämpöä (Zinkle & Was 2013: 736). Jäähdytysveteen lisätään usein myös liukoista booria, joka säätösauvojen ohella absorboi neutroneja ja täten hillitsee ketjureaktiota (Carelli ym. 2004: 156). Zinklen ja Wasin (2013: 736) mukaan zirkonium-tinaseoksella verhoillut polttoainesauvat estävät fission radioaktiivisten sivutuotteiden pääsyn ympäristöön.

Radioaktiivisuus ja sen tuottama lämpö on otettava turvallisuusselvityksissä vakavasti. Olander (2009: 2) esittää artikkelissaan kevytvesireaktoreiden tärkeimmät turvallisuusvaatimukset. Kevytvesireaktorin ytimen polttoainesauvojen täytyy olla tukevasti kiinni ja jäähdytysveden on päästävä poistamaan vapaasti fissiolämpöä. Toisaalta fissiona syntyneitä neutroneja on absorboitava säätösauvojen avulla, mutta kuitenkin niin, että lämpöteho riittää vielä höyrystämään energiantuotannossa käytettävän veden. Zinkle ja Was (2013) esittelevät ydinvoimalaitoksen sähköntuotantomekanismiin kevytvesireaktoreissa. Heidän mukaansa painevesireaktorissa noin 15,5 megapascaliin (MPa) paineistettu ensiöpiirin nestemäinen vesi saapuu 275 °C:ssa reaktorin sydämeen ja poistuu sieltä 325 °C:ssa. Höyrystimessä veden painetta alennetaan, jolloin vesi höyrystyy ja siirtyy toisiopiiriin.

Toisiopiirissä taas höyry pyörittää turbiinia ja synnyttää generaattorin avulla sähköä. Lopulta lauhduttimessa höyry tiivistyy takaisin vedeksi ja palaa järjestelmään samalla luovuttaen ylimääräisen lämpönsä meriveteen. Zinklen ja Wasin (2013) mukaan kiehutusvesireaktorit eroavat edellä kuvatuista painevesireaktoreista siten, että niissä on vain yksi vesikiertopiiri eli höyry virtaa suoraan reaktorin sydämen ja turbiinin välillä ilman paineistusta ja höyrystintä.

3. Ydinvoiman ympäristövaikutukset

3.1 Jäähdytysvedet

Ydinvoimalat rakennetaan yleensä vesistöjen läheisyyteen, jotta jäähdytysveden saanti voidaan turvata. Poorniman ym. (2005: 307) mukaan rannikkoalueiden hyödyntäminen onkin edullisin tapa toteuttaa ydinvoimalan jäähdytys. Ennakolta ydinvoiman suurin ympäristöuhka liittyy vesistöjen lämpenemiseen, kun jäähdytysjärjestelmän lämmittämät vedet lasketaan takaisin luontoon (Verones ym. 2010: 9364). Tämä uhka meriin, järviin ja jokiin on tiedostettu jo 1950-luvulta lähtien (Lin ym. 2021: 1). Ympäristöön lasketut jäähdytysvedet voivat nostaa pintalämpötiloja jopa 8 °C:lla (Teixeira ym. 2012: 161). Ympäristönsuojelun kannalta lämpötilan muutoksen aiheuttamia seurauksia on elintärkeää tutkia. Verones ym. (2010) havaitsivat tutkimuksissaan, että vesieliöt ovat hyvin herkkiä lämpötilan vaihteluille, minkä takia jäähdytysvesien on havaittu aiheuttavan merkittäviä vaurioita vesistöjen ekosysteemeihin.

Ilmastonmuutos aiheuttaa myös ydinvoimalan toiminnalle oman haasteensa. Ilmaston lämmitessä lämpenevät myös merivedet, mikä alentaa veden viilentävää vaikutusta entisestään jäähdytysjärjestelmissä (Attia 2015: 371). Attia (2015: 372) havaitsi, että otetun veden lämpötilan nousu laskee ydinvoimalan tehoa ja lämpöhyötysuhdetta, mikä johtaa entistä lämpimämpiin jäähdytysvesiin. Lämmenteet jäähdytysvedet voivat johtaa jopa laitoksen osittaiseen tai lopulliseen hiljentämiseen (Ahmad 2021: 756). Ahmadin (2021) mukaan myös vedenottokanavien tukkeutuminen voi olla mahdollista biologisten ja fysikaalisten

olosuhteiden muuttumisen takia. Lauhduttimien tekniikkaa on kuitenkin parannettava ilmastonmuutoksen edetessä, jotta voimaloiden tehokkuus ei laskisi (Attia 2015: 378).

Merkittävä osa fissioreaktioiden aiheuttamasta lämmöstä siirtyykin suoraan vesistöihin, koska ydinvoimalan tuottaman höyryn hyötysuhteen on laskettu olevan vain noin 30–35 % (Safa 2012: 553; Zhang ym. 2022: 1). Vesistöihin päätyvä hukkalämpö syntyy höyryn tiivistyessä lauhduttimessa takaisin nestemäiseksi vedeksi (Saravanan ym. 2008: 385). Safan (2012: 553) mukaan hukkalämpöä voitaisiin edullisesti hyödyntää erityisesti kaukolämpöverkostoissa, mutta toiminta laskisi ydinvoimalan tehokkuutta. Toisaalta Safa (2012: 553) toteaa myös, että jäähdytysveden riittämätön lämpötila ja ydinvoimaloiden etäinen sijainti kaukolämpöä varten aiheuttaisivat haasteita. Jäähdytysveden lämpötilan pitäisi olla 100–140 °C, jotta sen hyödyntäminen olisi kannattavaa (Safa 2012: 559).

Ydinvoimala ottaa rannikolta merivettä keskimäärin kolme kuutiometriä minuutissa yhtä megawattia kohden (Poornima ym. 2005: 307 Schubelin & Marcyn 1978 mukaan). Ydinvoimalan läpi kulkeva merivesipiiri ottaa veden tietystä paikasta ja laskee sen toisaalle, minkä ansiosta voidaan helposti tutkia lasketun veden ekologisia vaikutuksia (Saravanan ym. 2008: 385). Zhang ym. (2022) ovat tutkineet ja mallintaneet ydinvoimalan hukkalämmön siirtymistä rannikkovesiin ja huomasivat, että lämpötilan nousun lisäksi merivesi voi myös kerrostua lämpökuormituksen takia. Kaukokartoituksilla käyttäen infrapunaa aallonpituutta voidaan tutkia lämpökuormituksen leviämistä ja näin analysoida seurauksia (Zhang ym. 2022). Analyysien pohjalta voidaan asettaa rajoituksia jäähdytysveden lämpötilalle (Attia 2015: 372). Suuremman lämpötilan lisäksi poistovesi sisältää usein myös jäännösklooria, jota lisätään jäähdytysveteen järjestelmän likaantumisen estämiseksi ja se vaikuttaa erityisesti pieneliöiden, kuten bakteerien ja planktonien toimintaan. (Saravanan ym. 2008: 385).

Vesieliöille veden lämpötila on tärkeimpiä tekijöitä kasvun ja lisääntymisen kannalta (Poornima ym. 2005: 308). Veronesin ym. (2010: 9364) mukaan vesikasvit sietävät lämmönvaihtelua paljon enemmän kuin muut eliöt. Trooppisilla merialueilla meriveden lämpötila voi nousta jopa 30 °C:een, joka on jo hyvin lähellä monien organismien lämmönsietokykyä (Teixeira ym. 2012: 161). Lämpötilan noustua vesieliöt ovat ekosysteemeissä paljon aktiivisempia, mikä johtaa suurempaan ravinnontarpeeseen sekä mahdollisesti lisääntymishäiriöihin (Verones ym. 2010: 9364). Tällaiset suorat vaikutukset ovat usein selkeämmin nähtävissä. Poorniman ym. (2005: 308) mukaan kaikkien eliöiden aineenvaihdunta myös lisääntyy, mikä johtaa vesistöissä happipitoisuuden laskuun. Varsinkin

planktonisten eliöiden, kuten kasviplanktonin, määrän muutos voi aiheuttaa merkittäviä seurauksia myös ekosysteemin muilla trofiatasoilla (Poornima ym. 2005: 308). Täten ravinnon määrän lasku ja lisääntynyt kilpailu ovat lämpenemisestä johtuvia epäsuoria vaikutuksia, joiden merkitystä ei voi sivuuttaa (Verones ym. 2010: 9364).

Lisäksi jäähditysvesien jäännöskloori voi kulkeutua organismien solukalvon läpi aiheuttaen ongelmia aineenvaihdunnassa. Varsinkin kasviplankton on herkkä kloorille (Poornima ym. 2005: 308). Chuang ym. (2009) havaitsivat tutkimuksissaan kloorin heikentävän kasviplanktonin tuottavuutta jopa ilman lämpötilan nousua. Erilaisten levien ja sienien tuottavuus ei kuitenkaan laskenut jäännöskloorin takia (Chuang ym. 2009). Poornima ym. (2005: 311) havaitsivat, että jäähditysvedet eivät vaikuttaneet kuitenkaan veden suolapitoisuuteen, pH-arvoon tai ravinteiden määrään. Tutkimukset osoittivat myös, että lopulta vaikutukset planktoneihin jäivät suhteellisen paikalliselle tasolle. Lämpökuorman vähentäminen otettua vesikuutiota kohden ei välttämättä ole toimiva ratkaisu, sillä suurempi vesimäärä johtaa myös lisääntyneeseen klooraukseen (Poornima ym. 2005: 314).

Kloorattujen jäähditysvesien leviämiseen ja siitä aiheutuviin vaikutuksiin osallistuvat monilla alueilla vuoroveden voimakkuus ja suunta, tuuli sekä vesistön syvyys (Zhang ym. 2022). Myös voimalaitoksen maantieteellisellä sijainnilla on keskeinen rooli jäähditysvesien kulkeutumisessa mereen (Jia ym. 2016: 106). Yleisesti ottaen mitä kauemmas jäähditysvesien poistoputken suulta mennään, sitä pienemmäksi lämpötilan nousu jää (Jia ym. 2016: 106). Huang ym. (2019) osoittivat tutkimuksissaan, että lämpökuormitus voi vaikuttaa kolmen kilometrin säteellä poistoputken suulta. Toisaalta Jia ym. (2016) todistivat, että lahdessa sijaitsevan ydinvoimalan jäähditysvesien aiheuttama lämpötilan nousu on suurempaa kuin suistossa tai avomerellä sijaitsevan ydinvoimalan. Lahdessa ympäröivien rantojen takia jäähditysvesien poistuminen ja sekoittuminen on heikompaa, jolloin alueen veden lämpötila nousee enemmän (Jia ym. 2016: 112; Lin ym. 2021). Suistossa taas vuorovesivirtaukset sekä suolaisen ja makean veden törmäminen aiheuttavat jäähditysvesien merkittävää ja nopeaa sekoittumista (Jia ym. 2016: 113). Pienimmät vaikutukset ekologiseen ympäristöön aiheutuu kuitenkin avomeren viereen sijoitetusta ydinvoimalasta veden nopean vaihtumisen ansiosta (Jia ym. 2016: 113).

Meriveden kerrostuminen lämpökuormituksen takia on merkittävä tekijä vesiekosysteemien toiminnan kannalta (Huang ym. 2019). Merivesi ei pääse enää sekoittumaan yhtä helposti, jolloin ravinteiden kierto häiriintyy (Huang ym. 2019). Ravinteiden

väheneminen vaikuttaa huomattavasti meren eliöiden ravinnonhankintaan saaliin käyttäytymisen muutoksen tai jopa katoamisen takia (Huang ym. 2019). Lämmöstä aiheutuneita haittoja lisäävät myös matala ja seisova vesi (Lin ym. 2021: 2). Vuorovedellä on todettu olevan merkittävin vaikutus lämpimän veden leviämisessä (Lin ym. 2021). Tuulien vaikutus ei ole yhtä suuri kuin vuorovesivirtojen, mutta suotuisaan suuntaan puhaltaessaan ne voivat edesauttaa jäähdytysvesien leviämistä (Zhang ym. 2022).

Jäähdytysvesien ympäristövaikutukset ulottuvat myös ympäristön biologisiin ominaisuuksiin. Vaikutukset voivat olla hyvin erilaisia eri alueilla riippuen merieliöiden lämpötilaherkkyydestä (Lin ym. 2021). Teixeira ym. (2012: 162) nostavat esiin, että monet kalalajit eivät saa ravintoa ja suojaa pohjikasvillisuudesta, koska pohjan levät ja sienet ovat hyvin herkkiä lämpötilan nousulle. Pohjikasvillisuuden ja suojapaikkojen vähennyttyä pienet mikroelinympäristöt katoavat ja sitä kautta biodiversiteetti laskee (Teixeira ym. 2012: 162). Levien ja sienien tuottavuus laskee veden lämpötilan noustessa, toisin kuin planktoneilla (Chuang ym 2009: 197). Levien ja sienien katoaminen saa kalat muuttamaan turvallisimmille vesille, mikä sekoittaa tietenkin lajien välistä dynamiikkaa (Teixeira ym 2012: 161). Teixeira ym. (2012: 169) havaitsivat, että eri kalalajeilla on lisääntymiseen tietyt optimilämpötilat, jolloin lämpötilan muutamankin asteen muutos voi vaikuttaa lisääntymismenestykseen merkittävästi.

Toisaalta taas makean veden ympäristöissä sekä veden kulkeutuminen että ympäristövaikutukset ovat hyvin poikkeavat. Meressä eliöt pystyvät pakenemaan lämmintä vettä kauemmas, mutta joissa ja järvissä tämä ei ole mahdollista rantojen ja joissa veden virtaamisen takia (Daufresne ym. 2004). Daufresnen ym. (2004: 134) mukaan jäähdytysvesi jäähtyy joessa noin 1 °C:n kilometrin matkalla, joten vaikutusalue ulottuu hyvin kauas. Jäähdytysveden aiheuttama lämpö onkin suurin jokiekosysteemiin vaikuttava tekijä (Verones ym. 2010: 9368). Verones ym. (2010: 9368) muistuttavat kuitenkin, että lämpökuormitus kohdistuu ydinvoimalasta vain alavirtaan ja lisäksi eri jokien vertailua vaikeuttaa alueiden eriävät ilmastolliset olosuhteet.

Järvissä taas virtaama on luonnollisesti hyvin alhainen, minkä takia lämpökuormitus on suurempaa. Paikallaan pysyvä lämpimämpi vesi aiheuttaa veden kerrostumista ja jääpeitteen heikkenemistä (Vinnä ym. 2017: 3969). Jääpeitteen heikkeneminen voi olla tietenkin vaarallista etenkin pilkkijöille (Vuori ym. 2002: 16). Vuoren ym. (2002: 16) mukaan kalat ovatkin halukkaita tulemaan lähemmäs jäähdytysvesien purkupaikkaa, koska siellä

kasvillisuus on rehevämpää ja vesi lämpimämpää. Vinnå ym. (2017) saivat selville, että järvissä jäähdytysvesien aiheuttama lämpötilan muutos vaihtelee paljon sekä alueellisesti että ajallisesti vuodenaikojen välillä. Talvisin järveden lämpötila voi nousta paikallisesti jopa 3,4 °C ja koko järven mittakaavassa noin 0,3 °C (Vinnå ym. 2017: 3983). Kesäisin taas lämpövaikutus on pienempi (0,1 °C) johtuen suuremmasta virtaamasta. Järvissä myös tuulella on merkittävä rooli veden kierrossa (Vinnå ym. 2017).

Makeissa vesissä siis veden lämpötila ja virtaama ovat suurimpia eliöiden dynamiikkaa sääteleviä tekijöitä (Daufresne ym. 2004: 134). Daufresne ym. (2004: 134) havaitsivat tutkimuksissaan eri kalojen ja selkärangattomien eliöiden populaatioissa muutoksia lämpötilan nousun takia. Tämä todistaa, että jotkin lajit hyötyvät toisten kustannuksella ja ekologinen tasapaino järkkyy. Kuitenkin jäähdytysvesien vaikutus, verrattuna ilmastonmuutoksen aiheuttamaan lämpötilan nousuun, on suhteellisen vähäinen (Daufresne ym. 2004: 138). Toisaalta Vinnån ym. (2017: 3985) mukaan jäähdytysvesistä voi tietyissä järvissä haihtua noin 40 % niiden sisältämästä lämmöstä, mikä on tietenkin omiaan lisäämään lämpimän vesihöyryn määrää ilmakehässä. Jäähdytysvedet siis vaikuttavat paikallisesti voimaloiden lähetyvillä hyvin paljon vesistöjen ekosysteemeihin.

3.2 Kasvihuonekaasupäästöt

Kasvihuonekaasuista hiilidioksidia pidetään suurimpana ilmastoa lämmittävänä tekijänä (Vujić ym. 2012: 36). Elinkaariarvioiden mukaan ydinvoima tuottaa 22,80 tonnia hiilidioksidia gigawattituntia kohden (Nian ym. 2014: 80). Nianin (2015: 437) mukaan ydinvoima on hiilidioksidipäästökertoimilla mitattuna parhaimpia energiantuotantomuotoja. Yhdellä ydinreaktorilla voidaan säästää hiilidioksidipäästöjä 1,7 miljoonaa tonnia vuodessa verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin (Safa 2012: 558). Ydinvoiman hiilidioksidipäästökerrointa voidaan kuitenkin erilaisten uraanin käsittelytapojen avulla saada vielä nykyistäkin pienemmäksi (Nian 2015: 438). Ashley ym. (2015: 137) mukaan esimerkiksi polttoaineen kierrättämisellä voidaan saada aikaan merkittäviä sekä hiilidioksidi- että kustannussäästöjä. Kierrätettäviä ja uudelleenkäytettäviä polttoaineen materiaaleja hyödynnetään kuitenkin suhteellisen vähän,

koska samalla toiminnan tehokkuus kärsisi (Ashley 2015: 136). Tämä johtaa Ashley'n ym. (2015: 136) mukaan uraanin kovaan kysyntään lisääntyneen kulutuksen takia.

Uraanin kysynnän kasvun lisäksi ongelmaksi muodostuu uraanimalmin laadun heikkeneminen eli uraanipitoisuuden lasku (Warner & Heath 2012: 87). Warner ja Heath (2012: 87) kirjoittavat, että laadun heikkeneminen johtaa parempilaatuisemman uraanimalmin hinnan nousuun ja kasvihuonekaasupäästöjen lisääntymiseen. Kasvihuonekaasut lisääntyvät, koska uraania täytyy etsiä ja louhia entistä enemmän sen laadun ja määrän heikennyttyä. Uraania on itsessään silti saatavilla maapallolla runsaasti ja sitä on arvioitu riittävän vielä tämän vuosisadan loppuun, mutta tämän uusiutumattoman luonnonvaran kuluminen on merkittävä haaste ydinvoiman tulevaisuudelle (Vuori ym. 2002: 27). Tonni maankuoren kiveä sisältää uraania noin 1–5 grammaa (Lenzen 2008: 2179; Nian 2015: 438). Toisaalta polttoaineen kierrättämisellä ja jalostuksella nykyiset uraanivarat voisivat riittää jopa tuhansiksi vuosiksi eteenpäin (Vujić ym. 2012: 39). Uraanimalmin louhinta vaatiikin suuria energiamääriä, mikä nostattaa ydinvoiman välillisiä hiilidioksidipäästöjä (Warner & Heath 2012: 73). Uraanin hankinta, jalostus, rikastaminen ja kuljetus aiheuttavat suurimmat kasvihuonekaasupäästöt koko ydinvoimalan elinkaaren aikana (Ashley ym. 2015: 136).

Uraanin käsittelyn lisäksi ydinvoimalan purkamisesta ja rakentamisesta sekä radioaktiivisen jätteen loppusijoituksesta aiheutuu huomattavia kasvihuonekaasupäästöjä (Wallbridge ym. 2013: 990). Lenzenin (2008: 2178) mukaan ydinvoimalan kasvihuonekaasupäästöt aiheutuvatkin muualla kuin itse laitosalueella. Wallbridge ym. (2013: 990) toteavat myös, että päästöjen lähteet vaihtelevat huomattavasti eri voimaloiden kesken. Kunkin ydinvoimalan kasvihuonekaasupäästöjä tarkastellaan yksikön elinkaariarvioinnissa, jossa lähinnä välillisten päästöjen määrää vertaillaan fossiilisten polttoaineiden päästöihin (Warner & Heath 2012: 73). Ongelmana elinkaariarvioiden välillä on ollut toisinaan epäselvät ja epä johdonmukaiset tulokset, mikä aiheuttaa haasteita niin eri voimaloiden kuin eri energiantuotantotapojen vertailuun (Warner & Heath 2012: 73). Fthenakis & Kim (2007) uskovat, että epä johdonmukaisten elinkaariarvioiden taustalla ovat erilaiset käytettävät menetelmät, jotka huomioivat kasvihuonekaasupäästöjen lähteet eri tavoilla. Elinkaariarvioinnissa on otettava myös huomioon kaivoksissa mahdollisesti muut louhittavat metallit, jotta päästöjen määrät saadaan allokoitua oikeissa suhteissa metalleille (Lenzen 2008: 2180). Lisäksi uraanimalmin laadulla on suuria vaikutuksia lopullisten päästöjen määrään (Warner & Heath 2012: 73).

Kasvihuonekaasupäästöjä laskettaessa voidaan ydinvoimalan elinkaari jakaa Warnerin & Heathin (2012: 74) mukaan kolmeen osaan, joista ensimmäinen sisältää voimalan rakentamisen ja siihen liittyvät kuljetukset. Toinen vaihe koostuu polttoainekierrosta ja voimalan ylläpidosta. Kolmanteen osaan kuuluu voimalan purkutyöt sekä radioaktiivisen jätteen käsittely ja varastointi. Lenzenin (2008: 2178) mukaan ensimmäinen ja kolmas vaihe ovat eniten päästöjä tuottavia vaiheita ydinvoimalan elinkaareissa. Elinkaaren kasvihuonekaasupäästöjen voidaan jatkossa odottaa vähenevän, jos teknologian kehittyessä uraania voidaan rikastaa pienemmällä energiamäärällä (Warner & Heath 2012: 87).

Toisaalta Warner & Heath (2012: 87) havaitsivat, että uraanimalmin laadun heikkeneminen voi johtaa huomattavaan päästöjen lisääntymiseen. Malmilaadun heikennyttyä pitää siis louhia enemmän uraanimalmia saman polttoainemäärän tuottamiseksi, mikä kuluttaa luonnollisesti energiareсурseja (Nian 2015: 446; Pomponi & Hart 2021: 3). Warner & Heath (2012: 87) pitävät tätä todennäköisempänä skenaariona päästöjen kasvuun. Nian (2015: 445) taas pitää näitä laatumuutoksista johtuvia seurauksia elinkaaripäästöihin epävarmana. Ashley ym. (2015: 146) mukaan ydinpolttoainekierto tapahtuu kuitenkin usean maan kesken, minkä takia sekä päästöjen että muiden paikallisten vaikutusten arviointi vaikeutuu. Lisäksi komponenttien kuljetus rajojen yli on omiaan lisäämään päästöjä entisestään (Ashley ym. 2015: 146).

Ensimmäisessä vaiheessa ydinvoimalan rakentaminen ei aiheuta minkäänlaista säteilyvaaraa, mutta aiheuttaa rakennusmateriaalien ja kuljetusten takia kasvihuonekaasupäästöjä (Ashley ym. 2015: 147). Kuljetukset voivat nostaa liikenteen aiheuttamia päästöjä noin 10–20 % (Fennovoima 2014: 120). Luvut kuvaavat vain aktiivisimman rakentamisen vaiheen päästökuormaa, joten todellisuudessa ne ovat kuitenkin koko rakentamisprosessin aikana alhaisemmat. Fennovoiman (2014: 120) raportin mukaan päästöjen vaikutus jää kuitenkin hyvin paikalliselle tasolle. Ashley ym. (2015: 147) ja Nian (2015: 437) nostavat lisäksi esiin, että ydinvoimalan koolla on huomattava vaikutus kasvihuonekaasupäästöjen määrään, sillä rakennusmateriaalien tarve tuotettua energiamäärää kohden pienenee. Lenzenin (2008: 2185) mukaan myös rakennettavan reaktorin tyypillä on iso vaikutus energiantarpeeseen. Rakennusmateriaaleina käytettävien betonin, teräksen, kuparin ja alumiinin hankinta sekä kuljetus vaativat suuria energiapanostuksia (Fthenakis & Kim 2007: 2553). Näistä materiaaleista betonin ja teräksen vaikutus elinkaaripäästöihin kattaa noin 95 % kaikista käytetyistä rakennusmateriaaleista (Fthenakis & Kim 2007: 2553).

Toiseen vaiheeseen kuuluva sähköntuotanto- eli ylläpitovaihe ei aiheuta käytännössä päästöjä lainkaan (Lenzen 2008: 2178). Ainoastaan ydinvoimalaitoksen lämmittämiseen ja höyrystimien käyttöön kuluu polttoainetta, joka kuormittaa ilmastoa (Fthenakis & Kim 2007: 2555). Polttoainekierto sisältäen erityisesti uraanin louhimisen ja jalostamisen aiheuttaa taas merkittävän osan koko elinkaaren päästöistä (Nian 2015: 438). Kaivosvaiheen kasvihuonekaasupäästöjä olisikin syytä alentaa paranneltujen ja tehokkaampien louhintatekniikoiden avulla (Ashley ym. 2015: 148). Uraani jauhetaan yleensä suhteellisen lähellä kaivosta, jolloin kuljetustarve vähenee (Lenzen 2008: 2181). Jauhettu uraani täytyy muuttaa ennen rikastusta uraaniheksafluoridiksi, mikä vaatii jälleen energiaa (Lenzen 2008: 2182). Uraanin rikastamisessa taas energiatehokkaampaa olisi käyttää kaasusentrifugimenetelmää kuin nykyisin vallitsevaa kaasudiffuusiota (Nian 2015: 442; Ashley ym. 2015: 147). Nykyinen kaasudiffuusio kuluttaa jopa 40 kertaa enemmän energiaa kuin sentrifugitekнологia (Fthenakis & Kim 2007: 2552). Sentrifugitekнологian avulla voitaisiin siis kompensoida uraanimalmin heikkenemisestä lisääntyviä elinkaaripäästöjä. Muun muassa Ranskassa ja Yhdysvalloissa onkin jo siirrytty kohti sentrifugitekнологiaa (Nian 2015: 444).

Kolmannessa vaiheessa ydinvoimalan käytöstä poisto ja purkaminen ovat paljon energiaa vaativia prosesseja (Fthenakis & Kim 2007: 2553). Vaikka ydinjätteellä voidaan ajatella olevan vain radioaktiivisia vaikutuksia, on myös huomioitava sille tehtävät kapseloinnit ja loppusijoitukset maankuoreen. Ydinjäte suljetaan kuparista tai teräksestä valmistettuun kapseliin ja sijoitetaan syvälle maankuoreen, mitkä lisäävät tietenkin kaivosteollisuuden kautta energiankäyttöä ja siten myös kasvihuonekaasupäästöjä (Fthenakis & Kim 2007: 2553). Ydinjätteen loppusijoituksen yhteydessä on otettava huomioon myös käytön aikana siinä syntyneet kemialliset muutokset, jotka voivat vaikuttaa eri loppusijoitusstrategioiden turvallisuuteen (Ewing 2015: 252). Radioaktiivista jätettä voidaan käsitellä uudelleen, jolloin loppusijoitettavan jätteen määrä vähenisi (Lenzen 2008: 2186). Näin voitaisiin vähentää ydinvoimalan elinkaaren kolmannen vaiheen päästöjä.

4. Pohdinta ja johtopäätökset

Ydinvoima käsitteenä aiheuttaa yhteiskunnassa runsasta keskustelua ja jakaa mielipiteitä. Keskustelun ja polarisoivien mielipiteiden taustalla ovat ydinvoiman aiheuttamat ympäristövaikutukset. Ensinnäkään ydinvoima ei ole useiden tutkimusten mukaan kasvihuonekaasupäästötön sähköntuotantotapa, vaikka usein niin ajatellaankin. Arvioitaessa ydinvoiman koko elinkaaren hiilidioksidipäästökerrointa luku on yllättävänkin suuri. Toisaalta kasvihuonekaasupäästöjen lisäksi ydinvoimalasta aiheutuu myös säteilyvaikutuksia ympäröivään luontoon sekä ihmisiin. Näihin säteilyhaittoihin ydinvoiman kritisoijat perustavat hyvin usein kantansa. Säteilyarvot normaaliolosuhteissa eivät kuitenkaan ole normaalia taustasäteilyä suuremmat, joten merkittävän säteilyaltistuksen vaara on vain suurien ydinvoimalaonnettomuuksien tapauksissa. Mahdolliset onnettomuudet on otettu aina erittäin vakavasti ihmisten keskuudessa, mistä osoituksena ovatkin hyvin tarkat säännökset ja turvallisuusprotokollat. Kolmantena ja todennäköisesti suurimpana haittana on pidetty ydinvoimaloiden jäähdytysvesien vesistöjä lämmittävää vaikutusta. Jäähdytysvesillä on todettu olevan merkittävä vaikutus paikallisten vesistöjen lämpötilaan ja sitä kautta ekosysteemeihin.

Näiden ydinvoiman haittojen esittäminen suuruusjärjestyksessä ei kuitenkaan ole kovin mielekästä, sillä erityyppisille haittavaikutuksille on vaikeaa löytää yhteistä arviointisuureta. Esimerkiksi lämpötilan muutosta ja hiilidioksidipäästöjen suuruutta sekä niistä aiheutuneita vaikutuksia on hyvin vaikeaa vertailla keskenään. Työssäni perehdyinkin vain jäähdytysvesiin ja kasvihuonekaasupäästöihin, koska normaaliolosuhteissa säteilyvaikutukset ovat lähes merkityksettömiä.

Jäähdytysvesiä käytetään fissiossa syntyneen lämmön poistamiseen ydinreaktorista ja yleensä ne otetaan edullisuuden takia rannikkovesistä (Poornima ym. 2005: 307). Rannikoiden hyödyntäminen ydinvoimaloiden sijoittamisessa onkin hyvin järkevää, sillä ydinvoimalan toiminta vaatii runsaasti vettä. Tietenkin jäähdytysvesien aiheuttama lämpökuormitus on paikallisesti merkittävä ympäristöriski, mutta haitat jäävät monissa tapauksissa hyvin pieniksi. Toisaalta ydinvoimalan sijainnilla on hyvin tärkeä rooli vaikutusten suuruuteen, sillä Jia ym. 2016 todistivat, että lahdessa sijaitsevan ydinvoimalan jäähdytysvedet eivät pääse sekoittumaan yhtä nopeasti ympäröivään veteen. Avomerellä taas lämmennyt vesi kulkeutuu äkkiä kauas, eikä täten ehdi aiheuttaa suuria vaikutuksia eliöihin.

Eliöiden ja ekosysteemin kannalta ilmastonmuutoksellakin on roolinsa vesistöjen lämpenemisessä. Ydinvoimalan läheisyydessä eläville eliöille tulee siis lämpöpainetta kahdesta suunnasta. Ilmastonmuutoksen takia lämmenneet vedet lämpenevät ydinvoimalan jäähdytysjärjestelmissä entisestään, jolloin kielteisten vaikutusten ketju on valmis. Tietenkin jotkin lajit sietävät lämmönvaihteluita huomattavasti enemmän kuin toiset, minkä takia alueen lajistollinen monimuotoisuus voi vähentyä (Verones ym. 2010: 9364). Tämä on hyvin huolestuttava asia, jota pitäisi tutkia paljon enemmän. Monet lämpötilamuutoksille herkät lajit ovatkin juuri niitä biodiversiteettiä ylläpitäviä lajeja, jotka tarvitsisivat suojelua. Esimerkiksi monet lohikalat ovat hyvin herkkiä lämpötilan nousulle. Onkin siis hyvin huolestuttavaa, jos arvokkaat lohikalat korvautuvat paremmin lämpöä ja ravinteita sietävillä kalalajeilla.

Ilmastonmuutos vaikeuttaa myös ydinvoimaloiden toimintaa, koska lämmenneiden meri- tai järvesien viilentävä vaikutus on heikentynyt. Täten fissioenergiaa ei pystytä poistamaan laitoksesta yhtä helposti, mikä johtaa ydinvoimalan tehokkuuden laskuun. Tehokkuuden laskulla on sitten vaikutuksia jo energiavarmuuteen ja sähköntuotantoon. Yhteiskunnassa on pohdittava tämän jälkeen, mistä puuttuva energia saadaan. Tehokkuuden lasku ja sen kautta jopa ydinvoimalaitosten alasajo ovat tietenkin vain skenaarioita, jotka mahdollisesti aiheutuvat ilmastonmuutoksen ja jäähdytysvesien takia nousseista vesistöjen lämpötiloista. Tällä hetkellä suurempi ongelma onkin ilmastonmuutoksen hillitseminen, jotta edellä mainittuun tilanteeseen ei jouduttaisi.

Ilmastonmuutoksen hillinnässä avainasemassa on fossiilisten polttoaineiden käytöstä luopuminen. Ydinvoima on hyvä vaihtoehto korvaamaan fossiilisia polttoaineita, koska sen sähköntuotantovaiheen aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt ovat käytännössä nolla (Safa 2012: 558). Tietenkin koko ydinvoiman elinkaaren aikana kasvihuonekaasupäästöiltä ei voida välttyä, koska uraania pitää louhia ja rikastaa sekä käytetty polttoaine loppusijoittaa. Vujić ym. (2012: 41) kirjoittavat, että hiilivoima aiheuttaa oikeastaan enemmän säteilyä kuin ydinvoima. Se on hyvin mielenkiintoinen argumentti, sillä usein ajatellaan aivan toisin. Vujićin ym. (2012: 41) mukaan hiilivoima onkin ydinvoimaan verrattuna todella alisäänneltyä. Voidaan kysyä, että miksi hiilen sekä säteily- että kasvihuonekaasupäästöihin ei kiinnitetä julkisuudessa yhtä paljon huomiota. Taustalla voivat olla suuret yritykset ja rahavirrat, jotka kykenevät kääntämään poliittisten päättäjien katseet muualle. Ydinvoima on joutunut kärsimään muutaman suuren ydinvoimalaonnettomuuden takia merkittäviä imago tappiota. On hieman ristiriitaista, että hiilivoima ja muut fossiilisista polttoaineista energiansa saavat

tuotantomuodot voivat saastuttaa hiljalleen jatkuvasti, mutta ihmisten mielissä painaa vain pelot mahdollisista säteilyonnettomuuksista.

Tietenkään näitä mahdollisia säteilyvaaroja ei saa sivuuttaa, mutta nykyisten säädösten ja turvallisuusprotokollien ansiosta ydinvoimalaonnettomuuksien riskit ovat hyvin minimaaliset. Fukushima onnettomuus toisaalta todisti, että onnettomuuden syy ei löydy aina välttämättä laitoksen sisältä, vaan ulkopuoliset tekijätkin on otettava tarkasti huomioon. Nianin (2015: 437) mukaan Fukushima tapaus on ollut ydinvoiman kasvun esteenä ja laskenut sen suosiota. Tästä osoituksena ovat olleet monien, varsinkin kehittyneiden maiden päätökset vähentää ydinvoimaa pitkän ajan sitoutumisen jälkeen. Juuri tsunamien takia ydinvoimaloiden sijainnit yleensä merenrannoilla aiheuttavat ydinvoiman vastustajissa suurta huolta. Onnettomuuksien ja päästöjen estämiseksi jokaisen ydinvoimalahankkeen yhteydessä onkin tehtävä tarkat elinkaarianalyysit, joiden avulla voidaan arvioida ydinvoiman kelpoisuutta tietyllä alueella (Nian ym. 2014: 68).

Päästöjen tarkka määrittäminen on hyvin tärkeää, sillä sähköntuotanto aiheuttaa lähes puolet kaikista maailman kasvihuonekaasupäästöistä (Nian ym. 2014: 68). Ydinvoiman avulla voidaan ehkäistä ilmastonmuutosta, vaikka sillä säteilyvaikutuksia saattaakin olla. Lisäksi se on energiavarmuuden kannalta hyvin tärkeää, koska se ei ole Nianin ym. (2014: 68) mukaan mitenkään riippuvainen sääolosuhteista, toisin kuin monet uusiutuvat energianlähteet. Warner ja Heath (2012: 88) pohtivat, että ydinvoiman päästöt saattavat lisääntyä tulevaisuudessa, vaikka nykyisellään ydinvoiman kasvihuonekaasupäästöt eivät yllä lähellekään fossiilisten polttoaineiden vastaavia. Tähän syynä ovat hyvin todennäköisesti uraanimalmin laadun heikkeneminen sekä loppusijoittamisen aloittaminen. Toisaalta uraanimalmin laadun heikkeneminen johtaa lisääntyneeseen etsintään, jolloin tietenkin saatetaan löytää lisää hyvää uraania ja täten parantaa laadukkaan uraanimalmin riittävyttä. Mutta etsintään ja jalostukseen on käytettävä vähemmän energiaa kuin fissiosta saadaan, jotta toiminta olisi vielä kannattavaa.

Ydinvoiman kannattavuutta verrataan usein uusiutuviin energiantuotantomuotoihin. Ydinvoimalan kasvihuonekaasupäästöt ovat hieman suuremmat kilowattituntia kohden kuin uusiutuvilla energiantuotantomuodoilla, kuten vesi-, aurinko- ja tuulivoimalla (Lenzen 2008: 2178). Lenzen (2008: 2178) nostaa esiin kuitenkin ydinvoimalan tehokkuuden ja paljon pienemmän maankäytön. Esimerkiksi vesivoima on hyvin pitkälti kiinni maantieteellisestä sijainnista, vaikka sen elinkaaren päästökerroin ja kilpailukyky ovatkin paremmat kuin ydinvoimalla (Nian 2015: 437 IAEA:n raportin mukaan).

Ydinvoima siis polarisoi hyvin vahvasti ihmisten mielipiteitä. Toiset näkevät sen ainoana järkevänä energiantuotantomuotona, kun taas toiset pitävät sitä tulevien sukupolvien kannalta epärealistisena. Koronapandemia on laskenut energian kysyntää, joten hetkellistä helpotusta on tullut energiaongelmiin. Kuitenkin ennen pandemiaa vallinnut jatkuva energian kysynnän kasvu tulee jatkumaan pandemian väistyessä. Tähän ongelmaan on löydettävä pikaisesti ratkaisuja. Ratkaisut eivät vain saa koostua fossiilisista polttoaineista, jos haluamme pitää planeettamme elinkelpoisena.

5. Lähteet

- Ahmad, A. (2021). Increase in frequency of nuclear power outages due to changing climate. *Nat Energy*, 6, 755–762
- Aliyu, A.S., Ramli, A.T., Saleh, M.A. (2014). Environmental impact assessment of a new nuclear power plant (NPP) based on atmospheric dispersion modeling. *Stoch Environ Res Risk Assess*, 28, 1897–1911
- Ashley, S.F., Fenner, R.A., Nuttall, W.J., Parks, G.T. (2015). Life-cycle impacts from novel thorium–uranium-fuelled nuclear energy systems. *Energy Conversion and Management*, 101, 136-150
- Attia, S. I (2015). The influence of condenser cooling water temperature on the thermal efficiency of a nuclear power plant. *Annals of Nuclear Energy*, 80, 371-378
- Carelli, M.D., Conway, L.E., Oriani, L., Petrović, B., Lombardi, C.V., Ricotti, M.E., Barroso, A.C.O, Collado, J.M, Cinotti, L., Todreas, N.E., Grgić, D., Moraes, M.M., Boroughs, R.D, Ninokata, H., Ingersoll, D.T., Oriolo, F. (2004). The design and safety features of the IRIS reactor. *Nuclear Engineering and Design*, 230, 1–3, 151-167
- Chu, S., Majumdar, A. (2012). Opportunities and challenges for a sustainable energy future. *Nature*, 488, 294–303
- Chuang, Y.L., Yang, H.H., Lin, H.J. (2009). Effects of a thermal discharge from a nuclear power plant on phytoplankton and periphyton in subtropical coastal waters. *Journal of Sea Research*, 61, 4, 197-205

- Daufresne, M., Roger, M.C., Capra, H., Lamouroux, N. (2004). Long-term changes within the invertebrate and fish communities of the Upper Rhône River: effects of climatic factors. *Global Change Biology*, 10, 124-140
- Demek, J., Kalvoda, J. (1992). Geomorphology and the Location of Nuclear Power Plant Sites: the Czechoslovakian Experience. *GeoJournal*, 28, 4, 395-402
- Desnoyers, Y., Chilès, J-P., Dubot, D., Jeannée, N., Idasiak, J-M. (2011). Geostatistics for radiological evaluation: study of structuring of extreme values. *Stoch Environ Res Risk Assess*, 25, 1031–1037
- Ewing, R. (2015). Long-term storage of spent nuclear fuel. *Nature Mater*, 14, 252–257
- Fennovoima (2014). Ydinvoimalaitoksen ympäristövaikutusten arviointiselostus
- Fthenakis, V.M., Kim, H.C. (2007). Greenhouse gas emissions from solar electric and nuclear power, a life cycle study. *Energy Policy*, 35, 2549–2557
- Huang, F., Lin, J., Zheng, B. (2019). Effects of Thermal Discharge from Coastal Nuclear Power Plants and Thermal Power Plants on the Thermocline Characteristics in Sea Areas with Different Tidal Dynamics. *Water*, 11, 12, 2577
- IAEA (2020). Nuclear Share of Electricity Generation in 2020, Power Reactor Information System,
<https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/NuclearShareofElectricityGeneration.aspx> ,
 Viitattu 24.2.2022
- Jia, H., Zheng, S., Xie, J., Ying, X., Zhang, C. (2016). Influence of geographic setting on thermal discharge from coastal power plants. *Marine Pollution Bulletin*, 111, 1–2, 106-114
- Khosravi, A., Olkkonen, V., Farsaei, A., Syri, S. (2020). Replacing hard coal with wind and nuclear power in Finland- impacts on electricity and district heating markets. *Energy*, 203
- Lenzen, M. (2008). Life cycle energy and greenhouse gas emissions of nuclear energy: A review. *Energy Conversion and Management*, 49, 8, 2178-2199
- Lin, C.C (2009). A review of corrosion product transport and radiation field buildup in boiling water reactors. *Progress in Nuclear Energy*, 51, 2, 207-224

- Lin, J., Zou, X., Huang, F. (2021). Quantitative analysis of the factors influencing the dispersion of thermal pollution caused by coastal power plants. *Water Research*, 188
- Locatelli, G., Mancini, M. (2012). Looking back to see the future: building nuclear power plants in Europe. *Construction Management and Economics*, 30, 8, 623-637
- Nian, V., Chou, S.K, Su, B., Baully, J. (2014). Life cycle analysis on carbon emissions from power generation – The nuclear energy example. *Applied Energy*, 118, 68-82
- Nian, V. (2015). Change impact analysis on the life cycle carbon emissions of energy systems – The nuclear example. *Applied Energy*, 143, 437-450
- Olander, D. (2009). Nuclear fuels – Present and future. *Journal of Nuclear Materials*, 389, 1, 1-22
- Perotti, F., Domaneschi, M., De Grandis, S. (2013). The numerical computation of seismic fragility of base-isolated Nuclear Power Plants buildings. *Nuclear Engineering and Design*, 262, 189-200,
- Pomponi, F., Hart, J. (2021). The greenhouse gas emissions of nuclear energy – Life cycle assessment of a European pressurised reactor. *Applied Energy*, 290
- Poornima, E.H., Rajadurai, M., Rao, T.S., Anupkumar, B., Rajamohan, R., Narasimhan, S.V., Rao, V.N.R., Venugopalan, V.P. (2005). Impact of thermal discharge from a tropical coastal power plant on phytoplankton. *Journal of Thermal Biology*, 30, 4, 307-316
- Rashad, S.M., Hammad, F.H. (2000). Nuclear power and the environment: comparative assessment of environmental and health impacts of electricity-generating systems. *Applied Energy*, 65, 1–4, 211-229
- Rondinella, V.V., Wiss, T. (2010). The high burn-up structure in nuclear fuel. *Materials Today*, 13, 12, 24-32
- Safa, H. (2012). Heat recovery from nuclear power plants. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 42, 1, 553-559
- Salvatores, M. (2005). Nuclear fuel cycle strategies including Partitioning and Transmutation. *Nuclear Engineering and Design*, 235, 7, 805-816

- Saravanan, P., Priya, A.M., Sundarakrishnan, B., Venugopalan, V.P., Rao, T.S., Jayachandran, S. (2008). Effects of thermal discharge from a nuclear power plant on culturable bacteria at a tropical coastal location in India. *Journal of Thermal Biology*, 33, 7, 385-394
- Schubel, J.R., Marcy Jr. B.C. (1978). Power Plant Entrainment—A Biological Assessment. Academic Press, 19-189
- Teixeira, T.P., Neves, L.M. & Araújo, F.G. (2012). Thermal impact of a nuclear power plant in a coastal area in Southeastern Brazil: effects of heating and physical structure on benthic cover and fish communities. *Hydrobiologia*, 684, 161–175
- TEM (2017). Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030, Viitattu 24.2.2022
- Thurner, P.W, Mittermeier, L., Küchenhoff, H. (2014). How long does it take to build a nuclear power plant? A non-parametric event history approach with P-splines. *Energy Policy*, 70, 163-171
- Verones, F., Hanafiah, M.M., Pfister, S., Huijbregts, M.A.J., Pelletier, G.J., Koehler, A. (2010). Characterization Factors for Thermal Pollution in Freshwater Aquatic Environments. *Environmental Science & Technology* 44, 24, 9364-9369
- Vinnå, L.R., Wuest, A., Bouffard, D. (2017). Physical effects of thermal pollution in lakes. *Water Resources Research*, 53, 5, 3968-3987
- Vujić, J., Antić, D.P, Vukmirović, Z. (2012). Environmental impact and cost analysis of coal versus nuclear power: The U.S. case, *Energy*, 45, 1, 31-42
- Vuori, S., Lautkaski, R., Lehtilä, A., & Suolanen, V. (2002). Katsaus eri energiantuotantomuotojen ympäristövaikutuksiin. VTT Technical Research Centre of Finland. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2002/T2127.pdf>
- Wallbridge, S., Banford, A. & Azapagic, A. (2013). Life cycle environmental impacts of decommissioning Magnox nuclear power plants in the UK. *Int J Life Cycle Assess*, 18, 990–1008
- Warner, E., Heath, G. (2012). Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Nuclear Electricity Generation. *Journal of Industrial Ecology*, 16, 1, 73-92

- World Nuclear Association (2021). World Uranium Mining Production, <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/world-uranium-mining-production.aspx> Viitattu 8.3.2022
- Yoon, K.H., Kim, J.Y., Lee, K.H., Lee, Y.H., Kim, H.K. (2009). Control rod drop analysis by finite element method using fluid–structure interaction for a pressurized water reactor power plant. *Nuclear Engineering and Design*, 239, 10, 1857-1861
- Zhang, Q., RuiPing Guo, R., Zhang, C., Chen, X., Wang, B. (2014). Radioactive airborne effluents and the environmental impact assessment of CAP1400 nuclear power plant under normal operation. *Nuclear Engineering and Design*, 280, 579-585
- Zhang, Z., Wang, D., Cheng, Y., & Gong, F. (2022). Long-Term Changes and Factors That Influence Changes in Thermal Discharge from Nuclear Power Plants in Daya Bay, China. *Remote Sensing*, 14, 3, 763
- Zinkle, S.J., Was, G.S. (2013). Materials challenges in nuclear energy. *Acta Materialia*, 61, 3, 735-758