



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

Analyysi alasajettavien voimalaitosten hyödyntämisen vaihtoehtoista

Jouni Yli-Pyky

Prosessitekniikka

Kandidaatintyö

Toukokuu 2024

TIIVISTELMÄ

Analyysi alasajettavien voimalaitosten hyödyntämisen vaihtoehtoista

Jouni Yli-Pyky

Oulun yliopisto, Prosessitekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2024, 35 s.

Työn ohjaajat yliopistolla: Professori Mika Ruusunen ja TkT Petri Hietaharju

Lähitulevaisuudessa tullaan alasajamaan monia perinteisiä voimalaitoksia erinäisistä syistä. Näitä voivat olla halu ympäristöystävällisempään tuotantotapaan tai kannattamaton tuotantotoiminta. Vaihtoehtoja alasajettavan voimalaitoksen hyödyntämiselle on monia, mutta niitä ei monesti ole kerätty yhteen paikkaan. Tämän työn tavoitteena oli esittää ja kertoa mitä etuja niissä on. Tärkeää oli myös selvittää, miten tunnettuja hyödyntämistapoja voidaan soveltaa erityyppisten voimalaitosten lopettamiseen.

Tässä työssä selvitettiin polttovoimalaitoksien ja ydin- sekä vesivoimalaitoksien käyttöiän jälkeisiä hyödyntämistapoja. Polttovoimalaitosten kohdalla keskityttiin nimenomaan kivihiiivoimalaitoksiin. Tietoa eri vaihtoehtoista kerättiin kirjallisuudesta. Näitä vaihtoehtoja analysoitiin, minkä jälkeen tehtiin synteesi, josta muodostettiin johtopäätöksiä. Työssä myös tarkasteltiin tapaustutkimuksen avulla voimalaitosten purkamiseen liittyviä kustannuksia ja seurauksia esimerkkitapauksen näkökulmasta.

Tutkimuksen tuloksista tehdyn analyysin perusteella voimalaitoksen purkaminen sen käyttöiän päätyttyä on todella yleistä. Polttovoimalaitoksella on eniten erilaisia muita hyödyntämistapoja. Voimalaitoksia myös muunnetaan muille polttoaineille paljon. Ydinvoimalaitokset puretaan lähes aina joko välittömästi käyttöiän päätyttyä tai myöhemmin riippuen käytettävästä menetelmästä. Vesivoimalaitokset voidaan jättää säännöstelytoimintaan, mutta niitä myös puretaan paljon ympäristötekijöiden vuoksi. Lisäksi huomattiin, että tilanteesta riippuen vanhan polttovoimalaitoksen purkaminen voi olla kannattavaa romumetallin määrän ja hinnan ansiosta.

Asiasanat: Voimalaitoksen alasajo, Voimalaitoksen purkaminen, Polttovoimalaitos, Ydinvoimalaitos, Vesivoimalaitos, Ikääntynyt voimalaitos

ABSTRACT

Analysis on beneficial options with retired power plants

Jouni Yli-Pyky

University of Oulu, Degree Programme of Process Engineering

Bachelor's thesis 2024, 35 pp.

Supervisors at the university: Professor Mika Ruusunen and D.Sc (Tech.) Petri Hietaharju

In the near future, there are going to be many decommissions of power plants for various reasons. These reasons could be the need for a more environmentally friendly energy production or a profitable method of production. The options for the reuse of decommissioned power plants are plenty, but information from these is rarely collected. The purpose of this study was to present these options of different reuse scenarios and to analyse their benefits. It was also important to figure how different methods can be applied to the decommission of other types of plants as well.

In this study, the focus was on analysis of different reuse options mainly for combustion-, nuclear- and hydroelectric power plants that are to be decommissioned. In case of combustion power plants, the focus was mostly on coal-fired plants. Information regarding different use cases was gathered from literature. These options were then analysed. A synthesis was made, where conclusions were derived about the possibilities to reuse power plants.

Based on the analysis of results, it was noticed that decommissioning of a power plant by dismantling is common. Combustion power plant has most options. In case of nuclear power plants, they are almost always decommissioned by dismantling. This happens either immediately or with a delay depending on the used method. Hydroelectric plants can be left for regulating purposes, but many of those are decommissioned because of environmental reasons. It is also noted that depending on the situation, decommissioning by dismantling an old combustion power plant can be profitable depending on the amount and price of metal scrap.

Keywords: Retired power plant, Decommissioning power plant, Combustion power plant, Nuclear power plant, Hydroelectric power plant, Aged power plant

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	4
2 TUTKIMUSMENETELMÄT.....	5
3 VOIMALAITOSTEN KÄYTÖSTÄPOISTON VAIHTOEHDOT	7
3.1 Alasajetun voimalaitoksen hyödyntämisvaihtoehdot.....	7
3.2 Kivihiilivoimalaitoksen purkaminen.....	11
3.3 Vesi- ja ydinvoimalaitokset.....	13
4 TULOSTEN KÄSITTELY	17
4.1 Hyödyntämisvaihtoehdot	17
4.2 Purkamisen kustannukset	19
4.3 Museointi.....	21
4.4 Ydin- ja vesivoimalaitokset.....	21
4.5 Hyödyntämisvaihtoehtojen vertailu	22
4.6 Pohdinta.....	25
5 JOHTOPÄÄTÖKSET.....	28
6 YHTEENVETO	29
LÄHDELUETTELO	

1 JOHDANTO

Voimalaitosten alasajo ja laitoksille tehtävät toimenpiteet sen jälkeen ovat ajankohtainen aihe. Laitosten ikääntyessä tulevat esille erinäiset ongelmat niin laitteiston kuin myös polttoaineen kanssa. Uusi teknologia korvaa vanhaa ja uudet päästöttömät polttoaineet korvaavat vanhoja saastuttavia polttoaineita. Joskus voimalaitoksen purkamiselle on parempiakin vaihtoehtoja, kuin romuraudan myynti.

Tässä työssä tarkastellaan ja analysoidaan eri hyödyntämisvaihtoehtoja alasajettavalle voimalaitokselle. Voimalaitoksen alasajoon voi olla useita syitä, kuten ikääntynyt kalusto ja laitteet, laitoksen kannattamattomuus, lämmön ja sähkön kysynnän väheneminen, uudet teknologiat, kilpailijat, fossiiliset polttoaineet ja ympäristöystävällisyys. Näissä tapauksissa, kun laitos ajetaan alas ja tuotanto lopetetaan, on tärkeä miettiä mihin laitosta voidaan käyttää vai puretaanko se.

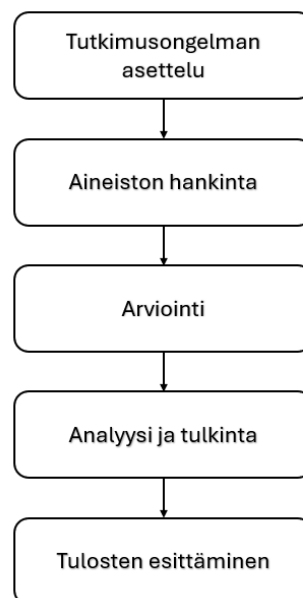
Työn tavoitteena on saada tietoa eri näkökulmista, mitä laitokselle voi tehdä alasajon jälkeen ja selvittää mitä niille yleensä tehdään. On myös tärkeää selvittää mitkä tavat ovat järkeviä ja mitkä eivät. Voimalaitoksia on monenlaisia ja se millainen laitos on kyseessä määrää sen, mitä sille voidaan tehdä. Joillekin laitoksille ei voida tehdä kuin yksi järkevä toimenpide, mikä on purkaminen, joten tällaiset tapaukset on rajattu pois. Tässä työssä esimerkiksi tuulivoimalaitokset on sivuutettu ja työn laajuuden rajaamiseksi myös muita tuotantotapoja käsitellään lyhyesti.

Työ toteutetaan kirjallisuuskatsauksena, jossa haettua tietoa analysoidaan ja vertaillaan. Analyysin perusteella tehdään synteesi, josta voidaan nähdä yhteyksiä eri voimalaitosten käytöstä poiston vaihtoehtojen välillä. Työssä tarkastellaan eri vaihtoehtoja käytöstä poistolle, niiden toteuttamista, niihin liittyviä syitä ja osittain myös kustannuksia. Työssä myös otetaan esimerkkitapauksia hyödyntämisvaihtoehtoihin liittyen ja analysoidaan niitä.

Tässä työssä alasajettu voimalaitos ei tarkoita esimerkiksi peruskorjauksen tai vuosihuollon takia keskeytettyä laitosta vaan pysyvästi alasajettavaa tuotantoprosessia. Pysyvä ei tässä tapauksessa kuitenkaan tarkoita, että voimalaitos olisi jo purettu eikä sitä voida käynnistää uudelleen.

2 TUTKIMUSMENETELMÄT

Työ toteutetaan kirjallisuuskatsauksena, joka tämän työn tapauksessa on integroiva kirjallisuuskatsaus, koska käsiteltävästä aiheesta halutaan laajasti tietoa, jonka avulla voidaan analysoida käsiteltävää aihetta ja tehdä siitä synteesi. Työssä ei haluta liikaa rajata tutkimusaineistoa, jotta tutkimusta voidaan tarkastella kriittisellä tasolla. Kuvassa 1 on esitetty integroivan kirjallisuuskatsauksen vaiheet, jotka ovat Salmisen (2011) mukaan tutkimusongelman asettelu, aineiston hankinta, arviointi, analyysi sekä tulkinta ja tulosten esittäminen. Työlle asetetaan ensin tutkimusongelma, johon halutaan löytää vastaus kirjallisuuskatsauksen perusteella. Tutkimusongelma rajataan työhön sopivaksi, jotta työn laajuus ei muodostu liian suureksi tai pieneksi. Toisena vaiheena on aineiston hankinta, jota ei ole tarkasti rajattu integroivassa kirjallisuuskatsauksessa toisin kuin systemaattisessa kirjallisuuskatsauksessa (Salminen 2011). Kolmas vaihe on arviointi, jossa arvioidaan aineiston laatua. Neljäntenä vaiheena on analyysi ja tulkinta, jossa kerättyä aineistoa analysoidaan tutkimusongelman perusteella. Tämän jälkeen analysoitua tietoa tulkitaan ja siitä pyritään saamaan tuloksia. Viimeisenä vaiheena tulokset esitetään järkevissä muodossa synteessin avulla.



Kuva 1. Integroivan kirjallisuuskatsauksen vaiheet (Salminen 2011).

Tämä työ toteutetaan integroivana kirjallisuuskatsauksena, jossa tutkimusongelmana on löytää vaihtoehtoja alasajetun voimalaitoksen hyödyntämiseen. Menetelmä soveltuu

hyvin aiheeseen, koska sitä halutaan käsitellä laajasti. Aineistoa haetaan kirjallisuudesta eri lähteistä (Kappale 3) ja lähteitä ei rajata pelkkiin tieteellisiin teksteihin, vaan niihin sisällytetään myös muun muassa eri voimalaitosten nettisivut. Löydettyä aineistoa arvioidaan (Kappale 4.6) työn yleisen arvioinnin mukana. Aineistoa analysoidaan ja tulkitaan (Kappale 4) pääasiassa vertaamalla eri lähteiden tietoja, sekä esitetään saadut tulokset synteesitaulukoiden muodossa (Kappale 4.5). Näistä taulukoista pyritään näkemään eri hyödyntämismahdollisuuksien soveltuvuutta.

3 VOIMALAITOSTEN KÄYTÖSTÄPOISTON VAIHTOEHDOT

Voimalaitokset tuottavat yhteiskunnalle sen tarvitsemaa sähköä ja lämpöä. Nämä laitokset voivat toimia vuosikymmeniä, mutta teknologian kehittyessä ja laitosten ikääntyessä ne voivat jäädä tarpeettomiksi tai olla liian vanhoja toimiakseen. Erityyppisiä voimalaitoksia on paljon ja niiden ominaispiirteet voivat poiketa toisistaan suuresti, mikä vaikuttaa myös niiden elinkaaren pituuteen. Laitoksen ikääntyessä tulee vastaan kysymys siitä, mitä laitokselle tehdään, kun sen elinkaari on tulossa päätökseen. (Mills et al. 2017)

Päätös voimalaitoksen alasajosta ja sulkemisesta riippuu monesta eri tekijästä, joista jo yksi voi riittää, mutta eri tekijät voivat myös kasaantua. Voimalaitoksen sulkemiselle on monia syitä, mutta yksi keskeisimmistä syistä on kannattamattomuus. Se koostuu monesta tekijästä, kuten sähkön ja lämmön hinnasta, jolloin tuotannon muuttamiseen kykenevät tuotantotavat toimivat paremmin, polttoaineen hinnasta ja sähköntuotannon määristä. Voimalaitosten ikääntymisen tuomat ongelmat vaikuttavat myös tuotantotehoon, mikä näkyy varsinkin verrattaessa uusiin laitoksiin, joissa käytetään uudempaa teknologiaa halvemmilla käyttökustannuksilla. Lisäkustannuksia vanhemmille laitoksille tulee myös ympäristösäännöksistä esimerkiksi kivihiiltä tai maakaasua käyttävissä voimalaitoksissa. (Mills et al. 2017)

3.1 Alasajetun voimalaitoksen hyödyntämisvaihtoehdot

Mietittäessä hyödyntämisvaihtoehtoja alasajettavalle tai jo alasajetulle voimalaitokselle voidaan ajatella, mitä tekijöitä voidaan hyödyntää ja mitkä asiat haittaavat jatkotoimissa. Tässä kappaleessa kerrotaan kirjallisuuden näkökulmasta ja muuten löydettyjä vaihtoehtoja alasajetulle voimalaitokselle. Osa kirjallisuudesta ja vaihtoehdoista koskee vain tietyn tyyppisiä voimalaitoksia, mutta niistäkin voidaan saada hyödyllistä tietoa analyysia varten.

Malley (2016) kertoo Yhdysvaltojen kivihiilivoimaloiden tilasta 2000-luvulta eteenpäin ja listaa seitsemän vaihtoehtoa alasajettavan kivihiilivoimalan hyödyntämiseksi. Ensimmäisenä on purkaminen, josta aiheutuu kuluja muun muassa haitallisen materiaalien kuten asbestin hävityksestä, työvoimasta, purkutekniikasta, romumetallin ja

uudelleen hyödynnettävien laitteiden myyntipaikoista sekä alueen siivoamisesta. Purkamisen kannattavuutta edistää sen sijaan laitoksen mahdollinen hyvä paikka, tontin arvo, mikäli voimalaitos omistaa sen sekä romun ja hyödynnettävien laitteiden myyntiarvo. Hyödynnettäviä laitteita ovat esimerkiksi kattilan tai turbiinin eri osat, joita voidaan myydä muille tehtaille varaosina. Malley (2016) arvioi, että 500 MW kivihiilivoimalan purku maksaa noin 5–15 miljoonaa dollaria romun myynnin jälkeen ja vie tyypillisesti 18–30 kuukautta.

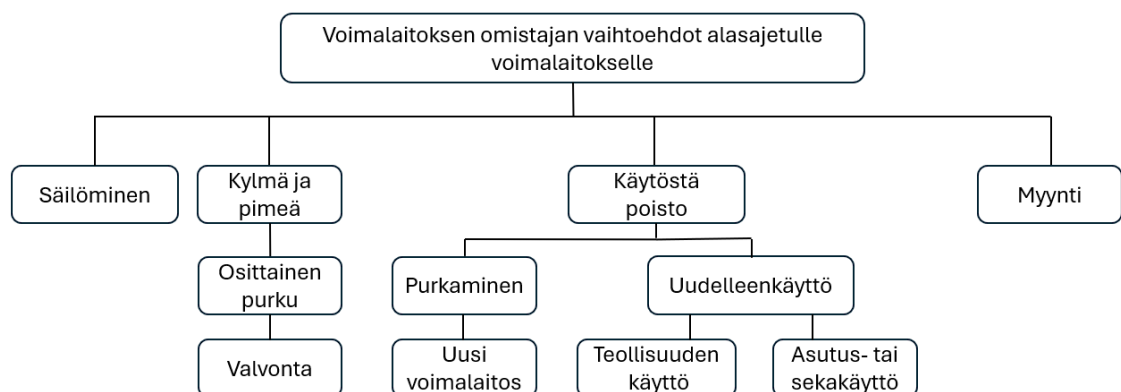
Toinen hyödyntämismuutosto on myydä voimalaitos sellaisenaan uudelle omistajalle, joka purkaa sen ja käyttää alueen uudelleen muihin tarkoituksiin. Kolmas tapa on voimalaitoksen muuntaminen käyttämään eri polttoainetta, esimerkiksi maakaasua kivihiilen sijaan (Malley 2016). Tämä muuntaminen voidaan toteuttaa kolmella tavalla. Joissain tapauksissa se voidaan tehdä muokkaamalla olemassa olevaa kattilaa, toisinaan kattilan muokkauksen lisäksi kiertoön lisätään uusi kaasuturbiini tai vaihtamalla voimalaitos kokonaan kombivoimalaitokseen (McMahon et al. 2011). Muuntamisprojektin hinta vaihtelee huomattavasti, mutta maksaa tyypillisesti noin 25–75 miljoonaa dollaria (Malley 2016).

Malley (2016) neljäs hyödyntämismuutosto on vaihtaa uudemman sukupolven kaasuturbiiniin. Tällä saavutetaan parempi hyötysuhde ja nopeammat käynnistymisajat. Viides tapa on myydä voimalaitos eteenpäin alueen uudelleenkäyttöä varten. Laitos voi sijaita esimerkiksi teollisuusalueella tai vesistön vierellä, jolloin paikalle voi olla suurtakin kysyntää. Kuudes tapa on omistajalähtöinen purku, jossa laitos puretaan omistajan toimesta, mutta tontti pidetään varalla mahdollista uutta tehdasta varten.

Seitsemäs hyödyntämismuutosto on olla tekemättä laitokselle mitään. Silloin laitos seisoo, kunnes omistaja tekee päätöksen sen kohtalosta. Seisotuksen pituuteen voi vaikuttaa muun muassa epätietoisuus taloudellisista asioista. (Malley 2016)

Raimi (2017, s. 7) tuo esille voimalaitoksen sijainnin suuren merkityksen jatko toimille. Jos laitos sijaitsee esimerkiksi kaupungin keskustassa, on maalle paljon enemmän kysyntää. Tällöin on todennäköisempää, että alasajettu laitos joko puretaan muun infrastruktuurin tieltä tai muutetaan muiksi tiloiksi. Laitoksen sijaitessa sen sijaan maaseudulla on paljon pienempi paine muuntaa laitosta tai kiirehtiä laitoksen purkamisessa.

Raimin (2017, s. 7–13) mukaan laitoksen omistajalla on neljä mahdollista hyödyntämisvaihtoehtoa laitoksen sulkemisen jälkeen (Kuva 2). Ensimmäinen vaihtoehto on säilöminen, jossa laitos säilytetään mahdollista uudelleenkäynnistämistä varten. Tällöin voimalaitokseen ei tehdä muutoksia ja sen valmius käynnistykselle säilytetään. Toinen vaihtoehto on pitää voimalaitos ”kylmänä ja pimeänä”, jolloin laitosta puretaan osittain jättäen tärkeimmät osat paikoilleen. Siinä myös huolehditaan ympäristöseikoista, jotka haittaavat laitoksen seisomista. Kolmannessa hyödyntämisvaihtoehdossa laitos poistetaan käytöstä ja joko puretaan kokonaan tai käytetään muihin tarkoituksiin. Neljäs vaihtoehto on myydä voimalaitos sellaisenaan uudelle omistajalle, jolloin vastuu siitä siirtyy myös uudelle omistajalle. Uusi omistaja voi haluta laitoksen esimerkiksi tontin uudelleenkäyttöä varten. Mikäli voimalaitos puretaan kokonaan, niin purkamisen kannattavuus riippuu kustannuksista ja saatavista hyödyistä. Purkamiseen liittyvät kustannukset ovat 21–466 miljoonaa dollaria per GW, 117 miljoonaa dollaria ollessa keskimääräinen kustannus. Purkamisen yhteydessä täytyy myös päättää, tehdäänkö paikalle uusi voimalaitos vai vaihdetaanko teknologiaa ja siirrytään uuteen tuotantomenetelmään. Kivihiilivoimaloiden kohdalla tämä tarkoittaa usein siirtymistä maakaasuun. Mikäli laitosta halutaan käyttää uudelleen muihin tarkoituksiin, täytyy päättää, käytetäänkö sitä asutuksiin vai teollisuuteen. (Raimi 2017, s. 7–13)



Kuva 2. Kivihiilivoimalaitoksen hyödyntämisvaihtoehdot omistajan näkökulmasta alasajon jälkeen (mukaillen Raimi 2017).

U.S. Energy Information Administrationin (EIA 2019) mukaan Yhdysvalloissa alasajettiin vuosina 2010–2019 546 kivihiilivoimalaitosta. Näistä 121

kivihiilivoimalaitosta muunnettiin polttamaan muuta kuin kivihiiltä. Näistä voimalaitoksista 103 muunnettiin käyttämään maakaasua ja 17 muutti laitoksen kombivoimalaitokseksi. Sataneljä kivihiilivoimalaa valitsi muuntamisen höyrykattilaan, joka pystyy polttamaan muitakin polttoaineita, kuten maakaasua tai puuperäisiä jätteaineita (EIA 2020).

Joissain tapauksissa alasajettava voimalaitos voidaan säilyttää reservilaitoksena sähkön tuotantoon, sähköverkon taajuudenhallintaan, tehoreserviin tai huoltovarmuuskäyttöön. Esimerkiksi Suomen sähkön kantaverkosta vastaava Fingrid Oyj ostaa reservimarkkinoilla toimivilta voimalaitoksilta säätö- ja häiriöreservikapasiteettia. Tällä se pyrkii muiden pohjoismaisten kantaverkkoyhtiöiden kanssa varmistamaan, että sähkön kulutuksen ja tuotannon välinen tasapaino pidetään oikealla tasolla ja että kantaverkon käyttövarmuus säilyy. (Fingrid 2024a)

Fingrid pitää myös tehoreservissä varavoimalaitoksia, joiden tarkoituksena on varmistaa manuaalisen taajuudenpalautusreservin ja sähkön riittävyys. Nämä laitokset ovat joko Fingridin omia tai käyttöoikeussopimuksella Fingridin käytössä. Ne eivät osallistu kaupalliseen sähköntuotantoon ja ovat valmiustilassa sopimuskauden (Fingrid 2024b). Laitokset ovat tällöin valmiustilassa, että ne saadaan ajettua ylös jopa kymmenessä minuutissa, mutta niitä käytetään vain harvoin. Laitoksia myös testataan säännöllisesti kuuden viikon välein, jolloin toimintavarmuus varmistetaan (Frantti 2019). Nämä voimalaitokset voivat olla elinkaaren lopussa olevia tai esimerkiksi kivihiiltä tai öljyä käyttäviä jo alasajettuja laitoksia. Esimerkiksi Meri-Porin kivihiilivoimalaitos toimi tehoreservissä vuosina 2017–2022 (Huoltovarmuuskeskus 2023).

Alasajettu voimalaitos voidaan säilyttää myös huoltovarmuuskäyttöön, jolloin sitä käytetään vain, jos sähköjärjestelmän turvallisuustilanne on muuttunut vakavan kriisi- ja häiriötilanteen takia. Huoltovarmuuskeskus ja Fortum ilmoittivat, että Meri-Porin kivihiilivoimalaitos muuttuu 2024 alkupuolelta lähtien huoltovarmuuskäyttöön kolmeksi vuodeksi pysyvän sulkemisen sijaan. (Huoltovarmuuskeskus 2023)

Joissain tapauksissa vanha voimalaitos voidaan museoida. Tällöin laitos jätetään pystyyn toiminnan päätyttyä ja siitä tehdään museotila. Siellä voidaan esitellä laitoksen toimintalaitteita, paikkakunnan historiaa ja laitoksen merkitystä. Museoinnista esimerkkinä on Jyllinkosken sähkömuseo, joka on Suomen ensimmäinen

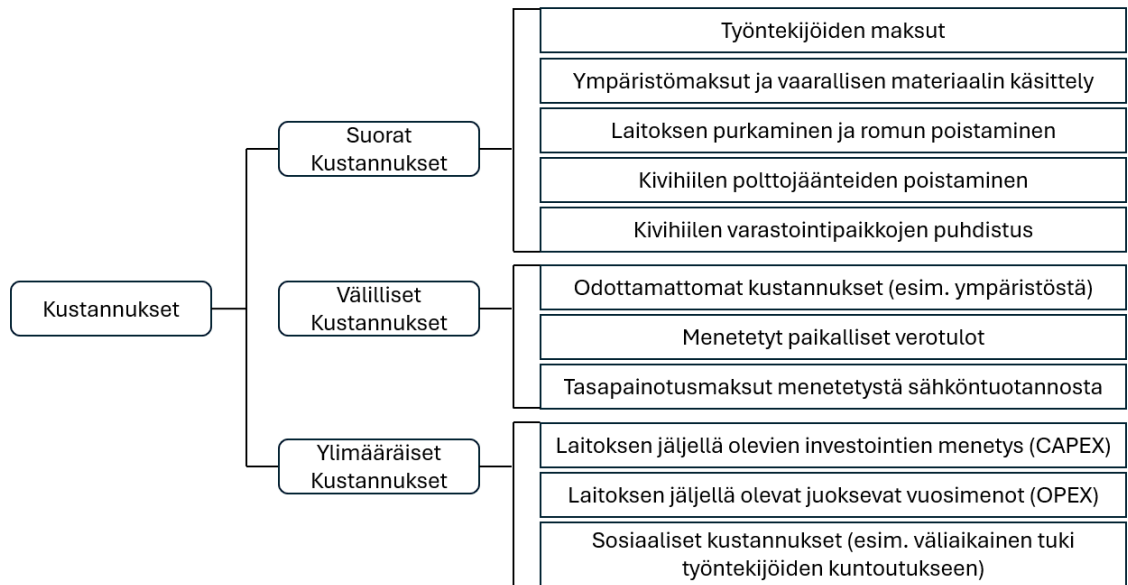
sähkölaitosmuseo ja tehtiin vanhaan Jyllinkosken vesivoimalaitokseen vuonna 1987. Laitos toimi paikkakunnan sähköntuottajana vuodesta 1913–1970. (Jyllinkosken Sähköpuisto 2024)

Voimalaitos voidaan myös uudistaa, jolloin laitoksen eri osiin tehdään tarpeen mukaisia tiloja. Uudistamisesta esimerkkinä on Rooman ensimmäinen julkinen sähkövoimalaitos The Centrale Montemartini, jonka toiminta lopetettiin 1960-luvulla ja uudistettiin 1980-luvun lopulla. Voimalaitoksen tiloihin tehtiin taide- ja multimediakeskukset, toimistoja, laboratorioita sekä varastoja. (Musei Capitolini Centrale Montemartini 2017)

3.2 Kivihiilivoimalaitoksen purkaminen

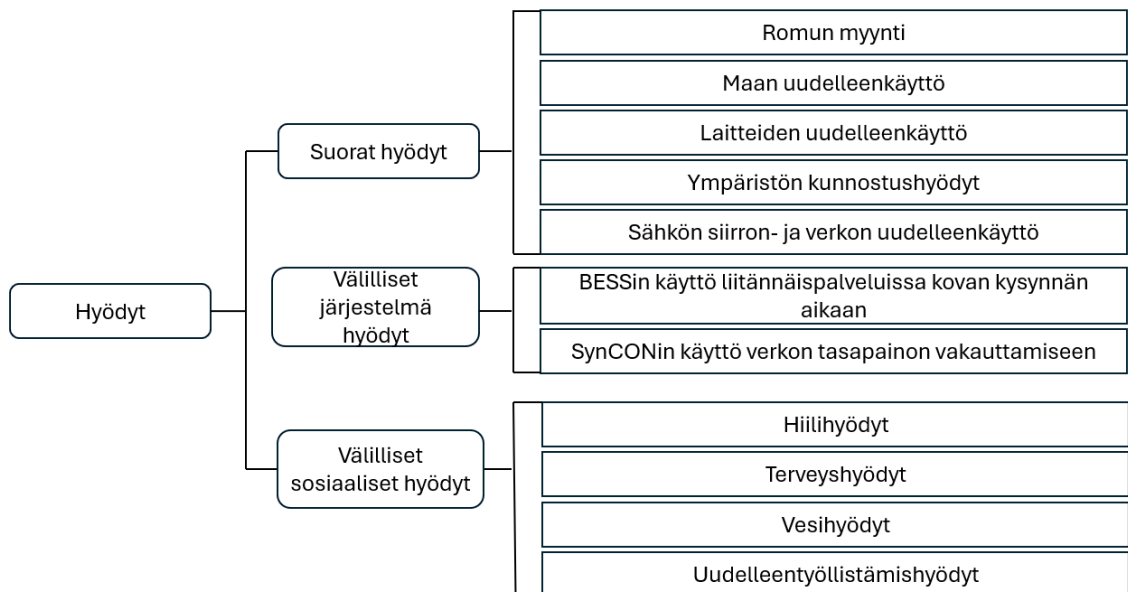
Esimerkkitapauksena esitetään Jindalin ja Shrimalin (2022) tutkimus intialaisesta 1000 MW kivihiilivoimalasta, jossa hyödyntämisvaihtoehtoina olivat purkaminen ja uudelleenkäyttö. Tutkimuksessa selvitettiin mitä näiden vaihtoehtojen toteutus maksaa ja kuinka paljon tuottoa saadaan uudistuksilla. Uudelleenkäytön vaihtoehtoina olivat aurinkoenergia, akkupohjainen energian varastointijärjestelmä (BESS) ja synkroninen lauhdutin (SynCON). (Jindal & Shrimali 2022)

Tutkimuksessa otettiin huomioon suorat, välilliset ja ylimääräiset kustannukset, jotka ovat esitetty kuvassa 3. Suoria kustannuksia ovat esimerkiksi henkilökunnasta ja purkamisesta koostuvat kustannukset. Välillisiä kustannukset sen sijaan ovat esimerkiksi odottamattomat ympäristömaksut, paikallisten verotulojen menetys ja voimalaitoksen aiemmin tuottaman sähkön menetyksestä aiheutuvat tasapainotusmaksut sekä ylimääräiset uudelleenkäyttöön liittyvät kustannukset. (Jindal & Shrimali 2022)



Kuva 3. Kivihiilivoimalaitoksen purkamisen kustannukset (mukaien Jindal & Shrimali 2022).

Tutkimuksessa huomioituja hyötyjä ovat suorat ja välilliset järjestelmä sekä sosiaaliset hyödyt, jotka ovat esitetty kuvassa 4. Suoria hyötyjä ovat esimerkiksi romun myyntitulot, maan uudelleenkäyttö ja laitteet. Välillisiä järjestelmä hyötyjä ovat BESSstä ja SynCONsta saatavat palvelut. Välillisiä sosiaalisia hyötyjä ovat hiili-, terveysty-, vesi- ja uudelleentyöllistämisedut. (Jindal & Shrimali 2022)



Kuva 4. Kivihiilivoimalaitoksen purkamiseen ja uudelleenkäyttöön liittyvät hyödyt (mukaien Jindal & Shrimali 2022).

Suurimmat kustannukset ovat erinäiset henkilökuntamaksut ja järjestelmän tasapainotukseen liittyvät kustannukset. Suoria kustannuksia 1000 MW laitoksesta tuli 58,11 miljoonaa dollaria ja välillisiä kustannuksia 59,31 miljoonaa dollaria. Hyödyistä suurimmat olivat romun myynti, BESS ja SynCON tuomat hyödyt sekä hiilidioksidin päästöjen välttäminen. Suorien hyötyjen määrä oli 122,79 miljoonaa dollaria, joista romun myynti oli 65,65 miljoonaa dollaria, joka yksinään riittää kattamaan kaikki suorat purkamiseen liittyvät kustannukset. Järjestelmään liittyviä välillisiä hyötyjä oli 83,92 miljoonaa dollaria ja sosiaalisia hyötyjä 522,02 miljoonaa dollaria, joista hiilidioksidipäästöjen välttö oli 515,09 miljoonaa dollaria. (Jindal & Shrimali 2022)

Tutkimuksen mukaan ainakin tässä tapauksessa uudelleenkäyttö oli parempi vaihtoehto kuin pelkkä purkaminen. Merkittävää on myös, että itse laitokseen liittyvät purkamisen maksut ovat helposti katettavissa romun myyntituloilla. Kustannusten määrä vaihtelee myös maiden välillä, mutta tässä tutkimuksessa kustannukset olivat 58 M\$/GW. (Jindal & Shrimali 2022)

3.3 Vesi- ja ydinvoimalaitokset

Tässä kappaleessa käsitellään suuria rakennelmia vedessä, kuten vesivoimaloita ja vaarallista materiaalia omaavia voimalaitoksia, kuten ydinvoimaloita. Kappaleessa esitetään myös, kuinka rajoittavat tekijät vaikuttavat hyödyntämisvaihtoehtoihin.

Vesivoimalaitokset käyttävät veden kineettistä energiaa tuottamaan sähköä. Joessa toimivat jokivoimalaitokset käyttävät joen virtaamaa pyörittämään generaattoria, eikä niillä ole vesivarastoa. Säännöstelyvoimalaitoksella sen sijaan on pato, jonka avulla voidaan säännöstellä turbiiniin läpi menevän veden määrää eri aikoina. Pumppuvoimalaitoksella taas on vesivarasto, jota voidaan täyttää sähkön avulla silloin, kun sähköä on saatavilla edullisesti. (Egré & Milewski 2002)

Hyödyntämisvaihtoehtoja alasajetulle vesivoimalaitokselle on useita ja ne ovat usein samat kuin polttovoimalaitoksissa. Voimalaitoksen sijainti vesistössä kuitenkin aiheuttaa omat haasteensa, sillä padon purkamiseen liittyy monia ongelmia. Marks (2007) mukaan varsinkin tekojärvien padot keräävät paljon pohjasakkaa, joka koostuu muun muassa hiekasta ja lietteestä. Tämä sakka voi olla myrkyllistä, minkä takia sitä testataan

saasteiden varalta. Jos suuret määrät huonolaatuista sakkaa sekoittuu veteen purettaessa patoa, saattaa sillä olla merkittävä vaikutus alajuoksun ekologiaan. Patoja purettaessa vapautuu myös paljon vettä, mikä tarkoittaa, että sen purkaminen täytyy tehdä koon mukaan vaiheittain ja hitaasti. Jos liikaa vettä pääsee liikkeelle, se saattaa aiheuttaa tulvan ja vaaratilanteita alueelle.

Oldhamin (2009) mukaan vesivoimalaitoksen purkaminen voi maksaa 0,4–300 miljoonaa dollaria. Perinteisen vesivoimalaitoksen purkamiseen liittyvien kustannusten suuruuteen eniten vaikuttavat tekijät ovat padon korkeus ja laitoksen teho. Kustannusluvut myös vaihtelevat todella paljon pienten ja suurten voimalaitosten välillä.

Aina patoa ei kuitenkaan tarvitse purkaa, sillä padon voi jättää säännöstelytoimintaan, jossa padon avulla säädetään esimerkiksi järven pinnankorkeutta tai virtaamaa. Voimalaitos ja pato eivät kuitenkaan automaattisesti tarkoita, että järveä säännöstellään, vaan sen virtaus voi olla myös luonnonmukaista. (Vesi.fi 2024)

Yksi vaihtoehto kokonaan purkamiselle on myös osittainen purkaminen. Fortumin (2022) vesivoiman ympäristöraportissa vuodelta 2022 kerrotaan, kuinka heidän tavoitteensa on purkaa 80 kannattamatonta patoa. He kertoivat myös, kuinka Rördåforsissa padosta laajennettiin patoaukkoa, jotta veden virtaus olisi vapaata.

World Nuclear Associationin (WNA) mukaan ydinvoimalan toiminta-aika on noussut aiemmasta 30 vuodesta 40–60 vuoteen uudemmissa laitoksissa. Ydinvoimalat ovat erikoisessa asemassa käytettävän polttoaineen takia, sillä se on radioaktiivista. Radioaktiivisuus rajautuu yleensä vain polttoaineeseen, mutta sitä leviää osittain myös ydinvoimalan rakenteisiin. (WNA 2022)

Ydinvoimalan elinkaaren tullessa päätökseen, sille tehdään yleensä jokin kolmesta toimenpiteestä. Se voidaan purkaa välittömästi, odottaa tietty aika ennen purkamista tai haudata laitos. (WNA 2022; Suh et al. 2018)

Ensimmäisessä tavassa laitos puretaan välittömästi (DECON), kun normaalitoiminta laitoksessa lopetetaan ja purkamisen aloittaminen on turvallista. Yleensä tämä aloitetaan muutaman kuukauden sisällä toiminnan lopettamisesta, mutta voi kestää vuosia (WNA 2022; Suh et al. 2018). Esimerkiksi Yhdysvaltojen Shippingportissa reaktori purettiin

nopeasti, sillä polttoaineet pystyttiin poistamaan jo kahdessa vuodessa ja alue vapautettiin viidessä vuodessa ilman rajoituksia. (WNA 2022)

Toinen tapa on odottaa toiminnan lopettamisen jälkeen tietty aika ennen purkamisen aloittamista turvallisessa tilassa (SAFESTOR). Tässä tapauksessa viranomaisvalvontaa jatketaan ja radioaktiivisuuden annetaan vähentyä ennen lopullisten purkutoimenpiteiden aloittamista. Odotusaika tässä tapauksessa on yleensä 40–60 vuotta, mikä voi tehdä säilömisestä kallista verrattuna välittömään purkamiseen. On myös mahdollista, että ydinvoimalaa koskevat säädökset muuttuvat odotusajan kuluessa, joka voi lisätä kuluja ennestään (WNA 2022; Suh et al. 2018). Esimerkiksi Yhdysvaltojen Dresden 1 reaktori suljettiin vuonna 1978 ja on parhaillaan SAFESTOR-tilassa. Lopullisen purkamisen odotetaan alkavan vuonna 2029 (United States Nuclear Regulatory Commission 2023).

Kolmas tapa on haudata (ENTOMB) ydinvoimala, jolloin laitokseen jätetään kaikki jäljellä oleva radioaktiivinen materiaali. Materiaali voidaan kerätä pienemmälle alueelle ja laitos suljetaan pitkäkestoisella materiaalilla, kuten betonilla. Laitos pysyy suljettuna ja valvottuna, kunnes jäljellä oleva radioaktiivisuus ei ole enää ongelma (WNA 2022; Suh et al. 2018). Yksi esimerkki tästä on Tšernobylin ydinvoimalan 4. reaktori, joka myöhemmin suljettiin betonilla ja lyijyllä vuoden 1986 ydinonnettomuuden jälkeen, jossa se vaurioitui pysyvästi. (Suh et al. 2018)

Suh et al. (2018) mukaan välitön purkaminen (DECON) valitaan todennäköisemmin, jos purkuprojektilla on riittävä rahoitus, paljon purkamisen kokemusta, maalla on korkea inhimillisen kehityksen indeksi ja suuri julkinen suvaitsevaisuus. Turvallinen säilöminen (SAFESTOR) on sen sijaan todennäköisempää, kun yksiköitä on useampi, ydinvoimalla on suuri julkinen hyväksyntä ja ydinvoimala on toiminut pitkään. Ydinvoimalan hautaaminen on harvinaista ja sitä ei suositella tehtävän tulevia sukupolvia ajatellen.

Purkamisesta saatu materiaali, kuten teräs, lyijy ja betoni voidaan yleensä kierrättää ja myydä. Materiaalien täytyy olla turvallisia uusiokäytölle, joten niistä lähtevä säteily ei saa olla liian korkea. Tämä taso riippuu maasta ja on usein liiankin tarkka verrattuna normaalimateriaaleihin. Kierrätysmateriaalille on useita eri vaihtoehtoja, joista helpoin tapaus on, jos materiaali ei ole radioaktiivisesti likaantunutta. Toiseksi materiaali voidaan sulattaa, jolloin turvallinen materiaali voidaan kierrättää asiakaskäyttöön. Materiaali, jossa on lyhyen puoliintumisajan omaavia aineita, voidaan sulatuksen ja käsittelyn

jälkeen käyttää tietyissä teollisuuden ratkaisuisissa, kuten suurissa teräsrakennelmissa. Materiaali, jota ei voida käyttää normaaleissa olosuhteissa, voidaan silti joissain tapauksissa kierrättää ydinvoimaloiden tarpeisiin. (WNA 2022)

Maailmassa on useita kierrätyskeskuksia ydinvoimaloille. Yksi niistä on Studsvikin ydinvoima-alue, jossa sulatuslaitos kierrättää ydinvoimaloista saatuja materiaaleja hallitusti ja valvotusti uudelleenkäyttöä varten. Taulukossa 1 esitetään kyseisen sulattamon käsittelemät materiaalit vuosien 1987–2015 välillä ja lasketaan metalliromusta saatu tuotto vuoden 2024 arvoilla (NEA 2017).

Taulukko 1. Studsvikin ydinvoima-alueen sulattamon käsittelemät metallit 1987–2015 välillä (mukaiillen NEA 2017) ja hinnat vuonna 2024 (Basemetal 2024).

Metalli	Määrä (t)	Hinta (€/t)	Yhteensä (€)
Hiiliteräs	32000	150	4800000
Ruostumatonteräs	5200	950	4940000
Alumiini	2033	1280	2602240
Lyijy	1153	1260	1452780
Messinki	307	4500	1381500
Kupari (ei johdot)	99	7000	693000
Yhteensä	40792	–	15869520

Purkaminen, säilöminen ja hautaaminen eivät kuitenkaan ole ainoita keinoja käsitellä alasajettu ydinvoimalaitos. Se voidaan myös museoida. Yksi tällaisista on Apsara-reaktori Bhabha Atomic Research Centerissä Intiassa. Tämä ydinreaktori oli Intian ensimmäinen ja sillä on ollut suuri merkitys säteilytutkimuksen kannalta. Sitä ollaan kuitenkin muuttamassa museoksi lähivuosina (The Economic Times 2023). Toinen merkittävä poikkeus on Experimental Breeder Reactor-I, joka oli ensimmäinen sähköä tuottava hyötyreaktori. Tästä Idahossa Yhdysvalloissa sijaitsevasta kokeellisesta ydinvoimalasta tehtiin myöhemmin museo, joka on auki kesäisin (Idaho National Laboratory 2024).

4 TULOSTEN KÄSITTELY

Tässä kappaleessa analysoidaan kirjallisuudesta löydettyjä (kappale 3) hyödyntämisvaihtoehtoja. Näitä vaihtoehtoja verrataan keskenään ja pyritään löytämään sopivimmat vaihtoehdot tarkasteltuihin voimalaitoksiin. Kappaleessa myös vertaillaan eri hyödyntämisvaihtoehtojen kustannuksia ja tarkastellaan voiko niistä tehdä johtopäätöksiä eri vaihtoehtojen soveltuvuudesta. Lisäksi kappaleessa pohditaan eri voimalaitosten hyödyntämisvaihtoehtojen sopivuutta toisille voimalaitostyypeille. Kerätyistä tiedoista tehdään synteesi, josta pyritään näkemään selkeämmin hyödyntämisvaihtoehtojen soveltuvuus.

4.1 Hyödyntämisvaihtoehdot

Kirjallisuuden perusteella suurimmassa osassa tapauksista alasajetuille voimalaitoksille löytyy hyödyntämisvaihtoehtoja. Nämä vaihtoehdot voimalaitoksen hyödyntämiselle määräytyvät laitoksen tyyppin, sijainnin, maan lakien ja tarpeen mukaan. Tässä analyysissä ei käydä läpi lakia, sillä siihen perehtyminen ei ole tämän työn kannalta tarpeellista. Sen sijaan voimalaitoksen tyyppi ja tarpeet ovat etusijalla.

Työssä käsiteltiin voimalaitostyyppejä rajatusti. Esimerkiksi geotermisen- ja aurinkoenergian käsittely olisivat tuoneet pituutta lisää. Tuulivoiman poissulkeminen vaihtoehtojen käsittelystä oli järkevää, koska sille ei näyttänyt olevan purkamisen lisäksi järkeviä vaihtoehtoja.

Kirjallisuudesta löytyy useita kirjoituksia eri alasajettujen voimalaitosten päätöksistä ja varsinkin kivihiilivoimalaitoksia koskevia artikkeleita löytyi hyvin. Tämä voi johtua muun muassa siitä, että niiden purkaminen tai muuntaminen on hyvin ajankohtaista ilmasto- ja ympäristöystävällisyys syistä. Esimerkiksi Suomessa Työ- ja elinkeinoministeriön tiedotteessa vahvistettiin, että kivihiilen käyttö sähkön ja lämmön tuotannossa kielletään vuonna 2029 (Työ- ja elinkeinoministeriö 2019). Tämä nähdään myös Blondeel et al. (2020) artikkelissa, jossa kuvataan Powering Past Coal Alliancen toimintaa ja sen tavoitetta poistaa kivihiilen käyttö sähköntuotannossa. Maakaasun käyttöä ollaan myös vähentämässä ja korvaamassa ympäristöystävällisemmällä vedyllä ja biokaasulla. (Energiateollisuus 2022)

Myös ydinvoimaloiden purkamista koskevaa kirjallisuutta löytyi riittävästi. WNA (2022) ja Suh et al. (2018) kertovat hyvin perusasioista ja Invernizzi et al. (2017) kirjoittavat ydinvoimalaitoksen purkamiseen liittyvistä sosiaalisista ongelmista. Ydinvoimalat ovat säännösteltyjä ja ydinvoimaa koskevia järjestöjä, jotka huolehtivat muun muassa niiden turvallisesta käytöstä, on monia. Tästä syystä myös dokumentointi ydinvoimaloiden toiminnasta ja purkamisesta on tarkkaa.

Vesivoiman hyödyntämisvaihtoehtoista löytyi vähän tietoa verrattuna kahteen edelliseen vaihtoehtoon. Vesivoima on vanha sähköntuotantomenetelmä, joten voi olla, että osa sitä koskevasta kirjallisuudesta on myös vanhaa ja siksi sitä ei löytynyt yhtä helposti. Voi myös olla, että haku ei osunut oikeisiin termeihin.

Raimi (2017) ja Malley (2016) kirjoittivat omistajalähtöisesti kivihiihivoimaloiden hyödyntämisvaihtoehtoista. Tämän työn keskeinen tavoite on esittää vaihtoehtoja käytöstä poistetulle voimalaitokselle yleisesti, joten vaikka laitoksen myyminen on vaihtoehto, omistajan vaihtuminen ei muuta itse tehtävää toimenpidettä. Malley'n (2016) hyödyntämisvaihtoehtoissa voimalaitoksen myynti ja sen jälkeinen purkaminen sekä myynti uudelleenkäyttöä varten eivät muuta vaihtoehtoa itseään, vaan toimenpiteiden tekijän. Myös Raimilla (2017) on vaihtoehtona voimalaitoksen myynti esimerkiksi uudelleenkäyttöä varten.

Malley'n (2016) hyödyntämisvaihtoehto, jossa muunnetaan voimalaitos polttamaan maakaasua kivihiihen sijaan, on erikoinen vaihtoehtojen selvittämisen kannalta. Tämä johtuu siitä, että McMahonin (2011) toimenpiteissä tähän vaihtoehtoon, nykyisen kattilan muokkaaminen toiselle polttoaineelle voi olla normaalia toimintaa voimalaitoksen elinkaaren aikana. Jos taas kattila vaihdetaan kokonaan, voidaan puhua työn kannalta olennaisesta hyödyntämisvaihtoehdosta.

Yhteistuotantolaitoksissa, jotka voivat jo käyttää useampaa polttoainetta, on normaalia vaihtaa polttoainetta sen mukaan, mikä sopii parhaiten kyseiselle voimalaitokselle. Esimerkiksi Kainuun Voima Oy:n (2024) höyryvoimalaitos käytti aluksi suurimmaksi osaksi turvetta polttoaineena, mutta siirtyi myöhemmin käyttämään pääasiassa puuta. Polttovoimalaitokset ovatkin erilaisessa asemassa verrattuna esimerkiksi vesivoimalaitoksiin, joissa ei voida vaihtaa polttoainetta. Ydinvoimaloissa uraanille kehitetään vaihtoehtoisena polttoaineena ainakin toriumia (Vlasov 2023; WNA 2020),

mutta kyseessä on vielä kehitteillä oleva polttoaine ja vaikka tuloksia sen käytöstä on testireaktoreissa, sitä ei käytetä yleisesti ydinvoimaloiden polttoaineena (WNA 2020).

Malley'n (2016) ehdottama vaihto uudemman sukupolven kaasuturbiiniin ei ole relevantti tämän työn kannalta, sillä se vain parantaa kannattavuutta eikä muuta laitosta merkittävästi. Omistajalähtöisessä purkamisessa puretaan laitos, mutta säästetään tontti. Tämä tapa ei eroa merkittävästi siitä, että puretaan voimalaitos, koska tontti on osa kokonaisuutta, kun katsotaan purkamisesta saatavia hyötyjä. Ainoa ero on, että omistaja säästää tontin mahdollista uutta laitosta varten. Malley'n (2016) hyödyntämismallissa seisotus, jossa laitos jätetään seisomaan sellaisenaan, on samat ongelmat. Kun ei tiedetä mitä tulee tapahtumaan, niin odotetaan tulevaisuuden muutoksia tai teknologiaa. Tässä tapauksessa kuitenkin voivat tulla yhteiskunnalliset ongelmat esille, kun laitos on vielä pystyssä.

Raimin (2017) esittämä hyödyntämismallissa, jossa säilytetään laitos uudelleenkäynnistystä varten, on sama kuin Malley'n (2016) seisotus, koska molemmissa tapauksissa laitos seisoo ilman tietoa niiden tulevaisuudesta. Raimin toimenpide ”kylmä ja pimeä”, jossa laitos puretaan osittain ja ympäristöongelmia vähennetään, on myös osittain sama kuin Malley'n toimenpide, mutta ylimääräisillä varauksilla. Raimi myös antaa hyödyntämiseen vaihtoehdoksi uudelleenkäytön esimerkiksi asutukseen tai teollisuuteen. Tämä on voimalaitoksesta ja sen sijainnista riippuvaista. Jos voimalaitos sijaitsee lähellä palveluita, on asutuksen tekeminen mahdollista. Jos se on syrjäisessä paikassa, on todennäköisempää, että siitä tehdään teollisuuslaitos, museo tai koulutuskeskus, kuten uusiutuvan energian koulutuskeskus Kreikassa (Bourbourakis & Tsikalakis 2022). Teollisuuslaitoksen tekemistä puoltaa myös valmis infrastruktuuri sähkön tuotannossa, sillä osa teollisuudesta tuottaa oman sähkönsä ja lämpönsä esimerkiksi prosessilämmöllä. Tällöin voidaan hyödyntää esimerkiksi laitokseen jätettyjä turbiinia ja generaattoria.

4.2 Purkamisen kustannukset

Jindal & Shrimalin (2022) tapaustutkimuksen avulla oli työn kannalta tarkoituksena tuoda esiin, mitä kustannuksia ja hyötyjä saadaan voimalaitoksen purkamisesta. Kyseisessä tapauksessa purkaminen oli jopa kannattavaa. Näin ei välttämättä ole joka tapauksessa,

vaan eri muuttujat vaikuttavat niin hyötyihin kuin kustannuksiinkin. Esimerkiksi se, että voimalaitos sijaitsi Intiassa, oli merkittävä tekijä, sillä purkamiseen liittyvät kustannukset voivat toisessa maassa olla huomattavasti suuremmat. Raimin (2017) arvio kivihiilivoimalaitoksen purkamiselle hinnaksi 21–466 miljoonaa dollaria vuonna 2016 per 1000 MW. Malley'n (2016) mukaan purkaminen yleensä maksaa enemmän kuin tuottaa hyötyjä ja arvioikin, että 500 MW kivihiilivoimalaitoksen purkaminen maksaa 5–15 miljoonaa dollaria romun myynnin jälkeen. Vaikka tämä kerrottaisiin kahdella 1000 MW voimalaksi, arvio jää silti kauas Raimin arviosta.

WNA:n (2022) mukaan odotettavat kustannukset ydinvoimalan purkamisesta Yhdysvalloissa ovat 544–821 miljoonaa dollaria, mutta kustannusten määrä on hyvin tapauskohtaista. Esimerkiksi Japanin Tokai 1 (160 MWe) ydinvoimalaitoksen purkaminen maksoi 1,04 miljardia dollaria ja Suomen Loviisan (2 x 502 MWe) purkamisen kustannusarvio on 326 miljoonaa euroa, joten voimalaitoskohtaiset hintaerot ovat huomattavat. Ydinvoimalan purkaminen on siis huomattavasti kalliimpaa kuin kivihiilivoimalaitoksen tapauksessa.

Taulukossa 1 esitettiin Studsvikin ydinvoima-alueen sulattamon käsittelemät metallimateriaalimäärät vuosina 1987–2015. Yhteensä metalleista saatiin arvoksi noin 15,8 miljoonaa euroa nykyisillä metallin arvoilla. Kuitenkaan kaikkea materiaalia ei lähetetä sulattamolle, vaan esimerkiksi NPP Stadesta Saksassa vuonna 2014 mennessä oli purettu 13 000 tonnia romumetallia, mutta vain 30 % siitä lähetettiin sulattamolle. Säteily ei ole merkittävää kaikessa materiaalissa, joten vain osaa joudutaan käsittelemään muun muassa sulattamisen avulla (NEA 2017). Ydinvoimaloiden osien sulattaminen on kuitenkin tärkeää, koska käsittelyn avulla voidaan uusiokäyttää suuri määrä materiaaleja, jotka muuten menisivät hukkaan säteilyn takia. Ne eivät kuitenkaan riitä kattamaan purkamisesta koituvia kuluja, kuten kivihiilivoimalaitoksen tapauksessa.

Huomattava osa Jindal & Shrimalin (2022) tapauksen hyödyistä näytti tulevan hiilidioksidipäästöistä johtuvien maksujen välttämisestä. Tämä ei kuitenkaan aina ole merkittävä hyöty, jos laitos on lähtökohtaisesti vähäpäästöinen, kuten esimerkiksi vesivoimalaitos. Joskus voisi olla myös järkevää myydä ikääntyvän laitoksen uudehkoja tai hyvä kuntoisia laitteita muille romumetallin sijaan. Tällä voitaisiin esimerkiksi pidentää jonkun toisen ikääntyvän voimalaitoksen elinkaarta.

4.3 Museointi

Voimalaitoksiin alasajon jälkeen tehtyjä voimalaitosmuseoita löytyi yllättävän monia. Voimalaitoksen historia, käyttö, sijainti ja tarve vaikuttavat siihen, soveltuuko laitos museoitavaksi. Varsinkin historialla näyttäisi olevan suuri merkitys, sillä tällaiset museot näyttävät olevan usein maan ensimmäisiä voimalaitoksia tai ensimmäisiä tyypissään, kuten Centrale Montemartini (Musei Capitolini Centrale Montemartini 2017), joka oli Rooman ensimmäinen sähkölaitos tai EBR-1 (Idaho National Laboratory 2024), joka oli ensimmäinen sähköä tuottava hyötyreaktori. Laitoksen tyyppi vaikuttaa tähän suuresti ainakin ydinvoimaloiden kohdalla, sillä niihin rakennetut museot ovat todella harvinaisia. Apsara on pieni ydinreaktori, jota on käytetty tutkimuskeskuksen yhteydessä (The Economic Times 2023). Toinen poikkeus on aiemmin mainittu EBR-1, joka on pieni kokeellinen ydinreaktori, joka ei ole ollut käytössä sitten vuoden 1963.

4.4 Ydin- ja vesivoimalaitokset

Ydinvoimalan tapauksessa on yksi selvä suosituin vaihtoehto alasajetun voimalaitoksen käsittelylle. Tässä työssä läpikäydyn kirjallisuuden mukaan ydinvoimalat puretaan lähes aina. Ydinvoimalat vaativat paljon turvatoimia ja niihin kohdistuvat säädökset rajoittavat niille kohdistuvia vaihtoehtoja alasajon jälkeen. Suh et al. (2018) kertovat hyvin, mitkä seikat vaikuttavat siihen, valitaanko purkamiselle DECON vai SAFESTOR-toimenpiteet. Säilömiseen kuuluvat toimenpiteet ja kulut ovat huomattavat, mutta joissain tapauksissa välitön purkaminen on kalliimpaa turvallisuuden takaamiseksi (WNA 2022). Purkamisen aloittamisesta alueen jälleenkäyttöön kestää tyypillisesti 20–30 vuotta Euroopan komission (2024) mukaan, toisin kuin perinteisen polttovoimalaitoksen purkamisessa, joka voidaan tehdä todella nopeasti.

WNA:n (2022) mukaan maailmassa on purettu vuoteen 2022 mennessä noin 25 ydinvoimareaktoria. International Atomic Energy Agency:n Power Reactor Information Systemin (IAEA PRIS 2024) mukaan lopullisesti sammutettuja reaktoreita on 209 kappaletta, joista suurin määrä, 41 kappaletta, on Yhdysvalloissa. Purettuja ydinreaktoreita on kirjallisuuden perusteella vähän verrattuna suljettujen määrään. Osa tästä selittyy SAFESTOR lähestymisellä, jossa reaktorit on suljettu, mutta purkamista ei ole viety loppuun.

Vesivoimalaitoksilla on tutkimuksen perusteella omat haasteensa verrattuna molempiin muihin mainittuihin laitoksiin, sillä niiden rakennelmat ovat usein massiivisia ja sijaitsevat vesistöissä. Tämän takia vesivoimalaitoksen purkaminen on usein työlästä ja kallista, niin teknisten haasteiden vuoksi kuin myös mahdollisten ympäristöongelmien takia. Kaikkia patoja ei tarvitse aina purkaa ja usein niillä voidaan säädellä myöhemmin esimerkiksi tekojärvien tai jokien pinnankorkeuksia (Vesi.fi 2024). Vesivoimalaitokseen liittyvän padon purkaminen voi kestää myös vuosia, riippuen sen koosta ja sijainnista. Purkaminen näyttää kuitenkin olevan yleistä, sillä ympäristölle ja varsinkin kalalajeille on yleensä parempi, jos joki on patoamaton.

Vuorovesivoimalaitokset ovat poikkeustapauksia, koska ne rakennetaan yleisesti salmiin. Ensimmäinen sellainen rakennettiin vuonna 1966 Ranskaan. Tämä La Rancen voimalaitos on massiivinen rakennelma ja se voi toimia jopa 100 vuotta (Evans 2019). Jos salmea, johon voimalaitos on rakennettu, ei käytetä mihinkään tarkoitukseen, voidaan rakennelma mahdollisesti jättää paikoilleen tai purkaa osittain. On esimerkiksi mahdollista avata rakennelman keskiosa, jotta se ei enää patoa virtausta (Fortum 2022). Tietoa puretuista vuorovesivoimaloista ei tässä tutkimuksessa löytenyt.

4.5 Hyödyntämisvaihtoehtojen vertailu

Taulukossa 2 on esitetty eri vaihtoehdot ja niiden soveltuvuus eri voimalaitostyypeille. Taulukko on pelkistetty ja osa vaihtoehdoista on moniselitteisiä. Muuntaminen tarkoittaa tässä yhteydessä muuntamista teknologiaan, joka mahdollistaa muun polttoaineen käytön, mikä ei toimi vesivoiman ja ydinvoiman kohdalla ainakaan normaalitilanteessa. Ydinvoimala voisi periaatteessa osallistua sähköreserviin, mutta se on hyvin epätodennäköistä, sillä jatkuva ylös- ja alasajo sekä laitoksen valmiustilan ylläpito olisi luultavasti hyvin kannattamatonta. Vesivoimala taas pystyy siihen esimerkiksi pumppuvoimalaitoksilla. Teknologian vaihdolla tarkoitetaan keskeisten laitteiden, kuten kattilan tai generaattorin muuttamista toiseen teknologiaan. Ydinvoimalan kohdalla generaattorin vaihtaminen saattaa olla mahdollista, mutta reaktorin vaihtaminen olisi todennäköisesti säteilyn takia liian vaikeaa. Vesivoimalan kohdalla sen sijaan pystytään tähän, koska esimerkiksi säännöstelyvoimalaitoksesta voidaan tehdä pumppuvoimalaitos vaihtamalla turbiini sellaiseen, joka pystyy myös pumppaamaan vettä takaisin yläaltaaseen (Kieni & Linkevics 2021).

Taulukko 2. Alasajettavien voimalaitosten hyödyntämismvaihtoehtojen soveltuvuus eri voimalaitostyypeille.

Vaihtoehto	Polttovoimalaitos	Vesivoimalaitos	Ydinvoimalaitos
Museo/muu tila	Kyllä	Kyllä	Kyllä
Muuntaminen	Kyllä	Ei	Ei
Myynti	Kyllä	Kyllä	Kyllä
Osittain purku	Kyllä	Kyllä	Kyllä
Purkaminen	Kyllä	Kyllä	Kyllä
Säilöminen	Kyllä	Kyllä	Kyllä
Sähköreservi	Kyllä	Kyllä	Ei
Teknologian vaihto	Kyllä	Kyllä	Ei

Taulukossa 3 on esitetty eri hyödyntämismvaihtoehtojen kustannuksia. Näitä arvoja ei ole muutettu vuoden 2024 mukaiseksi, koska työssä tarkastellaan suuruusluokkia, eikä näin ollen ole tarpeen laskea tarkkoja lukuja kyseisissä tapauksissa. Arviot kustannuksista on otettu tai laskettu eri lähteiden perusteella. Arviot myös vaihtelevat paljon eri voimalaitosten välillä ja riippuvat monesta tekijästä, kuten voimalaitoksen koosta, iästä ja ominaisuuksista. Museoinnille, sähköreserville ja teknologian vaihdolle ei löytynyt tietoa kustannuksista tässä kirjallisuushaussa. Arvoja ei ole myöskään esitetty, mikäli voimalaitokselle ei ole kyseistä hyödyntämismvaihtoehtoa.

Taulukko 3. Voimalaitosten hyödyntämismvaihtoehtojen kustannukset dollareissa (Jindal & Shrimali 2022; McMahan 2011; Oldham 2009; Raimi 2017; Stoddard 2013; Uriá-Martinez et al. 2021, s. 86; WNA 2016; WNA 2022).

Vaihtoehto	Polttolaitos[M\$]	Vesivoimalaitos[M\$]	Ydinvoimalaitos[M\$]
Museo/muu tila	Ei tietoa	Ei tietoa	Ei tietoa
Muuntaminen	50–75/GW	Ei sovellu	Ei sovellu
Myynti	8–456/GW	42–3400/GW	16–2253/GW
Purkaminen	–486–466	0,4–300	544–821
Säilöminen	2/GW vuodessa	Ei tietoa	3/GW vuodessa
Sähköreservi	Ei tietoa	Ei tietoa	Ei sovellu
Teknologian vaihto	Ei tietoa	Ei tietoa	Ei sovellu

Polttovoimaloiden myyntihinta on otettu Raimin (2017) kivihiilivoimalaitosten arvoista vuodelta 2015. Lähteessä on vain hyvin rajattu määrä esimerkkejä ja ääripäitä on varmasti molempiin suuntiin. Ydinvoimalan myyntihinta on otettu WNA:n (2016) Yhdysvalloissa vuosien 1999–2009 välillä myytyjen ydinvoimaloiden hintojen keskiarvona. Myyntihinnat nousivat ajan myötä ja hintaan ei ole laskettu polttoainetta, mikä on myös hyvin kallista. Vesivoimalan myyntihinta Yhdysvalloissa vuosina 2005–2020 oli 42–3400 miljoonaa dollaria per GW ja keskimääräinen hinta oli 1161 miljoonaa dollaria per GW (Uría-Martinez et al. 2021, s. 86).

Polttovoimalaitoksen purkamisen kustannuksista on esitetty useita arvioita tässä työssä ja näistä arvoista taulukkoon 3 on otettu minimi- ja maksimiarvot. Minimiarvo on Jindal & Shrimalin (2022) tapaustutkimuksesta, jossa kustannusten sijaan saatiin voittoa, mikä on merkitty taulukkoon 3 miinusmerkillä, ja maksimiarvo tulee Raimin (2017) esittämästä kustannusarviosta.

Stoddardin (2013) raportissa on esitetty ydinvoimalan SAFESTOR kustannukset, josta säilömiselle saadaan hinnaksi 1,7 miljoonaa dollaria vuodessa. Kewauneen ydinvoimala on 566 MW voimalaitos, joten suoraan suhteutettuna yhden GW voimalaitokselle, saadaan säilömisestä hinnaksi 3 miljoonaa dollaria vuodessa. Polttovoimalaitoksen tapauksessa keskisuuren kivihiilivoimalan säilömisestä hinta on miljoona dollaria vuodessa (Raimi 2017). Oletetaan, että keskisuuri kivihiilivoimalaitos on noin 500 MW, jolloin yhden GW voimalaitoksen säilömisestä hinnaksi saadaan suoraan suhteutettuna kaksi miljoonaa dollaria vuodessa. Kivihiilivoimalaitoksen muuntaminen maakaasuun maksaa noin 50–75 miljoonaa dollaria per GW (McMahon 2011). Vesivoimalaitosten osalta käyttö- ja huoltokustannuksista löytyi paljon tietoa, mutta säilömisestä ei.

Myyntihinnoissa on selkeä ero polttovoimalaitosten ja kahden muun laitostyyppin välillä. Tämä näkyy varsinkin korkeimmissa myyntihinnoissa ja selittyy muun muassa laitosten koolla. Valtavat vesivoimalat ja ydinvoimalat ovat miljardiprojekteja (Invernizzi et al. 2017), joten verrattaessa halvempiin kivihiilivoimaloihin ero nähdään selvästi. On kuitenkin tärkeä huomata, että nämä myyntihinnat ovat laitoksille, joita ei ole vielä alasajettu, mikä tekisi hinnoista huomattavasti pienemmät. On kuitenkin tapauksia, missä esimerkiksi ydinvoimalan myynti sisälsi laitoksen mukana purettavaksi tarkoitetun reaktorin (WNA 2016).

Purkamisessa on vaikeaa verrata suoraan arvioita kustannuksista, sillä voimalaitosten koko ja muut tekijät vaikuttavat kustannuksiin liian paljon. Polttovoimalaitosten luvut ovat tapauksista, joissa osa hyödyistä on laskettu myös mukaan, jolloin kustannusten oikeat suuruudet voivat olla isompia kuin taulukossa 3 esitetyt. Vesivoimalaitosten padot voivat olla todella pieniä, jolloin niiden purkaminen on halpaa muihin vaihtoehtoihin verrattuna (Oldham 2009). Toisaalta todella suurten vesivoimalaitosten purkaminen voi tulla hyvin kalliiksi ympäristötekijöiden, kuten pohjasakan, ja varotoimien takia (Marks 2007). Ydinvoimalaitosten tapauksessa purkaminen maksaa paljon muun muassa säteilyn takia (Invernizzi et al. 2017).

Voimalaitoksen säilöminen voi olla järkevää, jos ei tiedetä mitä sille kannattaa tehdä. Säilömistä kustannuksiin vaikuttavat mahdolliset ympäristöhaitat. Voimalaitoksen ollessa altis ympäristövahingoille tai ilkeille, lisääntyvät myös sen säilömistä kustannukset (Raimi 2017). Myös sillä on vaikutus, kuinka paljon ympäristöongelmilta on suojauduttu, esimerkiksi ydinvoimalan tapauksessa SAFESTOR kustannuksiin vaikuttaa säilötäänkö polttoaine voimalaitoksella vai onko se siirretty pois loppusijoituskohteeseen (Stoddard 2013).

4.6 Pohdinta

Polttovoimalaitoksissa tapahtuu lähivuosina suuria muutoksia, sillä kivihiltä käyttävät voimalaitokset tulevat poistumaan energiantuotannosta tämän vuosikymmenen aikana lähes kokonaan. Tämä tapahtuu ainakin länsimaissa ja muissa asiasta sopineissa maissa. Kivihiltä käyttävien voimalaitosten vaihtoehdot ovat tärkeitä, mutta myös muut suuripäästöiset voimalaitokset on syytä huomioida. Esimerkiksi turpeen käyttöä ollaan lopettamassa tai ainakin vähentämässä huomattavasti. Tämän takia myös sen aiheuttamalle sähkön ja lämmön tuotannon korvaustarpeelle on syytä etsiä parempaa vaihtoehtoa.

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää hyödyntämismallivaihtoehtoja alasajettaville voimalaitoksille ja tämä tavoite toteutui. Kuitenkin se, mikä on paras tapa päättää voimalaitos, jäi useassa tapauksessa epäselväksi. Paras hyödyntämismallivaihtoehto riippuu monesta tekijästä, kuten siitä onko voimalaitokselle järkevää käyttöä alasajon jälkeen, missä se sijaitsee tai mitä se voi käyttää polttoaineena.

Esimerkkinä järkevästä käytöstä mainittakoon, että Suomessa voimalaitos voi toimia reservisähkön tuottajana, varavoimalaitoksena Fingridille tai olla huoltovarmuuskäytössä Huoltovarmuuskeskukselle. Voimalaitoksen sijainti voi olla myös merkittävä tekijä, esimerkiksi sen läheisyys kaupungin ytimeen tekee purkamisesta tai uudelleenkäytöstä todennäköisempää kuin laitoksen jättäminen pystyyn rapistumaan. Voimalaitoksen käyttämällä polttoaineella voi myös olla suuri merkitys hyödyntämisvaihtoehtojen kannalta. Esimerkiksi ydinvoimaloissa, polttoaineen aiheuttama säteily rajaa hyödyntämisvaihtoehtoja alasajon jälkeen. Tällöin ei voida esimerkiksi rakentaa asutusta tai teollisuuslaitosta reaktorin tai polttoainevaraston läheisyyteen. Toisaalta esimerkiksi kivihiiuvoimalaitoksia lopetetaan polttoaineesta johtuvan kannattomuuden takia.

Kustannusten perusteella alasajetun polttovoimalaitosten osalta muuntaminen voi olla kannattavaa, jos laitoksella on vielä muuten elinkaarta jäljellä, eikä laitosta haluta purkaa tai myydä pois. Tällaisessa tapauksessa myös muita hyödyntämisvaihtoehtoja kannattaa harkita. Tässä tutkimuksessa kustannuksia ei käyty läpi tarpeeksi yksityiskohtaisesti, jotta niiden avulla voitaisiin antaa yhtä oikeaa hyödyntämisvaihtoehtoa.

Ydinvoimalaitoksen kohdalla paras vaihtoehto on joko välitön purkaminen DECON tai säilöminen ja sitä seuraava purkaminen SAFESTOR. Yhtä parasta vaihtoehtoa näiden välillä ei ole, vaan se riippuu monesta tekijästä, joiden perusteella tehdään päätös kyseiselle voimalaitokselle. Kuten työn kirjallisuusosassa listattiin, DECON valitaan todennäköisemmin, jos purkuprojektilla on riittävä rahoitus, paljon purkamisen kokemusta, maalla on korkea inhimillisen kehityksen indeksi ja suuri julkinen suvaitsevaisuus. SAFESTOR sen sijaan on todennäköisempää, kun yksiköitä on useampia, ydinvoimalla on suuri julkinen hyväksyntä ja ydinvoimala on toiminut pitkään.

Aihe on todella laaja ja sitä voisi laajentaa todella suureksi kokonaisuudeksi. Tämän työn kannalta oleellisia aiheita käsiteltiin työn pituuteen nähden riittävästi, mutta ajan myötä tiedon määrä olisi kasvanut todella suureksi. Polttovoimalaitosten osalta tulokset olivat monipuoliset ja luotettavat ainakin kivihiiuvoimalaitosten osalta, vaikka kirjallisuus liittyi pääosin Yhdysvaltoihin. Ydinvoimaloiden osalta kirjallisuutta oli todella runsaasti ja samat vaihtoehdot esitettiin useassa lähteessä. Tämän takia myös tulokset ovat luotettavia. Vesivoimalaitokset jäivät pienelle huomiolle tässä tutkimuksessa. Tämä johtui osittain siitä, että niiden päättämistä koskevaa kirjallisuutta oli vaikeampi löytää toisiin käsiteltyihin voimalaitostyyppeihin verrattuna. Kattavuuden lisäämiseksi olisi

ollut hyvä etsiä tietoa erityyppisistä vesivoimalaitoksista ja käydä läpi tarkemmin esimerkkitapauksia.

Työssä käsiteltiin kustannuksia rajatusti osittain tiedon hankinnan vaikeuden takia ja osittain, koska se ei ollut työn keskeisin osa. Kustannuksilla kuitenkin pyrittiin selvittämään yhtenäisyyksiä eri voimalaitostyyppien välillä ja vertaamaan niistä saatua tietoa. Kustannusten perusteella ei saatu selkeitä tuloksia työn aiheen kannalta ja niiden tiedonhankinta jäi puutteelliseksi.

Tilastoja sähkön tuotannosta menetelmien mukaan löytyy paljon, mutta tilastoja siitä mitä alasajetuille voimalaitoksille on tehty, ei löydy hyvin. Työn kannalta olisi ollut hyvä, jos esimerkiksi tilastokeskuksella olisi ollut dataa kyseisestä aiheesta. Tämän takia työssä täytyi tehdä päätelmiä ilman vakaata tilastopohjaa ja osaksi satunnaisten yhden valtion tilastojen perusteella. Voi myös olla, että tilastoja on, mutta ne eivät osuneet tämän työn kirjallisuushakuun. Tulevaisuuden kannalta voisi olla hyödyllistä pitää tällaisia tilastoja, jos tästä aiheesta tehdään jatkotutkimusta esimerkiksi maakaasun osalta.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työssä selvitettiin eri hyödyntämismvaihtoehtoja alasajettaville voimalaitoksille. Paras vaihtoehto ei tässä työssä selvinnyt kaikille voimalaitostyypeille, vaan se riippuu monesta tekijästä. Polttovoimalaitoksen tapauksessa vaihtoehtoja hyödyntämiseen oli runsaasti, mutta osa niistä on selkeästi enemmän käytettyjä kuin toiset. Esimerkiksi Yhdysvalloissa alasajettiin 546 kivihiilivoimalaitosta vuosina 2010–2019, joista 121 muunnettiin käyttämään maakaasua. Kuitenkin polttovoimalaitosten purkaminen on yleisin hyödyntämismvaihtoehto.

Voimalaitokset, joihin tehdään museoita tai muita tiloja, ovat usein merkittäviä paikan tai tuotantotavan takia. Museointi ei ole kovin yleistä tämän työn perusteella, mutta ei myöskään erityisen harvinaista. Tästä voi päätellä, että tulevaisuudessa, kun ensimmäinen kaupallinen fuusioreaktori lopettaa toimintansa, siitä voidaan mahdollisesti tehdä museo.

Vesivoimalalle selvää parasta vaihtoehtoa ei löytynyt, vaan se riippuu sijainnista ja tyypistä. Kun kyseessä on säännöstelyvoimalaitos, niin täytyy arvioida ympäristötekijät, tarvitseeko säännöstellä vai onko parempi vapauttaa vesistö. Jokivoimalassa täytyy arvioida kuinka paljon voimalaitos haittaa joen virtausnopeutta ja onko rakennettu esimerkiksi kalatietä. Mikäli padon paikalleen jättämisestä aiheutuu suuria ympäristövaikutuksia, on purkaminen paras vaihtoehto. Ydinvoimaloiden paras vaihtoehto on joko välitön purkaminen tai säilöminen ja sitä seuraava purkaminen.

Uudistuvat energiamuodot, kuten aurinko- ja tuulivoima ovat kasvussa ja tulevat korvaamaan poistuvien voimalaitosten sähköntuotantoa. Maakaasun korvaaminen vedyllä ja biokaasulla on tulevaisuudessa merkittävää varsinkin Yhdysvalloissa, koska siellä käytetään paljon maakaasua sähköntuotannossa. Maakaasuvoimalaitoksen vaihtoehtoja koskevaa kirjallisuutta löytyy jo runsaasti ja se voisi olla hyvä jatkotutkimuksen kohde.

6 YHTEENVETO

Voimalaitoksia lopetetaan ja rakennetaan jatkuvasti ja vanhoja korvataan uusilla. Olipa syy voimalaitoksen alasajolle sitten kannattamattomuus tai ympäristötekijät, niin uusia voimalaitoksia tarvitaan korvaamaan vanhat. Tulevaisuudessa halutaan lisää uusituvia energianlähteitä ja siksi aurinko- ja tuulivoima ovat selvässä kasvussa. Vanhojen voimalaitosten alasajo ja hyödyntämisvaihtoehdot ovat siis keskeinen tutkimuksen aihe.

Kirjallisuus aiheesta kertoo hyvin eri hyödyntämisvaihtoehdoista suurimmassa osassa tapauksia. Ydinvoimalaitosten tiukat säännökset ohjaavat vahvasti niille tehtäviä toimenpiteitä, ja ne on suunniteltu jo vuosikymmeniä sitten toimiviksi. Perinteisiä vesivoimalaitoksia on purettu jo pitkän aikaa, mutta uudempia, esimerkiksi vuorovesivoimaloiden hyödyntämisvaihtoehtoja, ei ole vielä todettu toimiviksi. Polttovoimalaitoksia on purettu, muunnettu muille polttoaineille, myyty, uudelleenkäytetty tiloiksi, käytetty reservivoimalaitoksena tai jätetty rapistumaan.

Suurin osa vanhoista voimalaitoksista puretaan, sillä se voi olla kannattavaa varsinkin kivihiiivoimaloiden kohdalla. Ydinvoimalat puretaan lähes aina muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta, mutta niiden purkaminen kestää yleensä noin 20–30 vuotta eikä tontille voida rakentaa uutta nopeasti. Vesivoimalaitoksia puretaan paljon vesistöjen vapauttamiseksi.

Hyödyntämisvaihtoehdoissa esiintyy paljon samoja piirteitä, varsinkin purkamisessa. Kuitenkin toimenpiteissä, kustannuksissa ja hyödyissä on laitoskohtaisia eroja. Eri maissa on myös eri tavat toimia. Lisäksi laitoksen sijainti voi olla kaukana kaikesta muusta, mikä voi rajoittaa voimalaitoksen uudelleenkäyttöä.

LÄHDELUETTELO

Basemetal, 2024. Hintoja [verkkodokumentti]. Tallinna: BASE Metal OÜ. Saatavissa: <https://basemetal.ee/fi/hintoja#prices-group-20> [viitattu 19.3.2024].

Blondeel, M., Van de Graaf, T. & Haesebrouck, T., 2020. Moving beyond coal: Exploring and explaining the Powering Past Coal Alliance. *Energy Research & Social Science*, 59, s. 101304. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.101304>

Bourbourakis, P. J. & Tsikalakis, G. J., 2022. Transforming a power plant into an educational centre: Agia small hydroelectric power plant. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1123, s. 012057. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1123/1/012057>

Egré, D., & Milewski, J. C., 2002. The diversity of hydropower projects. *Energy Policy*, 30 (14), s. 1225–1230. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(02\)00083-6](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(02)00083-6)

EIA, 2019. More U.S. coal-fired power plants are decommissioning as retirements continue [verkkodokumentti]. Washington DC: U.S. Energy Information Administration. Saatavissa: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=40212> [viitattu 18.3.2024].

EIA, 2020. More than 100 coal-fired plants have been replaced or converted to natural gas since 2011 [verkkodokumentti]. Washington DC: U.S. Energy Information Administration. Saatavissa: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=44636> [viitattu 18.3.2024].

Energiateollisuus, 2022. Energia-alan vähähiilisyystiekartta [verkkodokumentti]. Helsinki: Energiateollisuus. Saatavissa: https://energia.fi/wp-content/uploads/2020/06/Energia-alan_vahahiilisyystiekartta_paivitetty_1_2022.pdf [viitattu 20.3.2024].

Euroopan komissio, 2024. Decommissioning of nuclear facilities [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://energy.ec.europa.eu/topics/nuclear-energy/decommissioning-nuclear-facilities_en [viitattu 18.3.2024].

Evans, S., 2019. La Rance: learning from the world's oldest tidal project [verkkodokumentti]. New York: Verdict Media Limited. Saatavissa: <https://www.power-technology.com/features/la-rance-learning-from-the-worlds-oldest-tidal-project/?cf-view&cf-closed> [viitattu 27.2.2024].

Fingrid, 2024a. Säätosähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat (mFRR) [verkkodokumentti]. Helsinki: Fingrid Oyj. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/saatosahko--ja-saatokapasiteettimarkkinat/> [viitattu 11.3.2024].

Fingrid, 2024b. Varavoimalaitokset [verkkodokumentti]. Helsinki: Fingrid Oyj. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/varavoimalaitokset/> [viitattu 11.3.2024].

Fortum, 2022. Vanhojen patojen purkaminen [verkkodokumentti]. Espoo: Fortum Oyj. Saatavissa: <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/energiantuotanto/vesivoima/vesivoiman-ymparistoraportti-2022/vanhojen-patojen-purkaminen> [viitattu 13.3.2024].

Frantti, A., 2019. Varavoima – Harvoin käytetty, mutta silti välttämätön [verkkodokumentti]. Helsinki: Fingrid Oyj. Saatavissa: <https://www.fingridlehti.fi/varavoima-2/> [viitattu 23.3.2024].

Huoltovarmuuskeskus, 2023. Meri-Porin voimalaitoksen sähköntuotanto varataan huoltovarmuuskäyttöön lähes kolmeksi vuodeksi [verkkodokumentti]. Helsinki: Huoltovarmuuskeskus. Saatavissa: <https://www.huoltovarmuuskeskus.fi/a/meri-porin-voimalaitoksen-sahkontuotanto-varataan-huoltovarmuuskayttoon-lahes-kolmeksi-vuodeksi> [viitattu 27.2.2024].

IAEA PRIS, 2024. Permanent Shutdown [verkkodokumentti]. Wien: IAEA. Saatavissa: <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/ShutdownReactorsByCountry.aspx> [viitattu 18.3.2024].

Idaho National Laboratory, 2024. Experimental Breeder Reactor-I [verkkodokumentti]. Idaho: Idaho National Laboratory. Saatavissa: <https://inl.gov/ebr/> [viitattu 10.3.2024].

Invernizzi, D. C., Locatelli, G. & Brookes, N. J., 2017. Managing social challenges in the nuclear decommissioning industry: A responsible approach towards better performance. *International Journal of Project Management*, 35 (7), s. 1350–1364. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2016.12.002>

Jindal, A. & Shrimali, G., 2022. Cost–benefit analysis of coal plant repurposing in developing countries: A case study of India. *Energy Policy*, 164, s. 112911. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112911>

Jyllinkosken Sähköpuisto, 2024. Sähköpuisto [verkkodokumentti]. Kurikka: Informaatiotekniikan Museoyhdistys Ry. Saatavissa: <https://www.jysa.fi/esittely/sahkokuisto/> [viitattu 27.2.2024].

Kainuun Voima Oy, 2024. Energian tuotanto [verkkodokumentti]. Kajaani: Kainuun Voima. Saatavissa: <https://www.kainuunvoima.fi/energiantuotanto/> [viitattu 17.3.2024].

Kieni, S. & Linkevics, O., 2021. Simplified Model for Evaluation of Hydropower Plant Conversion into Pumped Storage Hydropower Plant. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 58 (3), s. 108–120. <https://doi.org/10.2478/lpts-2021-0020>

Malley, E., 2016. Coal Power Plant Post-Retirement Options [verkkodokumentti]. Houston: Access Intelligence. Saatavissa: <https://www.powermag.com/coal-power-plant-post-retirement-options/> [viitattu 9.3.2024].

Marks, J. C., 2007. Down Go The Dams. *Scientific American*, 296 (3), s. 66–71. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0307-66>

McMahon, Monacelli, J. E., Roth, D. A., Binkiewicz Jr., P. E., Kleisley, R. J. & Wong, D. K., 2011. Natural Gas Conversions of Existing Coal-Fired Boilers [verkkodokumentti]. Houston: Access Intelligence. Saatavissa: <https://www.powermag.com/natural-gas-conversions-of-existing-coal-fired-boilers/> [viitattu 11.3.2024].

Mills, A. D., Wisner, R. H., & Seel, J., 2017. Power Plant Retirements: Trends and Possible Drivers [verkkodokumentti]. Yhdysvallat: Lawrence Berkeley National Laboratory. Saatavissa: <https://doi.org/10.2172/1411667> [viitattu 6.3.2024].

Musei Capitolini Centrale Montemartini, 2017. The Power Plant [verkkodokumentti].
Rooma: Centrale Montemartini. Saatavissa: <https://www.centralemontemartini.org/en/infopage/power-plant> [viitattu 27.2.2024].

NEA, 2017. Recycling and Reuse of Materials Arising from the Decommissioning of Nuclear Facilities [verkkodokumentti]. Paris: OECD Publishing. Saatavissa: <https://doi.org/10.1787/9789264281271-en> [viitattu 27.3.2024].

Oldham, K., 2009. Decommissioning dams - costs and trends [verkkodokumentti].
Lontoo: Progressive Media International. Saatavissa: <https://www.waterpowermagazine.com/features/featuredecommissioning-dams-costs-and-trends/> [viitattu 29.3.2024].

Raimi, D., 2017. Decommissioning US Power Plants: Decisions, Costs, and Key Issues [verkkodokumentti]. Washington DC: Resources for the Future. Saatavissa: <https://www.rff.org/publications/reports/decommissioning-us-power-plants-decisions-costs-and-key-issues/> [viitattu 27.3.2024].

Salminen, A., 2011. Mikä kirjallisuuskatsaus? Johdatus kirjallisuuskatsauksen tyypeihin ja hallintotieteellisiin sovelluksiin [verkkodokumentti]. Vaasa: Vaasan Yliopisto. Saatavissa: https://www.uwasa.fi/materiaali/pdf/isbn_978-952-476-349-3.pdf [viitattu 8.5.2024].

Stoddard, D. G., 2013. Kewaunee Power Station Post-Shutdown Decommissioning Activities Report [verkkodokumentti]. Kewaunee: Dominion Energy Kewaunee, Inc. Saatavissa: <https://www.nrc.gov/docs/ML1306/ML13063A248.pdf> [viitattu 15.3.2024].

Suh, Y. A., Hornibrook, C. & Yim, M.-S., 2018. Decisions on nuclear decommissioning strategies: Historical review. *Progress in Nuclear Energy*, 106, s. 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2018.02.001>

The Economic Times, 2023. Historic Apsara reactor transformed into public museum: Unveiling India's nuclear odyssey [verkkodokumentti]. Mumbai: Bennet, Coleman & Co. Ltd. Saatavissa: <https://economictimes.indiatimes.com/news/new-updates/historic-apsara-reactor-transformed-into-public-museum-unveiling-indias-nuclear-odyssey/articleshow/102493238.cms?from=mdr> [viitattu 28.4.2024].

Työ- ja elinkeinoministeriö, 2019. Kivihiilen energiakäytön vuonna 2029 kieltävä laki voimaan huhtikuun alussa [verkkodokumentti]. Helsinki: Valtioneuvosto. Saatavissa: <https://valtioneuvosto.fi/-/1410877/kivihiilen-energiakayton-vuonna-2029-kieltava-laki-voimaan-huhtikuun-alussa> [viitattu 15.3.2024].

United States Nuclear Regulatory Commission, 2023. Dresden – Unit 1 [verkkodokumentti]. Washington DC: United States Nuclear Regulatory Commission. Saatavissa: <https://www.nrc.gov/info-finder/decommissioning/power-reactor/dresden-nuclear-power-station-unit-1.html> [viitattu 7.3.2024].

Uría-Martinez, R., Johnson, M. M. & Shan, R., 2021. U.S. Hydropower Market Report [verkkodokumentti]. Tennessee: U.S. Department of Energy. Saatavissa: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2021/01/f82/us-hydropower-market-report-full-2021.pdf> [viitattu 7.3.2024].

Vesi.fi, 2024. Vesistöjen säännöstely [verkkodokumentti]. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. Saatavissa: <https://www.vesi.fi/teemasivu/vesistojen-saannostely/> [viitattu 13.3.2024].

Vlasov, A., 2023. Thorium's Long-Term Potential in Nuclear Energy: New IAEA Analysis [verkkodokumentti]. Wien: IAEA. Saatavissa: <https://www.iaea.org/newscenter/news/thorium-long-term-potential-in-nuclear-energy-new-iaea-analysis> [viitattu 17.3.2024].

WNA, 2016. Power Plant Purchases, Mergers and Management Rationalisation [verkkodokumentti]. Lontoo: World Nuclear Association. Saatavissa: <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/appendices/nuclear-power-in-the-usa-appendix-2-power-plant-pu.aspx> [viitattu 29.3.2024].

WNA, 2020. Thorium [verkkodokumentti]. Lontoo: World Nuclear Association. Saatavissa: <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/thorium.aspx> [viitattu 17.3.2024].

WNA, 2022. Decommissioning Nuclear Facilities [verkkodokumentti]. Lontoo: World Nuclear Association. Saatavissa: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/decommissioning-nuclear-facilities.aspx> [viitattu 22.2.2024].