

Alexi Hämäläinen

YDINVOIMAN TULEVAISUUS EUROO- PASSA

Kaksi tulevaisuusskenaariota

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Seppo Valkealahti
Toukokuu 2021

TIIVISTELMÄ

Aleksi Hämäläinen: Ydinvoiman tulevaisuus Euroopassa : Kaksi tulevaisuusskenaariota
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan kandidaattiohjelma
Toukokuu 2021

Ydinvoiman osuus sähköntuotannossa eri Euroopan maissa vaihtelee huomattavasti, kuten myös suhtautuminen ydinvoiman rooliin tulevaisuuden sähköenergiajärjestelmissä. Selkein jakolinja on muodostunut Saksan ja Ranskan välille, joista ensimmäisessä on päätetty luopua kaikesta ydinvoimatuotannosta vuoteen 2022 mennessä, ja toisessa ydinvoiman on suunniteltu tuottavan merkittävän osuuden maan sähköstä myös tulevaisuudessa. Erimielisyydet ydinvoimasta ovat heijastuneet myös Euroopan Unionin politiikkaan, jossa käydään väittelyä siitä, voidaanko ydinvoima luokitella kestäväksi investoinniksi unionin kestäväen rahoituksen taksonomiassa. Tutkielmassa tarkastellaan Saksan osalta sitä, miten ydinvoimasta luopuminen vaikuttaa maan sähköenergiajärjestelmään, ja Ranskan osalta maan suunnitelmia korvata ikääntyvä ydinvoimakapasiteettinsa uudella ydinvoimalla.

Saksan luopuminen ydinvoimasta on edennyt suhteellisen nopeasti, vaikka käytössä olevaa ydinvoimakapasiteettia onkin vuoden 2021 alussa jäljellä huomattava määrä. Tuloksista nähdään, että poistuvaa ydinvoimatuotantoa on korvattu pääasiallisesti uusiutuvilla energianlähteillä, ja fossiilisiin polttoaineisiin perustuva sähköntuotanto on vähentynyt hieman 2000-luvulla. Koska ydinvoiman myötä Saksan sähköenergiajärjestelmästä poistuu vakaa perusvoiman tuotanto, on fossiilisten polttoaineiden käytön vähentäminen tulevaisuudessa haastavaa. Ilmastonmuutoksen aiheuttaman kiireellisyyden vuoksi Saksalla on kuitenkin suuret odotukset fossiilisten polttoaineiden käytön vähentämiselle, mitä ydinvoimasta luopuminen väistämättä hankaloittaa. Ratkaisuja uusiutuvan sähköenergian tuotannon vaihtelevuuden aiheuttamiin haasteisiin etsitään esimerkiksi sähköenergian varastoinnista, kulutusjoustosta ja sähköverkkojen kehittämisestä.

Ranskassa ydinvoima tuottaa noin 70 % maan omasta sähköstä, minkä lisäksi sähköenergia on maalle tärkeä vientituote. Suurin osa maan ydinvoimaloista alkaa lähestyä suunnitellun käyttöikänsä loppua, ja ydinvoiman osuuden on suunniteltu vähenevän 50 %:iin maan sähköntuotannosta vuoteen 2035 mennessä, kun taas aurinko- ja tuulivoiman määrän on suunniteltu kasvavan. Voimaloiden käyttöikien pidennysten lisäksi vanhoja ydinvoimaloita on suunniteltu korvattavan osittain ranskalaissuunnitteisella EPR-laitostyyppillä, jonka pilottihanke Flamanville 3 on kohdannut merkittäviä budjetin ylityksiä ja aikataulun viivästymisiä. Pilottilaitoksen ja vastaavien ulkomaisten laitosten ongelmien takia panokset on ranskalaisessa suunnittelu- ja kehitystyössä kohdistettu uudentyypiselle EPR2-laitokselle sekä täysin uuteen reaktorisuunnitteluun perustuvalla neljännen sukupolven ydinlaitokselle. Jos ydinvoimarakentamisen budjetti- ja aikatauluongelmat saadaan ratkaistua, on uuden ydinvoiman ja uusiutuvan energian yhdistelmä tehokas ratkaisu hiilidioksidipäästöjen vähentämisen näkökulmasta.

Saksan ja Ranskan ydinvoimastrategioiden tarkastelu osoittaa, ettei kumpikaan valinta ydinvoiman suhteen ole täysin ongelmaton. Saksan sähköenergiajärjestelmän tulevaisuus on kiinni siitä, osoittautuuko lähes täysin aurinko- ja tuulivoimaan pohjautuva sähköenergiajärjestelmä teknisesti ja taloudellisesti kannattavaksi, vai onko maa pakotettu käyttämään fossiilista energiaa säilyttääkseen sähköverkkonsa tasapainon. Ranskan sähköenergiajärjestelmän tulevaisuutta puolestaan määrittää ennen kaikkea se, onnistutaanko eurooppalaisessa ydinvoimarakentamisessa ratkaisemaan sitä koko 2000-luvulla haitanneet budjetti- ja aikatauluongelmat. Saksa ja Ranska ovat kaksi Euroopan Unionin suurinta talousaluetta, ja sen myötä tärkeitä energiapoliittisia suunnannäyttäjiä Euroopan pienemmille valtioille, joiden päätöksenteossa otetaan melko varmasti huomioon näiden maiden näyttämä esimerkki.

Avainsanat: ydinvoima, Eurooppa, Saksa, Ranska, sähköenergiajärjestelmä

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. YDINREAKTORIT NYT JA TULEVAISUUDESSA.....	3
2.1 Reaktoriteknologia nykyään	3
2.2 Reaktoriteknologia tulevaisuudessa	4
3. YDINVOIMAPOLITIIKKA EUROOPASSA.....	6
3.1 Ydinvoimastrategiat ja poliittinen tilanne.....	6
3.2 Argumentteja ydinvoimaa vastaan	8
3.3 Argumentteja ydinvoiman puolesta	9
4. YDINVOIMA SAKSASSA.....	10
4.1 Energiapolitiikan taustaa	10
4.2 Saksan sähköenergiantuotanto nykyään.....	11
4.3 Saksan sähköenergiantuotanto tulevaisuudessa.....	16
5. YDINVOIMA RANSKASSA	19
5.1 Energiapolitiikan taustaa	19
5.2 Ranskan sähkönenergiantuotanto nykyään.....	21
5.3 Ranskan sähköenergiantuotanto tulevaisuudessa	25
6. YHTEENVETO.....	28
LÄHTEET	30

LYHENTEET JA MERKINNÄT

SMR	Small modular reactor, pieni modulaarinen reaktori
PWR	Pressurized water reactor, painevesireaktori
BWR	Boiling water reactor, kiehutusvesireaktori
EPR	European Pressurized Water Reactor, eurooppalainen paine- Vesireaktori
VVER-1200	Vodo-vodjanoi energetičeski reactor 1200, venäläinen painevesire- aktori
EU	Euroopan Unioni
EDF	Électricité de France
MOX	Mixed oxide fuel, sekaoksidipolttoaine
ASN	Autorité de sûreté nucléaire, ydinalan valvova viranomainen Rans- kassa

1. JOHDANTO

Ydinvoima, jolla tuotettiin vuonna 2019 26 % Euroopan unionin sähköstä, jakaa tällä hetkellä vahvasti mielipiteitä Euroopassa. Se on erittäin merkittävä energianlähde esimerkiksi Ranskassa, Slovakiassa, Tšekissä ja Suomessa, joissa jokaisessa ydinvoimalla tuotetaan yli kolmasosa sähköenergiasta. [1] Ydinvoimalla on vahva poliittinen lataus, ja Euroopan maiden välillä on isoja eroja suhtautumisessa siihen. Ydinvoiman vastustajat vetoavat ennen kaikkea ydinonnettomuuden riskiin ja tuhansia vuosia radioaktiivisena pysyvään ydinjätteeseen, kun taas ydinvoiman puolestapuhujat näkevät sen ratkaisuna ilmastokriisiin. Keskustelun keskiössä on myös uusien voimalaprojektien taloudellisuus ja aikataulukysymykset: onko ydinvoima halvan uusiutuvan energiantuotannon maailmassa enää taloudellisesti kannattava investointi, ja ovatko esimerkiksi Olkiluodossa ja Ranskan Flamanvillessä tapahtuneet jatkuvat aikataulun viivästymiset 2000-luvun ydinvoimalarakentamisen alkukankeutta vai pysyvä ilmiö?

Euroopassa aletaan olla tilanteessa, jossa näihin kysymyksiin on pakko löytää vastauksia. Euroopassa käytössä olevista reaktoreista yli 80 % on yli 30 vuotta vanhoja, ja 2050-luvulle mennessä suurin osa näistä voimaloista on suljettava [2]. Vaihtoehtoina on uuden ydinvoiman rakentaminen tai ydinvoimalla tuotetun sähköenergian tuottaminen muilla tuotantotavoilla. Toisaalta Itä-Euroopan maissa, joissa sähköntuotanto on perinteisesti perustunut kivihiiileen, etsitään Pariisin ilmastopimuksen mukaisten päästötavoitteiden myötä uusia tapoja hiilineutraalille sähköntuotannolle. Uudet voimalaprojektit ovat luonteeltaan hyvin pitkäaikaisia, joten uusien voimaloiden suunnitelmat on aloitettava jo lähitulevaisuudessa, mikäli päästötavoitteisiin halutaan päästä. On myös mielenkiintoista, mikä lupauksia herättävien pienten modulaaristen reaktoreiden (*SMR, Small Modular Reactor*) ja neljännen sukupolven ydinvoimaloiden rooli tulee olemaan Euroopan energiajärjestelmässä.

Yhtä, Euroopan yhteistä ratkaisua, ei kuitenkaan ole odotettavissa, vaan on todennäköistä, että ydinvoimaan suhtautumisessa on jatkossakin suuria eroja valtioiden välillä. Kontrastia voi hakea esimerkiksi Saksasta, jossa kaikki ydinvoima on tarkoitus sulkea ennenaikaisesti vuoteen 2022 mennessä, ja Ranskasta, jossa noin 70 % sähköstä tuotetaan ydinvoimalla [3] [4]. Nämä maat edustavat ydinvoimapolitiikan ääripäitä Euroopassa, minkä vuoksi niitä on kiinnostavaa verrata keskenään.

Tutkielman tavoitteena on tarkastella ydinvoiman tulevaisuutta Saksassa ja Ranskassa, sekä selvittää miten kunkin maan valinnat ydinvoiman suhteen vaikuttavat niiden sähkö-energiajärjestelmään. Kysymyksiä pohditaan työssä kirjallisuuskatsauksen keinoin. Luvussa 2 esitetään nykyisen reaktorisukupolven tekniset pääpiirteet, sekä taustoitetaan reaktoritekniiikan kehitystä lähitulevaisuudessa. Luvussa 3 puolestaan käsitellään ydinvoiman poliittista tilannetta Euroopassa, sekä tarkastellaan ydinvoimakeskustelussa esiintyviä argumentteja.

Saksan osalta luvussa 4 tarkastellaan maan ydinvoiman historiaa, ja sen energiamurroksen historiallista ja poliittista taustaa. Tutkielmassa pyritään myös selvittämään, mitä aikainen luopuminen ydinvoimasta tarkoittaa maan sähköenergiajärjestelmän kannalta ja millä sulkeutuvaa ydinvoimakapasiteettia korvataan. Luvussa tarkastellaan myös haasteita, joita liittyy ydinvoimakapasiteetin sulkemiseen nopealla aikataululla.

Ranskan osalta puolestaan tutkielma pyrkii luvussa 5 selvittämään maan suunnitelmia korvata ikääntyvä ydinvoimakapasiteettinsa uudella ydinvoimalla, ja tarkastelemaan tähän liittyviä haasteita. Luvussa pohditaan myös mahdollisia kehityskulkuja ydinvoiman tulevaisuuden osalta, ja kartoitetaan erilaisia mahdollisuuksia pitää ydinvoima osana energiapalettia. Tutkielmassa pyritään myös selvittämään Ranskan suuren ydinvoimakapasiteetin historiallista taustaa, ja vertaamaan sitä maan nykyiseen poliittiseen ympäristöön.

2. YDINREAKTORIT NYT JA TULEVAISUUDESSA

Tässä luvussa esitellään yleisimpiä ydinreaktorityyppejä, jotka ovat Euroopassa käytössä tai suunnitteilla, ja tarkastellaan uusien neljännen sukupolven ja SMR-voimaloiden tuomia mahdollisuuksia tulevaisuudessa. Ydinvoima perustuu atomiydinten halkeamiseen eli fissioon, jolla tuotettu lämpöenergia siirretään useimmiten vesi-höyrypiiriin. Ydinvoimala on siis perinteinen lämpövoimalaitos, jossa sähkö tuotetaan turbiinin pyörittämällä generaattorilla.

2.1 Reaktoriteknologia nykyään

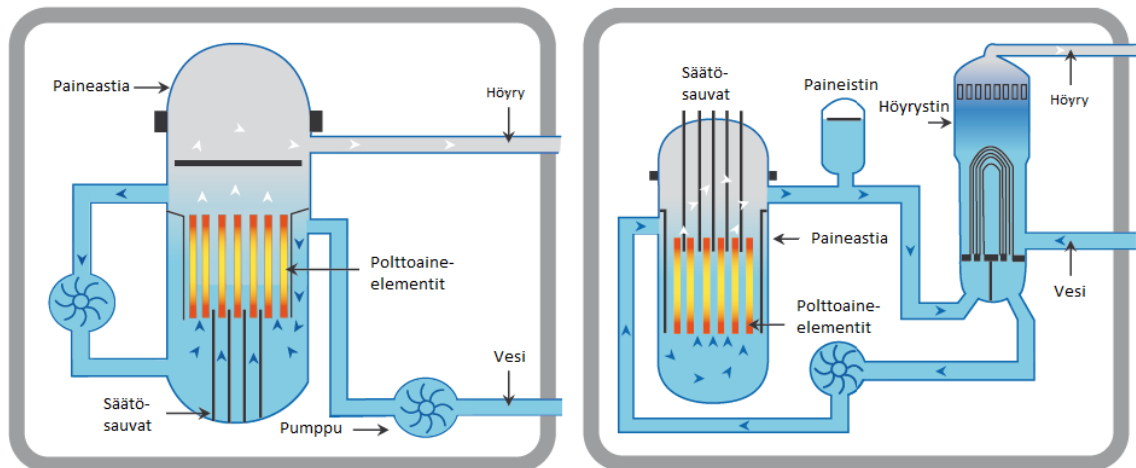
Euroopan ydinreaktoreista pääosa on kevytvesireaktoreita. [5]. Kevytvedellä tarkoitetaan tässä yhteydessä tavallista vettä, joka toimii reaktoreissa niin moderaattorina kuin jäähdytinaineenakin. Ydinreaktorissa moderaattori hidastaa neutroneja, mikä lisää fissioreaktion todennäköisyyttä. Jäähdytinaine puolestaan siirtää fissioreaktiossa syntyneen energian eteenpäin joko turbiinille tai sekundääripiiriin. Kevytveden lisäksi ydinreaktorissa voidaan käyttää myös niin sanottua raskasta vettä, jossa vesimolekyylin molemmat atomit ovat isotooppia ^2H eli deuteriumia. Ydinreaktoria kutsutaan tällöin raskasvesireaktoriksi.

Kevytvesireaktorit jakautuvat paine- ja kiehumusvesireaktoreihin, joiden keskeinen ero on jäähdyttimen paineessa ja olomuodossa. Teknologia on pysynyt pääpiirteittäin samana vuosikymmeniä, ja esimerkiksi Suomeen rakennettu Olkiluoto 3 on tyypiltään painevesireaktori. Nykyään käytössä on pääosin toisen sukupolven reaktoreja, jotka on rakennettu 1970–1980-luvuilla ydinvoimarakentamisen kulta-aikana, kun ydinvoimaa rakennettiin Eurooppaan nopealla tahdilla [6].

Painevesireaktorissa (PWR, *pressurized water reactor*) reaktorin jäähdytys on toteutettu kahdella erillisellä jäähdytyskierrolla, jotka eivät missään vaiheessa ole suorassa kosketuksissa toisiinsa. Painevesireaktorin niin sanotussa primääripiirissä kiertävä vesi on korkeassa paineessa eikä siten pääse kiehumaan missään prosessin vaiheessa. Primääripiirin vesi kiertää höyrystimen läpi, jossa sen lämpöenergia siirtyy lämmönvaihtimella

sekundääripiiriin. Sekundääripiirissä syntynyt höyry puolestaan kulkee turbiinin läpi, jonka jälkeen se jäähdytetään lauhduttimessa. Koska sekundääripiirin vesi ei missään vaiheessa kierrä itse reaktorin läpi, se ei myöskään ole aktiivista. Kuten kuvasta 1 nähdään, painevesireaktori on rakenteeltaan hieman kiehutusvesireaktoria monimutkaisempi.

Kiehutusvesireaktorissa (BWR, *boiling water reactor*) puolestaan on vain yksi jäähdytyskierto, jossa reaktorissa kiehunut vesi kulkee turbiinin ja lauhduttimen läpi, ja palaa takaisin reaktoriin. Toisin kuin painevesireaktorissa, kiehutusvesireaktorilaitoksen turbiinin läpi kulkeva vesi on kontaminoitunutta ja säteilee, mikä aiheuttaa haasteita ennen kaikkea säteilysuojelun kannalta. Kuvassa 1 on esitetty kiehutusvesireaktorin toiminta vasemmalla ja painevesireaktorin toiminta oikealla.



Kuva 1. Kiehutusvesireaktori ja painevesireaktori [5].

2.2 Reaktoriteknologia tulevaisuudessa

Lähitulevaisuudessa Euroopan kannalta merkittäviä moderneja reaktorityyppejä ovat erityisesti eurooppalainen painevesireaktori (EPR, European Pressurized Water Reactor) ja venäläinen VVER-1200, jotka edustavat niin sanotun III+-sukupolven reaktorisuunnittelua ja ovat kummatkin kevytvedellä toimivia painevesireaktoreita. Näissä reaktoreissa on tehty parannuksia ennen kaikkea turvallisuuteen lisäämällä ilman varavoimaa toimivia

passiivia turvajärjestelmiä. Parannuksia on tehty myös käyttöikään sekä polttoainetehokkuuteen, ja eurooppalaisten vaatimusten mukaisesti III+-sukupolven reaktorit kykenevät säätämään tuotantotehoaan vähintään 50 % – 100 % voimalan kapasiteetista, ja tehonsäädön muutosnopeus on 3–5 % voimalan kapasiteetista minuutissa. [7] [8] Tehonsäädön muutosnopeus on siis samalla tasolla kuin hiilivoimaloissa, mutta häviää kuitenkin nopeasti säädettäville kaasuturbiineille [9]. Nykyisiä EPR-voimalaprojekteja ovat esimerkiksi Ranskan Flamanville 3 ja Suomen Olkiluoto 3, kun taas VVER-1200-reaktoreja on rakenteilla tai suunnitteilla esimerkiksi Valko-Venäjälle, Turkkiin ja Suomen Pyhäjoelle [10] [11]. Ensimmäinen EPR-tyyppinen voimala aloitti sähköntuotannon Kiinan Taishanissa vuonna 2018, ja ensimmäinen VVER-1200-reaktori Venäjän Novovoronežissa vuonna 2017 [12] [13].

Kehitteillä on myös neljännen sukupolven reaktoreita, jotka poikkeavat tekniikaltaan täysin nykyreaktoreista ja tarjoavat parannuksia turvallisuuteen, polttoainetehokkuuteen sekä ydinasekelpoisten materiaalien leviämisen ehkäisyyn. Kansainvälinen neljännen sukupolven reaktoreiden edistämiseen perustettu järjestö Generation IV Forum on valinnut noin sadan potentiaalisen teknologian joukosta kuusi kehityspolkua neljännen sukupolven reaktoreille. Näistä useimmat perustuvat erilaiseen jäähdytysratkaisuun kuin kevytvesireaktorit, ja osassa voidaan käyttää polttoaineena toriumia, jonka varannot maaperässä ovat uraania suuremmat. Näitä reaktorimalleja hyödyntämällä ihmiskunnalle tunnetut uraani- ja toriumvarat riittäisivät ainakin kymmeniksi tuhansiksi vuosiksi, sillä niiden polttoainetehokkuus on merkittävästi parempi, kuin nykyisten reaktoreiden. Joilain reaktorimalleilla energiantuotannossa pystytään hyödyntämään myös käytettyä ydinpolttoainetta, mikä antaisi vaihtoehdon käytetyn polttoaineen loppusijoitukselle. [6]

Tulevaisuudessa reaktorikoon ennustetaan pienenevän, ja pienistä modulaarisista reaktoreista eli SMR:istä haetaan ratkaisua ydinvoimaprojektien venyviin aikatauluihin ja ongelmiin kustannustehokkuuden kanssa. [6] Osa suunnitteilla olevista SMR-voimaloista perustuu perinteiseen kevytvesireaktoritekniikkaan, ja osa uusiin neljännen sukupolven suunnitteluratkaisuihin. Rakentamalla mahdollisimman pitkälle tehdasvalmisteisia reaktoreja voisi olla mahdollista tuoda ydinvoimarakentamiseen sarjatuotannon hyötyjä sekä keventää ydinvoimaloiden raskasta lupaprosessia, jos tietyille voimalalle olisi mahdollista saada tyyppihyväksyntä. Tällöin jokaista voimalaa ei tarvitsisi erikseen hyväksyttävä viranomaisilla, mikä varmasti nopeuttaisi rakentamistahtia.

3. YDINVOIMAPOLITIIKKA EUROOPASSA

Tässä luvussa esitellään nykyisiä ja suunniteltuja ydinvoimaprojekteja Euroopan Unionissa sekä tarkastellaan ydinvoiman poliittista tilannetta ja siihen vaikuttavia argumentteja. Tarkempiin suunnitelmiin uusista reaktoreista ei keskitytä, vaan luvun tarkoitus on taustoittaa ydinvoiman nykytilannetta Euroopassa. Argumentit kumpaankin suuntaan vaikuttavat sekä kansalliseen että Euroopan Unionissa käytävään ydinvoimadebattiin, ja niiden ymmärtäminen antaa tärkeää taustatietoa ydinvoiman nykytilanteesta ja siitä käytävästä keskustelusta.

3.1 Ydinvoimastrategiat ja poliittinen tilanne

Euroopan unionin 27 jäsenmaasta sähköenergiaa ydinvoimalla tuottaa 13 maata, joiden lisäksi ydinreaktoreja on Euroopassa Sveitsissä, Iso-Britanniassa, Valko-Venäjällä, Ukrainassa ja Venäjällä. Tässä luvussa keskitytään ydinvoiman tarkasteluun Euroopan Unionissa, joka on Saksan ja Ranskan kannalta olennainen viitekehys. EU:ssa sijaitsee 109 ydinreaktoria, joiden yhteenlaskettu sähköntuotantokapasiteetti on 107 GW. Nämä reaktorit tuottivat sähköenergiaa yhteensä 732,6 TWh eli noin 26 % alueen sähköstä vuonna 2019. Yli puolet tästä tuotettiin Ranskassa, jossa ydinvoimalla tuotettiin 70,6 % sähköstä vuonna 2019. [1] Uusia reaktoreja rakennetaan EU:ssa tällä hetkellä vain Ranskaan, Slovakiaan ja Suomeen, joskin uusia reaktoreita on suunnitteilla tai ehdotettu yhteensä yhdeksään maahan. Taulukossa 1 on esitelty rakenteilla olevat, suunnitellut tai ehdotetut reaktorit maittain.

Taulukko 1. Uudet ydinvoimalat EU:ssa [1].

Valtio	Rakenteilla		Suunniteltu		Ehdotettu	
	lkm	Teho (MW)	lkm	Teho (MW)	lkm	Teho (MW)
Bulgaria	0	0	1	1000	1	1000
Liettua	0	0	0	0	2	2700
Puola	0	0	0	0	6	6000
Ranska	1	1650	0	0	0	0
Romania	0	0	2	1440	1	720
Slovakia	2	942	0	0	1	1200
Slovenia	0	0	0	0	1	1000
Suomi	1	1720	1	1250	0	0
Tšekki	0	0	1	1200	3	3600
Unkari	0	0	2	2400	0	0
Yhteensä	4	4312	7	7290	15	16 220

Taulukosta nähdään, että uusia ydinreaktoreja on suunnitteilla pääasiassa Itä-Euroopan maihin. Esimerkiksi Puola, jonka sähköenergiajärjestelmä perustuu lähes täysin hiilivoimaan, pyrkii pääsemään päästötavoitteisiinsa ehdotetulla 6 uudella ydinvoimalalla, jotka toteutuessaan tuottaisivat 90 %:n kapasiteettikertoimella noin 47 TWh vähäpäästöistä sähköä vuodessa. Tämä on vuoden 2018 kulutuksella laskettuna noin 28 % maan vuosittaisesta sähköenergiankulutuksesta, eli toteutuessaan uudet ydinvoimalat vähentäisivät fossiilisten polttoaineiden käytön tarvetta merkittävästi. [14] Ydinvoima voikin olla erityisesti Itä-Euroopan maille varteenotettava vaihtoehto siirtyä fossiilisista polttoaineista vähäpäästöiseen sähköntuotantoon.

Samaan aikaan kun uutta ydinvoimaa suunnitellaan Itä-Eurooppaan, nähdään toisaalla ydinvoima kestävän kehityksen vastaisena. Tämä kahtiajako on nähtävissä keskustelussa EU:n kestävän rahoituksen taksonomiasta. Ydinvoiman luokittelua kestäväksi investoinniksi vastustavat esimerkiksi Saksa ja Itävalta, kun taas esimerkiksi Ranska näkee ydinvoiman tärkeänä teknologiana hiilidioksidipäästöjen vähentämisen kannalta [15]. Kestävän rahoituksen taksonomialla pyritään alentamaan kestävästä kehitystä tukevien projektien rahoituksen korkotasoa, mikä vähentää näiden pääomakustannuksia. Ydinvoimalat ovat pääomavaltaisia projekteja ja kustannukset painottuvat voimaloiden

rakennusvaiheeseen, minkä takia korkotason alentaminen vaikuttaa merkittävästi uusien voimaloiden rakennuskustannuksiin. Siksi päätös ydinvoiman sisällyttämisestä kestäväen rahoituksen taksonomiaan voi osoittautua tärkeäksi eurooppalaisen ydinvoimarakentamisen kannalta.

3.2 Argumentteja ydinvoimaa vastaan

Ydinvoiman vastustus on historiallisesti liittynyt lähinnä kahteen ydinvoiman ongelmaan: ydinonnettomuuden mahdollisuuteen ja vuosituhansia radioaktiivisena pysyvään ydinjätteen. Ydinonnettomuudet Three Mile Islandissa, Tšernobylässä ja Fukushimaassa ovat jokainen vaikuttaneet ihmisten mielipiteisiin ydinvoimasta, ja siten myös valtiollisiin energiastrategioihin. Ydinvoiman vastustajat näkevät usein mahdollisen ydinonnettomuuden seuraukset niin suurina, ettei riskiä sellaisen tapahtumisesta kannata ottaa, vaikka se olisikin erittäin pieni.

Korkea-aktiivinen ydinjäte eli käytetty ydinpolttoaine säilyy voimakkaasti radioaktiivisena tuhansia vuosia, minkä takia sen loppusijoitusta pidetään niin ihmiselle kuin ympäristölle vaarallisena. Myös mahdollisuus ydinjätteen väärinkäytöstä ydinase materiaalina herättää ydinvoiman vastustajissa huolta.

2000-luvun voimalaprojektit, esimerkiksi Suomen Olkiluoto 3 ja Iso-Britannian Hinkley Point C ovat myös saaneet kritiikkiä jatkuvista aikataulun viivästymisistä ja budjetin ylityksistä. Voimaloiden rakennustahtia pidetään liian hitaana ilmastonmuutoksen estämisen kannalta, ja ydinvoiman nähdään myös rajoittavan uusiutuvien energialähteiden kehitystä. Ydinvoiman kriitikoiden mukaan ydinvoimaan sijoitettu pääoma kannattaisi enemmän sijoittaa uusiutuviin energialähteisiin, joiden nähdään olevan parempia sijoituskohteita niin taloudellisista kuin ympäristöllisistäkin syistä. [16]

3.3 Argumentteja ydinvoiman puolesta

Nykypäivän argumenteissa ydinvoiman puolesta korostuu ennen kaikkea tarve suurille päästövähennyksille: ilmastonmuutoksen aiheuttama uhka on niin suuri, että siihen verrattuna ydinvoiman ongelmat ovat pieniä ja tärkeintä on, ettei ydinvoima aiheuta hiilidioksidipäästöjä. Ydinvoimarakentamiseen 2000-luvulla liittyneiden aikataulu- ja budjetti-ongelmien ajatellaan olevan seurausta erityisesti Euroopan ydinteollisuuden kokemuksen puutteesta, ja rakentamisen uskotaan nopeutuvan tulevaisuudessa uusien projektien ja reaktoriteknologioiden myötä.

Ydinonnettomuuksien osalta ydinvoiman kannattajien parissa luotetaan reaktorisuunnittelun turvallisuuteen ja sen kehitykseen uuden sukupolven reaktoreissa. Myös ydinjätteen loppusäilytystä pidetään turvallisena ratkaisuna, ja sen tekniseen toteutukseen luotetaan. Ydinvoiman polttoainekierron kehittämiseksi nähdään myös mahdollisuuksia esimerkiksi neljännen sukupolven reaktoreissa, joissa polttoainetehokkuus on huomattavasti parempi.

Ydinvoimaa pidetään myös sähkön toimitusvarmuuden kannalta parempana ratkaisuna, kuin täysin uusiutuviin energialähteisiin pohjaavaa sähköntuotantoa, sillä se tuottaa sähköä tasaisesti säästä riippumatta. Ydinvoimalaitokset vievät myös energiantuotantoonsa nähden vähemmän pinta-alaa kuin uusiutuva energiatuotanto, mikä nähdään ydinvoiman kannalta etuna. Uuden sukupolven ydinvoiman kustannusten ja niiden rakentamiseen kuluvan ajan uskotaan tulevaisuudessa laskevan erityisesti SMR-voimaloiden myötä [6].

4. YDINVOIMA SAKSASSA

Saksan energiapolitiikasta puhuttaessa nousee usein esille käsite ”Energiewende”, jolla tarkoitetaan perustavanlaatuisista siirtymistä uusiutuviin energianlähteisiin pohjautuvaan järjestelmään. Energiaturroksen taustalla on hallituksen visio, jonka mukaan vuonna 2050 Saksassa tuotetusta sähköstä 80 % on tuotettu uusiutuvilla energianlähteillä [17]. Energiewenden keskeinen osa on ydinvoimasta luopuminen vuoteen 2022 mennessä, ja tässä luvussa tarkastellaankin sen etenemistä, historiallista ja poliittista taustaa sekä sen aiheuttamia haasteita maan sähköenergiajärjestelmälle.

4.1 Energiapolitiikan taustaa

Ydintekniikan kehityksen alussa 1950–1970-luvuilla ilmapiiri Saksassa oli vielä ydinvoimaa kohden myönteinen, ja voimalaprojekteja tuettiin poliittisesti ja taloudellisesti [3]. Ydinvoimaan liittyvää tutkimusta tehtiin Länsi-Saksassa esimerkiksi hyötöreaktoreihin ja ydinjätteen varastointiin liittyen. Ydinvoima nähtiin modernina teknologiana, ja sitä kannatettiin yli puoluerajojen. Toisaalta ydinvoimaa vastustava ympäristöliike sai alkunsa Länsi-Saksassa 1970-luvun alussa. [17]

Vuoden 1979 Harrisburgin Three Mile Islandin voimalassa tapahtunut ydinonnettomuus, jossa laitoksen kakkosreaktorin ydin sulii osittaisesti, muutti yleistä mielipidettä ydinvoimasta ”tulevaisuuden teknologiana” skeptisempään suuntaan [6] [17]. Lopullisesti Länsi-Saksan politiikassa vallinnut ydinvoimakonsensus murtui vuonna 1986 Tšernobylin ydinonnettomuuden myötä, kun aiemmin ydinvoimamyönteinen Saksan sosiaalidemokraattinen puolue muutti kantaansa ydinvoimaan. Onnettomuuden jälkeisissä mielipidekyselyissä ensimmäistä kertaa enemmistö kansalaisista kannatti ydinvoiman vaiheittaista tai välitöntä käytöstä poistoa. [17]

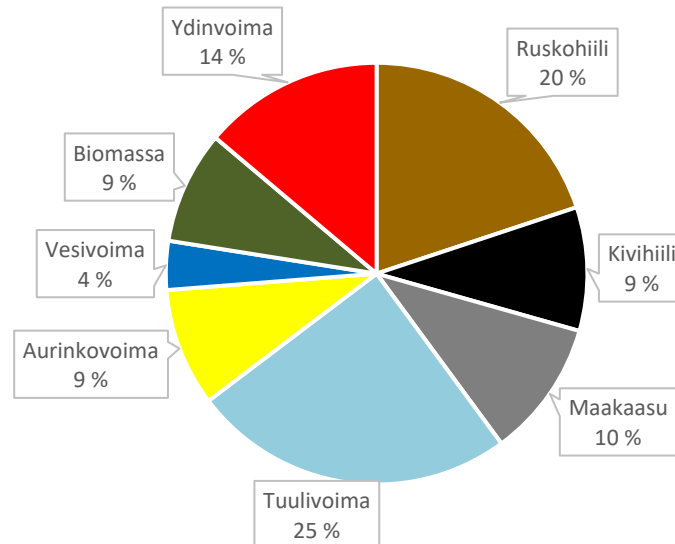
Vuonna 2000 yhdistyneessä Saksassa päästiin ensimmäistä kertaa päätökseen ydinvoiman vaiheittaisesta sulkemisesta: maan ydinvoimaloiden käyttöikä rajattiin keskimäärin 32 vuoteen ja ydinvoimalla vielä tuotettavan sähköenergian kokonaismäärä rajattiin noin 161 TWh:iin. Samana vuonna päätettiin myös syöttötariffeista, joilla haluttiin tukea vielä

kehityksen alkuvaiheessa olevia uusiutuvia energialähteitä. [17] Toisaalta vuonna 2010 Angela Merkelin hallituksen ”Energiekonzept” jatkoi maan ydinvoimaloiden elinikää vuoden 2000 suunnitelmasta keskimäärin 12 vuodella, vaikka ydinvoimasta luopuminen kuuluikin edelleen suunnitelmaan [18].

Fukushiman ydinonnettomuus Japanissa vuonna 2011 johti kuitenkin jälleen uuteen käännteeseen Saksan ydinvoimapolitiikassa, kun maan seitsemän vanhinta reaktoria päätettiin sulkea heti ja loput vuoteen 2022 mennessä. [17] Fukushimaa jälkeisenä aikana suunta Saksan energiapolitiikassa on ollut selvä: uusiutuvien energialähteiden osuutta sähköenergiantuotannosta lisätään voimakkaasti korvaamaan poistuvaa ydinvoimaa ja mahdollistamaan fossiilisten polttoaineiden käytön vähentämisen.

4.2 Saksan sähköenergiantuotanto nykyään

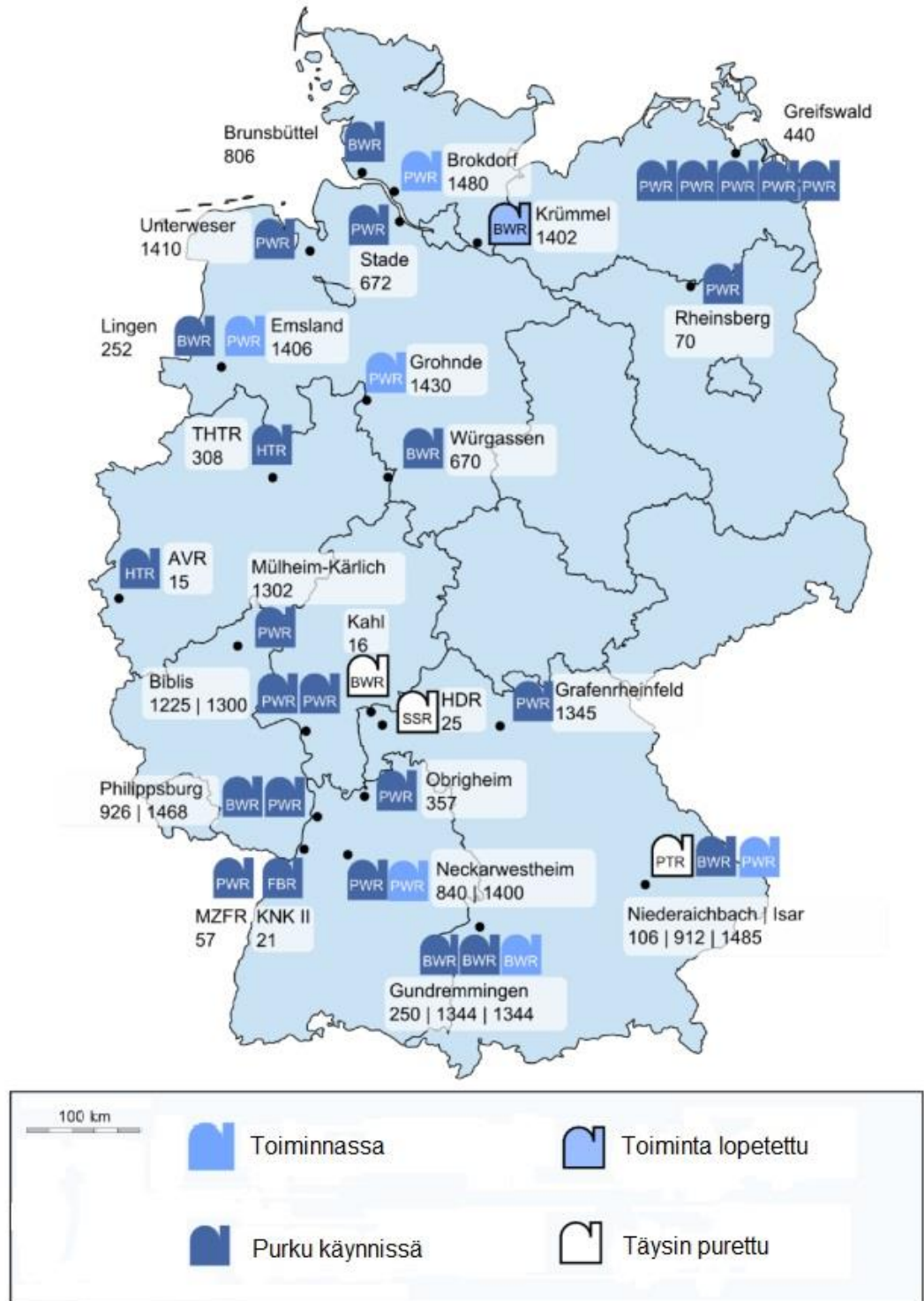
Vuonna 2019 Saksan sähköntuotannosta 14 % tuotettiin maan seitsemällä tuolloin käytössä olleella ydinvoimalalla [19] [20]. Sähköenergiaa tuotettiin vuonna 2019 Saksassa yhteensä 515,56 TWh, josta ydinvoiman osuus oli 71,09 TWh [19]. Saksa on sähköenergian nettoviejä, ja vuonna 2019 sen nettovienti oli 35,2 TWh. Sähköenergiajärjestelmän murroksen myötä tämä osuus on kuitenkin pienemässä; vuonna 2020 Saksan nettovienti oli ainoastaan 18,9 TWh. [21] Ydinvoiman osuus sähköntuotannosta on edelleen merkittävä erityisesti sen kannalta, että käytössä olevat reaktorit on tarkoitus sulkea vuoteen 2022 mennessä. Saksan sähköenergiantuotannon jakautuminen eri tuotantomuodoille vuonna 2019 on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Saksan sähköenergiantuotanto vuonna 2019 [19].

Sähköteholtaan 1402 MW:n Philippsburg 2-voimala suljettiin vuoden 2019 lopussa, joten vuoden 2021 alussa Saksan käynnissä olevien ydinvoimaloiden yhteenlaskettu sähköteho on 8113 MW [20]. Esimerkiksi vuonna 2020 kulutuksen huipputeho (2.2.2020 aikana 11:45 – 12:00) oli 74 132 MW, joten käydessään täydellä teholla ydinvoimalat tuottivat noin 11 % maan huipputehontarpeesta [22]. Tämä on suuri osuus hetkellisestä tuotantotehosta, ja sen korvaaminen vuoden 2022 loppuun mennessä vaatii paljon muulta tuotantokapasiteetilta sekä siirtoyhteyksiltä.

Kuvassa 3 on esitetty Saksan käynnissä olevat ja jo puretut ydinvoimalat kartalla, niiden reaktorityypit ja sähkötehot sekä tilanne käytöstäpoiston ja purun (*decommissioning*) suhteen huhtikuussa 2020. Luvussa 2 mainittujen painevesireaktoreiden (PWR) ja kiehutusvesireaktoreiden (BWR) lisäksi kuvassa nähdään myös reaktorityypiltään erilaisia voimaloita, jotka kuvastavat aktiivista vaihetta Saksan ydinvoimatutkimuksessa. Kuvasta nähdään myös, että kuusi voimalaa on vielä käytössä, suurin osa voimaloista on purkamisvaiheessa ja muutama voimala on jo täysin purettu.



Kuva 3. Saksan ydinvoimalat kartalla [20].

Energiewenden periaatteiden mukaisesti poistuva ydinkapasiteetti on tarkoitus korvata uusiutuvalla sähköntuotannolla, mikä tarkoittaa pääosin tuuli- ja aurinkosähköön pohjautuvaa sähköenergiajärjestelmää. Aurinko- ja tuulivoiman lisäksi myös biomassan käyttö

sähköenergiantuotannossa on kasvanut paljon 2000-luvulla: vuonna 2000 biomassavoimaloiden kapasiteetti oli 703 MW, kun taas vuonna 2019 se oli jo 8 919 MW. [23] Jo vuonna 2016 Saksassa tuotettavasta puusta 50 % käytettiin lämmön- ja sähköntuotantoon [3]. Koska puulla on myös muita käyttöä esimerkiksi paperi- ja selluteollisuudessa, onkin todennäköistä, että sen käyttö sähköntuotantolaitoksissa ei enää lisääny merkittävästi.

Kuitenkin myös fossiililla polttoaineilla toimivilla voimaloilla, erityisesti nopeasti säädettävillä kaasuturbiineilla, on energiamurroksessa tärkeä rooli vielä tulevaisuudessa. Sähköverkon tasapainon säilyttämiseksi tarvitaan joko nopeasti käyttöön otettavaa säätövoimaa tai sähköenergian laajamittaista varastointia, jos riittävää kulutusjoustoja tai mahdollisuutta sähköntuontiin ulkomailta ei ole. Siksi onkin todennäköistä, että erityisesti kaasuturbiinivoimalaitokset säilyvät osana Saksan energiapalettia myös tulevaisuudessa. Tätä väittämää tukee taulukossa 2 esitetty suunnitelma Saksan energiantuotannosta lähteittäin, jonka mukaan fossiililla polttoaineilla tuotetaan sähköä vielä 2050-luvulla. Taulukossa esitetyt lukemat vuosille 2030 ja 2050 ovat arvioita vuodelta 2011.

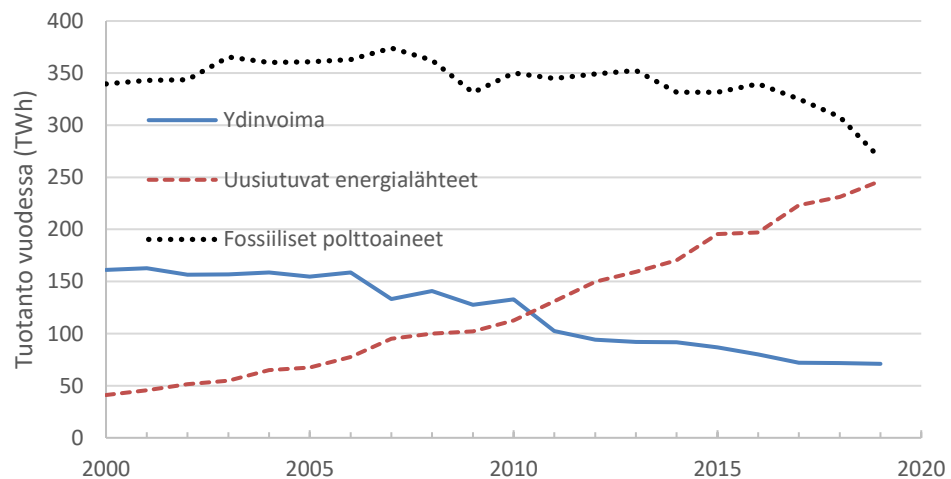
Taulukko 2. Suunniteltu sähköntuotanto Saksassa 2000-luvulla [[3], katso [24] ja [25]].

	2000	2010	2030	2050
Ydinvoima (TWh)	170	140	0	0
Fossiiliset polttoaineet (TWh)	370	370	250	80
Uusiutuva energia (TWh)	40	105	300	430
Yhteensä (TWh)	580	615	550	510

Taulukosta 1 nähdään, että poistuva ydinvoimakapasiteetti korvataan Saksan energiastrategian mukaisesti uusiutuvalla energialla, mutta fossiilisia polttoaineita on arvioon mukaan laajasti käytössä vielä vuonna 2030. Vuonna 2050 pääosa sähköenergiasta tuotetaan uusiutuvilla energialähteillä, mutta fossiiliset polttoaineet tuottavat edelleen noin 15 % sähköenergiasta. Huomioitavaa arvioissa on myös se, että sähkönkulutuksen odotetaan laskevan vuoteen 2030 mennessä noin 11 % ja vuoteen 2050 mennessä noin

17 % vuoden 2010 tasosta. Tämä perustunee parannuksiin energiatehokkuudessa, mutta jättää huomiotta laajemman yhteiskunnan sähköistymisen aiheuttaman kysynnän. Arviossa energiatehokkuudelle asetetaan entistä enemmän odotuksia, kun huomioidaan esimerkiksi liikenteen ja teollisuuden ennustettu sähköistyminen. Päästövähennysten toteutumisen kannalta keskeistä on, riittävätkö uusiutuvan energian rakennustahti ja parannukset energiatehokkuudessa korvaamaan ydinvoiman, fossiiliset polttoaineet sekä sähköenergian uuden kysynnän.

2000-luvulla Saksassa on suljettu 13 ydinvoimalaa, joiden kapasiteetti on yhteensä 13 363 MW [20]. Maan energiastrategian toteutumisen kannalta on tärkeä kysymys, onko tämä käytöstä poistettu kapasiteetti korvattu fossiilisilla polttoaineilla vai uusiutuvalla energialla. Siksi on tärkeää tarkastella energiantuotannon kehitystä, kun ydinvoimaa on poistettu verkosta. Kuvassa 4 on esitetty vuosittainen sähköenergiatuotanto Saksassa 2000-luvulla ydinvoimalla, uusiutuvilla energialähteillä ja fossiilisilla polttoaineilla.



Kuva 4. Saksan sähköenergiatuotanto 2000-luvulla. [26]

Kuvasta 4 nähdään, että ainoa kasvava käyrä kuvaa uusiutuvan energian kehitystä: vuosina 2000–2019 uusiutuvan energian vuosittainen tuotanto kasvoi noin 200 TWh:a. Samana aikana vuosittainen sähköntuotanto ydinvoimalla puolestaan laski noin 90 TWh:a, ja sähköntuotanto fossiilisilla polttoaineilla noin 70 TWh:a. Energiämääriä tarkastellessa

voidaan siis sanoa, että ydinvoiman poistumista ei ole korvattu lisäämällä energiantuotantoa fossiilisilla polttoaineilla, vaan uusiutuva energiantuotanto on kattanut poistuvan ydinenergiamäärän. Energiantuotanto fossiilisilla polttoaineilla ei ole kuitenkaan pudonnut samoissa määrin kuin ydinvoimalla, mikä on Saksan päästötavoitteiden kannalta negatiivinen asia. Onkin selvää, että ydinvoimasta nopealla aikataululla luopuminen on johtanut pienempiin vähennyksiin energiantuotannossa fossiilisilla polttoaineilla.

4.3 Saksan sähköenergiantuotanto tulevaisuudessa

Nykyisen poliittisen konsensuksen vallitessa Saksassa on vaikea nähdä tulevaisuutta ydinvoimalle [17]. Aurinko- ja tuulisähkön positiivisen hintakehityksen ja hallituksen suunnitelmien myötä näyttää erittäin todennäköiseltä, että sähköntuotanto Saksassa tulee tulevaisuudessa perustumaan pääosin uusiutuvaan energiaan. Toisaalta ydinvoiman poistumisen myötä fossiilisilla polttoaineilla toimivat voimalat ovat toistaiseksi ainoa tapa tuottaa perusvoimaa, sillä tuuli- ja aurinkovoiman tuotanto vaihtelee sään mukaan. Fossiilisten polttoaineiden käyttöä on kuitenkin vähennettävä jatkuvasti, kun ilmastonmuutos vaatii päästövähennyksiä. Tässä onkin Saksan energiamurroksen todennäköisesti suurin ongelma: miten varmistaa kansalaisten sähkönsaanti hetkinä, kun aurinko- ja tuuli-voiman tuotanto on alhaista eikä perusvoiman tuotantoa ole biomassalaitoksia lukuun ottamatta. Toisaalta onnistuessaan täysin uusiutuva sähköntuotanto poistaa niin fossiilisten polttoaineiden kuin ydinvoimankin ongelmat.

Jos Saksan luopuminen ydinvoimasta etenee suunnitellusti, vähenee ydinsähkön tuotanto lähivuosina huomattavan nopeaa tahtia. Vuosina 2019–2023 sähköntuotanto ydinvoimalla vähenee noin 71 TWh:lla kun oletetaan, että viimeinenkin ydinvoimala on suljettu vuoden 2022 loppuun mennessä. Toisaalta vuosina 2008–2012, jolloin ydinvoiman osuutta vähennettiin myös voimakkaasti, väheni tuotanto vain noin 47 TWh:a. [26] Yhtä nopeaa muutosta ydinvoiman sähköntuotannossa ei ole siis aiemmin 2000-luvulla nähty, ja onkin mahdollista, että näin nopea muutos sähköntuotannossa voi johtaa ongelmiin maan sähköenergiajärjestelmässä. Tämän mahdollisuuden todennäköisyyttä lisää myös se, että verrattuna vuosiin 2008–2012 Saksan sähköenergiajärjestelmässä on nykyään enemmän vaihtelevaa aurinko- ja tuulivoimaa sekä vähemmän hallittavissa olevaa fos-

siilisiin energianlähteisiin perustuvaa sähköntuotantoa. Jos näin nopea muutos osoittautuu ongelmalliseksi sähköenergiajärjestelmän kannalta, voi seurauksena olla ydinvoimasta luopumisen aikataulun siirtäminen myöhemmäksi tulevaisuuteen.

Ratkaisua uusiutuvien energialähteiden vaihtelevuuteen etsitään niin sähköenergian varastoinnista, kulutuksen joustosta, kun sähköverkkojen kehittämisestäkin [3]. Todennäköisesti toteutunut ratkaisu on yhdistelmä näitä kaikkia ratkaisuja, sekä nykyisenkaltaista uusiutuvien tuotannon tukemista esimerkiksi kaasuturbiinivoimalaitoksilla. Luultavasti maakaasulla toimivia voimalaitoksia tarvitaan Saksassa vielä pitkään, ennen kuin kustannus- ja energiatehokasta ratkaisua energian varastointiin otetaan käyttöön. Tässä työssä ei tarkastella näitä ratkaisuja tarkemmin, mutta on selvää, että ydinvoiman ja fossiilisten polttoaineiden korvaaminen uusiutuvilla energialähteillä on haasteellista, ja täysin uusiutuvaan energiajärjestelmään pääsy voi viedä vuosikymmeniä.

Eräs Saksalle ominainen ongelma on sähkönkulutuksen keskittyminen maan eteläosiin, mikä aiheuttaa investointipaineita maan sähköverkolle. Erityisesti tuulivoiman osalta olosuhteet maan pohjoisosissa ovat huomattavasti paremmat, mikä tekee pohjoisen tuulivoimalainvestoinneista etelää kannattavampia. Tämä on johtanut tilanteisiin, jossa pohjoisen tuulivoimaa on siirtokapasiteetin takia hetkittäin jouduttu ajamaan alas, vaikka etelässä sähkölle olisi ollut kysyntää. Uusien siirtolinjojen rakentamista on myös vaikeuttanut paikallisten asukkaiden vastustus ilmassa kulkevia voimalinjoja kohtaan, minkä takia pohjoisesta etelään kulkevat uudet siirtolinjat toteutetaan maakaapeleina, joiden rakentaminen on ilmassa kulkevia kaapeleita hitaampaa ja kalliimpaa. [3]

Vaikka ydinvoimasta onkin päätetty Saksassa luopua ja suunnitelmat energiajärjestelmän kehittämisestä tehty sen mukaisesti, on silti erittäin pieni todennäköisyys, että maa joutuu muuttamaan ydinvoimakantaansa tulevaisuudessa. Tämä voisi olla mahdollista esimerkiksi silloin, jos maassa koettaisiin useampia uusiutuvan energiantuotannon ongelmista johtuvia laajoja sähkökatkoja, tai kulutusta jouduttaisiin toistuvasti rajoittamaan tuuli- ja aurinkosähkön tuotannon ollessa alhaista. Epäonnistuminen uusiutuvaan energiantuotantoon pohjautuvan järjestelmän toteuttamisessa voi myös johtaa suunniteltua suurempaan fossiilisten polttoaineiden käyttöön, mikä yhdessä maan omien ja EU:n tasolla sovittujen päästövähennystavoitteiden myötä voisi pakottaa Saksan harkitsemaan ydinvoimastrategiaansa uudelleen. Uusien neljännen sukupolven ydinvoimaloiden antamat lupaukset paremmasta turvallisuudesta ja polttoainetehokkuudesta voivat yhdessä

edellä mainittujen asioiden kanssa johtaa muutokseen saksalaisten asenteissa ydinvoimaa kohtaan. Tämä on kuitenkin melko epätodennäköistä, ja maassa näyttääkin vallitsevan vahva konsensus siitä, että ydinvoima ei ole vaihtoehto tulevaisuuden energiapaljetissa, vaikka se edellyttäisikin fossiilisten polttoaineiden käyttöä pidempään.

5. YDINVOIMA RANSKASSA

Toisin kuin Saksassa, Ranskan energiatuotannon keskeisenä elementtinä on myös 2000-luvulla ollut ydinvoima. Maan 56 käytössä olevaa ydinvoimalaa tuottavat noin 70 % sen omasta sähköntarpeesta, minkä lisäksi Ranska on maailman suurin sähkönviejä ja tienaa yli kolme miljardia euroa vuodessa viemällään sähköllä [4]. Vaikeudet uuden ydinvoiman rakentamisessa, ydinvoimaan liitetyt ympäristöongelmat ja uusiutuvan sähköntuotantokapasiteetin jatkuvasti aleneva hinta ovat kuitenkin 2000-luvulla johtaneet ydinvoiman aseman kyseenalaistamiseen maassa, jossa ydinvoiman osuus sähkönkulutuksesta on maailman suurin [27]. Toisaalta maan poliittinen johto on ilmaissut tukensa ydinvoimalle nyt ja tulevaisuudessa [28]. Tässä luvussa tarkastellaan Ranskan ydinvoiman historiallista ja poliittista taustaa, kartoitetaan maan ydinvoiman ja sähköenergiajärjestelmän nykytilannetta ja analysoidaan maan sähköenergiajärjestelmän tulevaisuutta ydinvoiman näkökulmasta.

5.1 Energiapolitiikan taustaa

Ranskan ydinvoiman kasvun alun voi ajoittaa 1970-luvulle öljykriisin aikaan. Vuoden 1973 öljykriisin jälkeen niin kutsuttu Messmer-suunnitelma ehdotti 80 uuden ydinvoimalan rakentamista vuoteen 1985 mennessä ja 170 uuden ydinvoimalan rakentamista vuoteen 2000 mennessä. Vaikka suunnitelma ei täysimittaisena toteutunutkaan, Ranskassa rakennettiin 56 uutta reaktoria vuosina 1974–1989. Ydinvoima nähtiin keinona päästä energiaomavaraiseksi ja vapauttaa Ranska kytköksistä epävakaisiin öljyntuottajamaihin, minkä lisäksi kotimaisen ydinteollisuuden kehittämisellä haluttiin tukea maan modernisointia ja teollistumista. Ydinvoimaloiden rakentamisen aikaan poliittinen ilmapiiri oli varsin teknokraattinen, ja voimalaprojekteille oli tyyppillistä keskusjohtoinen lähestymistapa sekä julkisen sektorin suuri rooli. Ydinvoimaloiden suunnittelusta, rakentamisesta ja ope- roimisesta vastaavat yhtiöt Framatome ja EDF olivat kummatkin valtion omistuksessa, mikä helpotti poliittista vallankäyttöä ja toisaalta antoi ydinteollisuudelle vahvan mandaatin toimia. [29]

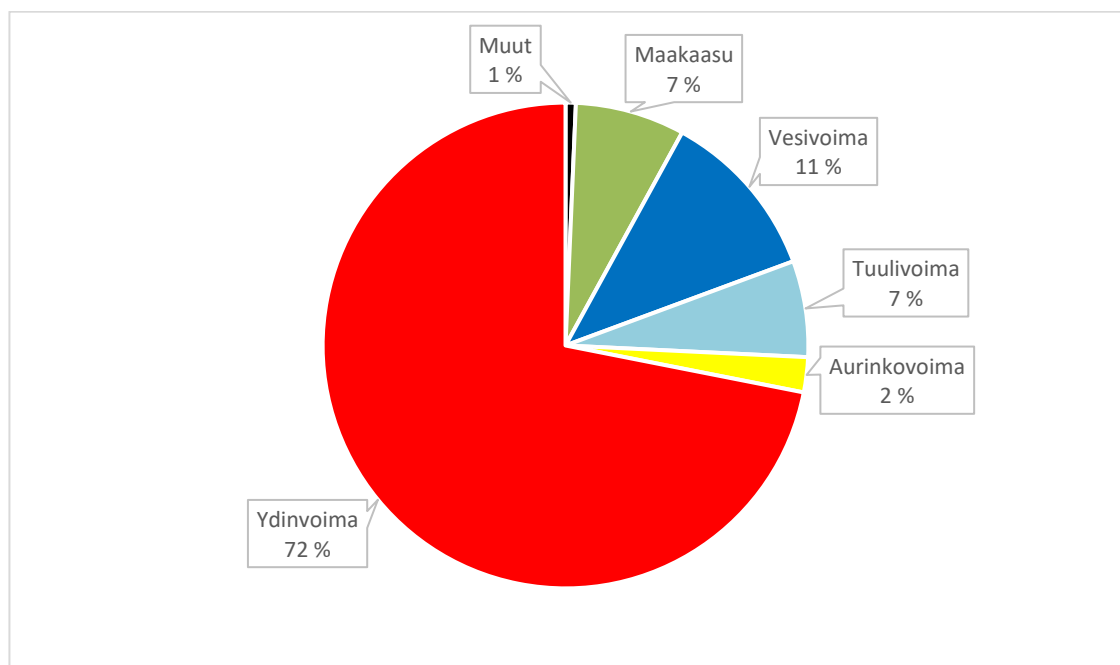
Keskusjohtoisuus näkyy myös tavassa, jolla kritiikki ydinvoimaa kohtaan vaiennettiin. Ydinvoimaan liittyviä dokumentteja salattiin aina 1990-luvulle asti kansalliseen turvallisuuteen vedoten, ja esimerkiksi Tšernobylin ydinvoimaonnettomuuden laskeuman tiedotettiin välttäneen Ranskan, vaikka todellisuudessa näin ei tapahtunut. Jo ennen Tšernobyliä ydinvoiman vastaisissa mielenosoituksissa tapahtui väkivaltaisuuksia niin poliisin kuin ydinvoiman vastustajienkin puolelta. Ydinvoimalan rakennustyömaita ja EDF:n rakennuksia myös sabotoitiin ja niihin hyökättiin esimerkiksi pommi- ja raketti-iskuilla. Toisaalta paikallisia yhteisöjä ei usein kuunneltu voimalaprojekteissa, mikä osaltaan edesauttoi ydinvoiman vastaista liikettä. Ydinvoiman vastainen liike ei kuitenkaan Ranskassa päässyt samaan asemaan, kuin esimerkiksi Saksassa, ja ydinvoima nähtiinkin 1900-luvun lopussa yleisesti kansallisena ylpeydenaiheena. [29]

Ranskalaisten positiivinen suhtautuminen ydinvoimaan näkyi myös reaktiossa Fukushima ydinonnettomuuteen: Saksaan verrattuna maan mediassa ydinonnettomuutta käsiteltiin vähemmän ja se liitettiin harvemmin maan omaan ydinteollisuuteen [30]. Ydinonnettomuus johti kuitenkin mittavaan maan ydinvoimaloiden turvallisuutta parantavaan investointiohjelmaan [31]. Nopeita päätöksiä ydinvoimaloiden pikaisesta sulkemisesta Saksan tapaan ei Ranskassa tehty.

Vaikka ydinvoimasta ei haluttukaan luopua, päätettiin Ranskassa kansallisen energiamurrosdebatin seurauksena vähentää ydinvoiman osuutta maan energiantuotannosta. Ensimmäinen ydinvoiman määrää rajoittava laki hyväksyttiin Ranskassa vuonna 2015: ydinvoiman kokonaiskapasiteetti päätettiin rajoittaa vuoden 2015 tasolle 62,2 GW:iin, ja ydinvoiman osuus sähköntuotannosta päätettiin laskea 50 %:iin vuoteen 2025 mennessä. Ydinvoiman vähentämisen lisäksi tavoiteltiin vähennyksiä hiilidioksidipäästöissä sekä uusiutuvan energiantuotannon kasvattamista. [32] Vuonna 2018 tätä tavoitetta siirrettiin kuitenkin kymmenellä vuodella eteenpäin: Ranskan nykyinen tavoite on vähentää ydinvoimaa 50 %:iin sähköenergiantuotannosta vuoteen 2035 mennessä [33]. Vaikka ydinvoiman osuus Ranskan sähköenergiantuotannosta pieneneekin merkittävästi, on se viimeisimmän suunnitelman mukaan silti huomattava energialähde myös tulevaisuudessa.

5.2 Ranskan sähköenergiantuotanto nykyään

Vuonna 2019 Ranskassa tuotettiin 527,8 TWh sähköenergiaa, josta ydinvoiman osuus oli 379,5 TWh. Sähkönkulutus puolestaan oli 473,4 TWh, eli vuonna 2019 Ranska vei sähköä nettona 54,4 TWh. [34] Vuoteen 2021 mennessä ydinvoiman osuus on todennäköisesti pienentynyt, sillä vuonna 2020 suljettiin reaktorit Fessenheim 1 ja Fessenheim 2, joiden kummankin sähköteho on 880 MW. Vuonna 2021 Ranskan ydinvoimaloiden kokonaisteho on 61 370 MW. [4] Kuvassa 5 on esitetty Ranskan sähköntuotannon jakautuminen eri tuotantomuodoille vuonna 2019.



Kuva 5. Ranskan sähköenergiantuotanto vuonna 2019. [34]

Vaikka ydinvoimaloita ajetaan taloudellisista ja teknisistä syistä perinteisesti täydellä teholla vuorokauden ympäri, on Ranskassa ydinvoiman osuus niin suuri, ettei tämä ole mahdollista. Tehonsäädön haastetta lisää entisestään se, että sähkölämmityksen yleistyden takia sähkönkulutus vaihtelee lämpötilan mukaan enemmän kuin missään muussa Euroopan maassa. [4]

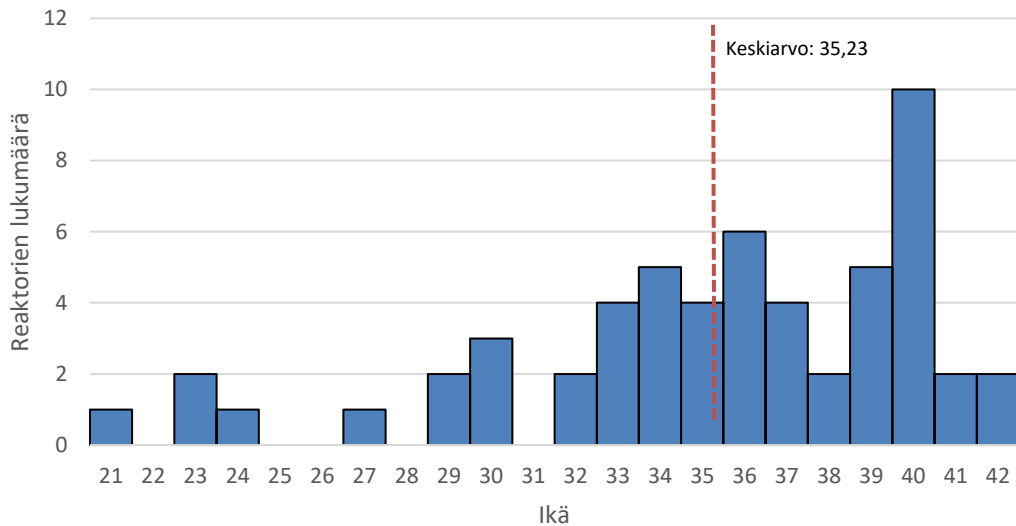
Kaikki Ranskan ydinvoimalat ovat painevesireaktoreita, joissa tehoa voidaan säätää joko säätösauvoja käyttämällä tai lisäämällä booria primääripiirin jäähdytysveteen. Tehonsäädön helpottamiseksi ranskalaisissa ydinvoimaloissa on käytössä erityiset ”harmaat” säätösauvat, jotka helpottavat tehonsäätöä ja vähentävät siitä aiheutuvaa polttoaineen epätasaista kulumista. Painevesireaktorin mahdollisuudet tehonsäätöön vaihtelevat sen mukaan, missä vaiheessa sykliä reaktorin polttoaine on: polttoainesyklin alussa tehoa voidaan vähentää 100 %:sta 30 %:iin 30 minuutissa kun taas syklin lopussa tehonsäätömahdollisuutta ei ole. [4] Tuotannon ja kulutuksen tasaaminen vaatiikin siksi laajempaa koordinoitua kaikkien reaktoreiden välillä eikä verkon tasapainoa voida saavuttaa säätämällä jatkuvasti vain muutaman voimalan tehoa. Tässä mielessä onkin hyödyllistä, että kaikkia Ranskan ydinvoimaloita hallinnoi sama valtio-omisteinen yhtiö EDF.

Ydinvoimaloissa syntyvän ydinjätteen vähentämiseksi Ranskassa tehdään myös ydinpolttoaineen jälleenkäsittelyä. Jälleenkäsittelyssä käytetyn ydinpolttoaineen uraani sekä plutonium kierrätetään, ja niistä tehdään uudelleenkäytettäviä polttoaine-elementtejä. Käytetyn polttoaineen uudelleenkäytettävästä materiaalista 96 % saadaan otettua talteen jälleenkäsittelyprosessissa. Jälleenkäsittelemällä polttoainetta Ranska onkin pienentänyt vuosittaista uuden uraanin kulutustaan 17 %:lla. [35] Jälleenkäsiteltyä polttoainetta kutsutaan sekaoksidipolttoaineeksi (MOX), ja sitä käytetään 24 ranskalaisessa 900 MW:n laitoksessa. Käytettyä MOX:ia ei kuitenkaan jälleenkäsitellä uudelleen. [4]

Kaikki Ranskan ydinreaktorit ovat kolmen eri standardityypin reaktoreita, ja niiden alkuperäiset tehot ovat 900 MW, 1300 MW ja 1450 MW. Alkuperäiseltä teholtaan 900 MW:n reaktoreja on Ranskassa 32, 1300 MW:n reaktoreja 20 ja 1450 MW:n reaktoreja 4. Osaa näistä reaktoreista on kuitenkin tehostettu ja niiden kapasiteettia kasvatettu, kun taas osaa voimaloista käytetään alun perin suunniteltua pienemmällä kapasiteetilla. [4]

Ranskan ydinreaktorien keskimääräinen ikä on noin 35 vuotta, mikä on varsinkin toisen sukupuolen ydinvoimaloille paljon. [4] Voimalaoperaattori EDF pyrkii kuitenkin pidentämään voimaloiden käyttöikää Grand Carénage-ohjelmalla, jonka tavoitteena on päivittää 900 MW:n reaktoreita 40-vuotishuollossa niin, että niiden käyttöikä saadaan kasvatettua aina 10 vuodella kerrallaan. [36] Ranskan ydinteollisuuden valvonnasta vastaava viranomais ASN on alustavasti hyväksynyt suunnitelmat näiden reaktorien käyttöiän pidentämisestä 50 vuoteen. [37] Kuvassa 6 on esitetty Ranskan ydinreaktorien ikärakenne

laskettuna ydinreaktorien verkkoon kytkennästä. Kuvassa on myös esitetty kaikkien voimaloiden keskimääräinen ikä.



Kuva 6. Ranskan ydinreaktorien ikärakenne [4].

Kuvasta nähdään, että suurin osa reaktoreista on yli 30 vuotta vanhoja, ja vain 10 reaktorin ikä on 30 vuotta tai alle. Reaktorien käyttöiän pidentäminen 50 tai jopa 60 vuoteen, jota EDF on selvittänyt, lieventäisi reaktorien korvaamisesta aiheutuvaa kiirettä merkittävästi [4]. EDF:n mukaan ainoat ydinvoimalan komponentit, joita ei voida vaihtaa, ovat reaktorin paineastia sekä suojarakennus [4]. Tällöin jos näiden komponenttien todetaan olevan kunnossa ja reaktorien turvallisuusarvioissa ei tapahdu muutoksia, pitäisi käyttöiän pidennyksien olla teknisesti mahdollisia. Toisaalta on myös mahdollista, että käyttöiän pidennykset epäonnistuvat teknisistä tai poliittisista syistä. 900 MW:n reaktorien käyttöiän rajoittuessa 50 vuoteen ja 1300 MW:n sekä 1450 MW:n reaktorien käyttöiän 40 vuoteen, alkaa Ranskalla olla kiire rakentaa uutta ydinvoimakapasiteettia pysyäkseen tavoitteessaan tuottaa 50 % sähköstä ydinvoimalla vuonna 2035.

Modernia ranskalaista ydinvoimaosaamista edustaa EPR-laitostyyppi, jonka ovat suunnitelleet ranskalaiset EDF ja Framatome yhteistyössä saksalaisen Siemensin kanssa. EPR:n suunnittelu perustuu saksalaiseen Konvoi-laitostyyppiin sekä ranskalaiseen N4-laitostyyppiin, joka on teholtaan 1450 MW. Parannuksia näihin reaktoreihin nähden on EPR:ssä tehty erityisesti turvallisuusominaisuuksiin: esimerkiksi vakavien reaktorionnettomuuksien hallintaa varten EPR:ssä on niin sanottu sydänsieppari, jonka tarkoitus on

estää sulaneen reaktorisydämen vuoto ympäristöön vakavassa onnettomuustilanteessa. Laitoksen suunniteltu käyttöikä on 60 vuotta, joka on selkeästi pidempi kuin nykyisillä reaktoreilla. [38]

Vuonna 2021 ainoa rakenteilla oleva ydinreaktori Ranskassa on Flamanville 3, joka on laitostyypiltään EPR. Flamanville 3:n rakennustyöt aloitettiin marraskuussa 2007, ja voimalan oli tarkoitus tuottaa sähköä toukokuussa 2012. Voimalaprojektin valmistuminen on kuitenkin pahasti myöhässä, ja viimeisimmän aikataulun mukaan voimalan on tarkoitus aloittaa sähköntuotanto vuonna 2023 [39]. Voimalan kuumatestit, joissa testataan voimalan toimintaa ilman ydinpolttoainetta, valmistuivat ennen koronapandemiaa helmikuussa 2020 [40]. Polttoaineen lataus reaktoriin on puolestaan suunniteltu loppuvuodelle 2022, mutta kuten projektin historia on osoittanut, ovat aikataulun viivästykset edelleen mahdollisia. [39]

Jatkuvien aikataulun viivästysten lisäksi myös Flamanville 3:n alkuperäinen kustannusarvio on ollut väärä. Alkuperäisen arvion mukaan voimalan rakennuskustannukset olivat 3,3 miljardia euroa vuonna 2005, joka on inflaatio huomioon ottaen noin 4,2 miljardia euroa vuonna 2020. Tällä kustannusarviolla voimalan tuottaman sähkön hinnaksi olisi tullut 4,6 snt/kWh. [4] Uusin budjetti voimalalle on 12,4 miljardia euroa, mutta todellisten kustannusten on esitetty olevan jopa 19,1 miljardia euroa [39]. Sähkön hinnaksi on puolestaan arvioitu 11–12 snt/kWh [41]. Vaikka Flamanville 3 onkin eräänlainen pilottilaitos, on kustannusarvio silti noussut erittäin korkeaksi, mikä herättää kysymyksiä uusien ydinvoimaloiden kannattavuudesta. Ranskan hallitus odottaakin Flamanville 3:n polttoaineen latausta ennen kuin se tekee päätöksiä uusien ydinvoimaloiden rakentamisesta [42].

Näitä EPR-projekteihin liittyviä ongelmia on tarkoitus parantaa uudella reaktorityypillä, josta käytetään nimeä EPR 2. Tämän reaktorin suunnittelu perustuu vanhaan EPR:ään, mutta suunnittelun tavoitteena on ollut yksinkertaistaa voimalan rakennetta, jotta rakennusaikaa ja -kustannuksia saataisiin vähennettyä. Myös voimalan tehon joustavuuteen on panostettu, jotta se soveltuisi paremmin paljon uusiutuvaa energiaa käyttävään verkkoon. [43] EPR 2:ssa on esimerkiksi vaihdettu alkuperäisen EPR-laitostyyppin kaksinkertainen suojarakennus yksinkertaiseen suojarakennukseen, jotta rakentamista saataisiin nopeutettua ja kustannuksia vähennettyä [44]. EDF on ilmoittanut paljastavansa tarkempia yksityiskohtia EPR 2-laitoksesta vuonna 2021 [45].

Reaktorisuunnittelun lisäksi syitä EPR-projektien epäonnistumiselle on etsitty esimerkiksi kilpailusta kahden valtio-omisteisen yhtiön EDF:n ja Arevan välillä, minkä on esitetty johtaneen tarjouskilpailuun ja epärealistisiin aikataulu- ja kustannusarvioihin. Myös EDF:n organisaatiota on syytetty puutteellisesta johtajuudesta voimalaprojektissa. [41] Eräs suuri tekijä projektien epäonnistumisessa on todennäköisesti osaamisen puute: 2000-luvulla Ranskassa ei ole rakennettu yhtään ydinreaktoria, joten kokemusta vastaavista projekteista on paljon vähemmän kuin ydinvoimarakentamisen kulta-aikana 1970–1980-luvuilla. Tämän lisäksi Fukushima onnettomuuden jälkeen ydinreaktorien turvallisuusvaatimukset ovat kiristyneet entisestään, mikä on varmasti osaltaan hidastanut projektien etenemistä. Tätä väitettä tukee myös se, että Kiinassa, jossa turvallisuusvaatimuksia pidetään yleisesti löysempinä, on samaan aikaan valmistunut kaksi EPR-tyyppistä voimalaa.

5.3 Ranskan sähköenergiantuotanto tulevaisuudessa

Vaikka Ranskassa onkin poliittista tahtoa uuden ydinvoiman rakentamiselle, on silti mahdollista, että III+-sukupolven ydinreaktoreiden monimutkaiset turvallisuusjärjestelmät yhdistettynä ydinvoimatekniikan osaamispuulaan Euroopassa tekevät ydinvoimarakentamisesta kannattamatonta ja liian hidasta. Tämä onkin Ranskan ydinvoiman suurin haaste, ja EPR 2:lla on suuret paineet onnistua rakennustahdin nopeuttamisessa ja kustannusten hallinnassa. Toisaalta kun useat EPR-projektit valmistuvat lähitulevaisuudessa, on kokemusta ydinvoimarakentamisesta taas enemmän, ja aikaisemmissa projekteissa tapahtuneet virheet voidaan välttää.

Ranskaan lähitulevaisuudessa rakennettavan ydinvoiman määrään voi vaikuttaa myös nykyisten voimaloiden käyttöiän pidennykset, sillä jos usean voimalan käyttöikä voidaan pidentää merkittävästi, rajoittaa se uusien voimaloiden rakennustarvetta. Ottaen huomioon Ranskan tavoitteen vähentää ydinvoiman osuutta sähköntuotannosta 50 %:iin on mahdollista, että vain muutama suljettavista voimaloista korvataan uusilla. III+-sukupolven ydinvoimaloiden turvallisuus on kuitenkin paremmalla tasolla ja niiden tehonsäätöominaisuudet ovat paremmat, mikä voi antaa uusille voimaloille etua vanhojen voimaloiden käyttöiän pidennystä vastaan. Vanhojen voimaloiden käyttöiän pidennys on toisaalta merkittävästi halvempaa kuin uuden ydinvoiman rakentaminen.

On erittäin todennäköistä, että uusiutuvien energialähteiden määrä kasvaa Ranskan sähköenergiajärjestelmässä tulevaisuudessa, ja niihin liittyvällä tuotannon voimakkaalla vaihtelulla voi olla vaikutusta myös maan ydinvoimaloihin. Aurinko- ja tuulivoiman tuotannon vaihtelu voi olla nopeampaa kuin vanhan sukupolven ydinvoimaloiden kyky säätää tehontuottoaan, mikä aiheuttaa todennäköisesti haasteita maan sähköenergiajärjestelmälle tulevaisuudessa. III+- sukupolven ja tulevaisuudessa neljännen sukupolven reaktorit kykenevät kuitenkin parempaan tehonsäätöön, mikä tekee niistä vanhoja reaktoreja toimivamman ratkaisun tulevaisuuden sähköenergiajärjestelmään. Uutta ydinvoimaa tukee myös se, että Ranskan sähköntuotannon hiilidioksidipäästöt ovat jo ennestään erittäin alhaiset. Kiristyvien ilmastotavoitteiden myötä päästöjen tuskin halutaan nousevan, ja siksi uusiutuvaa energiantuotantoa tukevaa kaasuvoimaa tuskin halutaan rakentaa merkittävästi lisää. Onkin todennäköistä, että lisääntyvän aurinko- ja tuulisähkön tuoman vaihtelun tasapainottaa tulevaisuudessa yhdistelmä uutta ydinvoimaa ja jonkinlaista energian varastointia.

Kasvava uusiutuvan energian kapasiteetti herättää myös toisen kysymyksen uudesta ydinvoimasta: jos ydinvoimaa joudutaan käyttämään entistä enemmän säätötehonä, mitä tapahtuu uuden ydinvoiman ennestään heikolle taloudelliselle kannattavuudelle? Ydinvoimalan taloudellisen kannattavuuden kannalta parasta olisi käyttää sitä täydellä teholla vuorokauden ympäri, sillä tämä maksimoi tuotetun sähköenergian. Sähköverkossa voi kuitenkin olla tilanteita, joissa aurinko- ja tuulisähkön tuotanto on niin suurta, että ydinvoiman tuotantoa joudutaan merkittävästi vähentämään. Tällaisten tilanteiden lisääntyminen johtaa ydinvoimaloiden pienempään kapasiteettikertoimeen, ja sitä kautta suoraan niiden kannattavuuteen, kun vuodessa tuotettu energiamäärä pienenee. Toisaalta erilaisilla sähkömarkkinaratkaisuilla tästä säädettävyydestä voitaisiin maksaa preemiota, jotta sähköenergiajärjestelmä toimisi kokonaisuutena.

Toisin kuin esimerkiksi kaasuvoimalla, ydinvoimalan kustannukset painottuvat rakennusvaiheeseen, ja voimalan käytöstä koituvat muuttuvat kustannukset ovat minimaaliset. Vaikka ydinvoima soveltuisikin siis teknisesti uusiutuvia täydentäväksi teknologiaksi, voi uusiutuvien energialähteiden lisääntyminen verkossa heikentää ydinvoimaloiden kannattavuutta. Toisaalta ilman merkittävää ydinvoimakapasiteettia investointeja on tehtävä joko energian varastointiin tai muuhun säätökapasiteettiin, esimerkiksi kaasuvoimaan. Jos aurinko- ja tuulivoiman hinta pysyy alhaisena sekä markkinoilla on saatavilla kustannustehokas ratkaisu energian varastointiin, on ydinvoimalla todennäköisesti merkittäviä

vaikeuksia säilyä taloudellisesti kannattavana. Tämä eri teknologioiden taloudellinen kehitys on todennäköisesti ratkaisevaa ranskalaisen ydinvoiman tulevaisuuden kannalta.

Kuten luvussa 2 mainittiin, kehitteillä olevat neljännen sukupolven ydinreaktorit eroavat merkittävästi III+-sukupolven reaktoreista. Ranskalainen Framatome aloitti vuonna 2020 yhteistyössä yhdysvaltalaisen General Atomicsin kanssa neljännen sukupolven SMR:n kehitystyön, joka tähtää demonstraatiolaitoksen rakentamiseen ennen vuotta 2030. Reaktorin kaupallistamista puolestaan suunnitellaan 2030-luvun puoliväliin. Reaktoriteknologiaksi on valittu heliumjäähdytteinen nopea modulaarinen reaktori, jonka polttoainete-hokkuus on merkittävästi parempi kuin perinteisillä kevytvesireaktoreilla; reaktorin polttoaine-elementin on suunniteltu toimivan noin 9 vuotta, ennen kuin se täytyy vaihtaa. Reaktori toimii niin sanotulla Brayton-syklillä, joka mahdollistaa korkean, 45 % termisen hyötysuhteen, ja reaktoritehon muutosnopeuden on suunniteltu olevan jopa 20 % minuutissa, eli noin neljä kertaa suurempi kuin eurooppalaiset vaatimukset III+-sukupolven reaktoreille. Reaktorin sähkötehon on suunniteltu olevan vain 50 MW, minkä ansiosta reaktori voitaisiin rakentaa tehtaassa lähes valmiiksi saakka. [46] Tämän uskotaan autta-van uuden ydinvoiman ongelmiin taloudellisen kannattavuuden kanssa.

Vaikka Ranskan johto on sitoutunut pitämään ydinvoiman merkittävässä osassa maan sähköenergiantuotantoa, on silti mahdollista, joskin epätodennäköistä, että maa päättää luopua ydinvoimasta tulevaisuudessa. Jos uudetkaan EPR 2-voimalaprojektit eivät onnistu parantamaan taloudellisessa kannattavuudessa ja yhdistelmä uusiutuvaa sähkön-tuotantoa osoittautuu taloudellisesti kilpailukykyiseksi, voidaan Ranskassa tyytyä jatka-maan vanhojen voimaloiden käyttöikää, ja ajamaan ydinvoimakapasiteetti niiden myötä alas. Äkillisempi ydinvoimasta luopuminen voitaisiin puolestaan nähdä erityisesti tilan-teessa, jossa tapahtuisi uusi Tšernobylin tai Fukushima'n kaltainen ydinonnettomuus. Erityisesti Euroopassa tapahtuva onnettomuus voisi muuttaa ranskalaisten asenteita no-peastikin, ja sitä kautta johtaa reaktoreiden sulkemiseen nopealla aikataululla. Saksan reaktio Fukushima'n onnettomuuteen on tästä hyvä esimerkki, vaikka Saksassa oli-kin tuolloin jo suunnitelma ydinvoimasta luopumiseen. Tämän kaltainen tilanne on kuitenkin epätodennäköinen, kun ottaa huomioon ydinonnettomuuksien suhteellisen vähäisyyden ja sen, että jokaisen onnettomuuden myötä ydinvoimaloiden turvallisuutta on parannettu merkittävästi.

6. YHTEENVETO

Työssä käsiteltiin kahta toisistaan poikkeavaa ydinvoimastrategiaa, jotka edustavat ydinvoimapolitiikan ääripäitä Euroopassa. Saksan päätös luopua ydinvoimasta vuoteen 2022 mennessä samaan aikaan, kun se pyrkii vähentämään hiilidioksidipäästöjä aiheuttaa merkittäviä haasteita maan sähköenergiajärjestelmälle. 2000-luvulla Saksan sähköntuotanto on perustunut fossiiliseen energiaan, ydinvoimaan ja uusiutuvaan energiantuotantoon. Ydinvoiman sulkemisen ja päästötavoitteiden myötä jäljelle jää näistä vain uusiutuva energia, mikä edellyttää huomattavia investointeja energian varastointiin sekä siirtoverkkoihin. Ilman ydinvoimaa päästöjen vähentämisestä tulee haasteellisempaa, mikä näkyy esimerkiksi ennusteissa, joiden mukaan fossiililla polttoaineilla tuotetaan Saksassa sähköä vielä 2050-luvulla [3], katso [24] ja [25]]. Ratkaisuja on todennäköisesti etsittävä myös muualta, ja onkin hyvin mahdollista, että tulevaisuudessa saksalaisen sähkökäyttäjän täytyy joustaa kulutuksestaan, jotta sähköverkon tasapaino säilyy. Toisaalta luopumalla ydinvoimasta vältetään siihen liittyvät ympäristöongelmat, ja parannetaan maan energiaomavaraisuutta.

Vaikka ydinvoiman rooli Ranskassa pieneneekin, on maa silti hyvin vahvasti sitoutunut ydinvoimaan ja sen kehittämiseen. Ranskan energiastrategia onkin hiilidioksidipäästöjen kannalta optimaalinen, sillä merkittävän ydinvoimakapasiteetin myötä fossiiliselle energialle on sähköntuotannossa vähemmän tarvetta. Uusiutuvien energialähteiden ja ydinvoiman integrointia sähköenergiajärjestelmään tukee myös uusien ydinvoimaloiden parempi säädettävyys, joka on samaa luokkaa kuin hiilivoimaloilla [7] [8] [9]. Uuden ranskalaisen ydinvoiman kynnyskysymys on sen kustannustehokkuus, jonka on parannettava merkittävästi Flamanville 3:sta, jotta sen rakentaminen on taloudellisesti kannattavaa. Jos tulevaisuudessa todennäköiset EPR2-voimalat epäonnistuvat kustannusten ja rakennusajan vähentämisessä, on realistinen vaihtoehto Ranskalle vanhojen voimaloiden käyttöiän pidentäminen ja panostaminen neljännen sukupolven voimaloihin. Tällöin ongelmaksi voi muodostua vanhan ydinvoimakapasiteetin soveltuvuus sähköenergiajärjestelmään, jossa nopeasti vaihtelevaa tuotantokapasiteettia on paljon.

Saksa ja Ranska ovat kaksi EU:n suurinta talousaluetta, ja siksi niiden toiminnalla on merkittävä vaikutus muihin EU:n valtioihin [47]. Maiden vastakkaiset suunnat ydinvoimapolitiikassa heijastuvat esimerkiksi keskusteluun EU:n kestävästä rahoituksen taksonomiasta [15]. Ydinvoiman sisällyttäminen EU:n kestävästä rahoituksen taksonomiaan onkin tärkeää niin Ranskan kuin myös muidenkin ydinvoimaa suunnittelevien EU-maiden kannalta. Pääomavaltaisella ydinvoima-alalla rahoituskustannusten vähentäminen parantaisi uusien ydinvoimaloiden taloudellista kannattavuutta, mutta voisi toisaalta mahdollisesti ohjata pääomaa pois uusiutuvan energian sijoituksista.

Euroopan Unionin suurimpina talouksina Saksa ja Ranska ovat merkittävässä suunnan näyttäjän roolissa niin ydinvoima- kuin muunkin energiapolitiikan osalta. Tulevaisuudessa energiapolitiikan onnistumista määrittelee vahvasti onnistuminen päästövähennyksissä, ja tässä vähäpäästöiseen ydinvoimaan luottava Ranska onkin paremmassa asemassa. Toisaalta Saksa on energiapolitiikkansa ansiosta pidemmällä uusiutuvan energian kehityksessä, ja voi hyötyä tästä, jos ratkaisut uusiutuviin energianlähteisiin perustuvan sähköenergiajärjestelmän toimintaan osoittautuvat taloudellisesti ja teknisesti kannattaviksi. Tulevaisuuden tekninen ja taloudellinen kehitys niin uusiutuvan energian, energian varastoinnin ja uuden ydinvoiman osalta määrittävätkin pitkälle sitä, kumpi ydinvoimastrategia osoittautuu kannattavammaksi.

LÄHTEET

- [1] Nuclear Power in the European Union, World Nuclear Association, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 10.2.2021): <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/others/european-union.aspx>
- [2] Nuclear Illustrative Programme, European Commission, 2017.
- [3] T. Unnerstall, The German Energy Transition, Springer, 2017, 156 p.
- [4] Nuclear Power in France, World Nuclear Association, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 10.2.2021): <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/france.aspx>
- [5] Nuclear Power Reactors, World Nuclear Association, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 10.2.2021): <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors.aspx>
- [6] R. Partanen, J. M. Korhonen, Musta hevonen, Kosmos, 2016, 320 s.
- [7] Advanced Nuclear Power Reactors, World Nuclear Association, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 10.2.2021): <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/advanced-nuclear-power-reactors.aspx>
- [8] M. Lykidi, P. Gourdel, How to manage flexible nuclear power plants in a deregulated electricity market from the point of view of social welfare?, Energy (Oxford), 2015, 85: pp. 167-180.
- [9] Innovation landscape brief: Flexibility in conventional power plants, International Renewable Energy Agency, 2019, pp. 18, Saatavissa: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Flexibility_in_CPPs_2019.pdf?la=en&hash=AF60106EA083E492638D8FA9ADF7FD099259F5A1
- [10] Plans For New Reactors Worldwide, World Nuclear Association, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 10.2.2021): <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/plans-for-new-reactors-worldwide.aspx>
- [11] Laitosmalli VVER-1200, Fennovoima, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 10.2.2021): <https://www.fennovoima.fi/hanhikivi-1/tietoa-hanhikivi-1-hankkeesta/laitosmalli-vver-1200>

- [12] First VVER-1200 reactor enters commercial operation, World Nuclear News, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 10.2.2021): <https://www.world-nuclear-news.org/NN-First-VVER-1200-reactor-enters-commercial-operation-02031701.html>
- [13] First EPR enters commercial operation, World Nuclear News, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 10.2.2021): <https://world-nuclear-news.org/Articles/First-EPR-enters-commercial-operation>
- [14] Poland, International Energy Agency, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 16.2.2021): <https://www.iea.org/countries/poland>
- [15] Nuclear faces 'a lot of uncertainty' as EU green evaluation looms, EURACTIV, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 16.2.2021): <https://www.euractiv.com/section/energy-environment/news/nuclear-faces-a-lot-of-uncertainty-as-eu-green-evaluation-looms/>
- [16] Nuclear power, Greenpeace UK, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 16.2.2021): <https://www.greenpeace.org.uk/challenges/nuclear-power/>
- [17] J. Hake, W. Fischer, S. Venghaus, C. Weckenbrock, The German Energiewende – History and status quo, Energy (Oxford), 2015 Dec 01, 92: pp. 532-546.
- [18] Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung, Bundesregierung (Deutschland), 2010, Saatavissa: <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975238/439778/794fd0c40425acd7f46afacbe62600f6/2017-11-14-beschluss-kabinett-umwelt-data.pdf?download=1>
- [19] K. Schneider M.A., B. Burger, Public Net Electricity Generation in Germany 2019: Share from Renewables Exceeds Fossil Fuels, Fraunhofer ISE, 2020. Saatavissa: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/news/2019/Public-net-electricity-generation-in-germany-2019.html>
- [20] Germany, International Atomic Energy Agency, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 11.2.2021): <https://cnpp.iaea.org/countryprofiles/Germany/Germany.htm>
- [21] German power export surplus shrank 46.2% in 2020, Reuters, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 16.3.2021): <https://www.reuters.com/article/germany-electricity-statistics-idUSL8N2JF16X>
- [22] Electricity generation, Bundesnetzagentur, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 10.2.2021): <https://www.smard.de/en/marktdaten>

- [23] Cumulative capacity of biomass power plants in Germany from 1990 to 2019 (in megawatts)*, Statista, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 10.2.2021): <https://www.statista.com/statistics/449300/biomass-plants-cumulative-capacity-germany/>
- [24] Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global, DLR, Fraunhofer IWES, IfnE, 2012, Saatavissa: https://www.dlr.de/dlr/Portaldata/1/Resources/bilder/portal/portal_2012_1/leitstudie2011_bf.pdf
- [25] Stromerzeugung nach Energieträgern 1990–2016, AGEb, 2016, Saatavissa: <https://www.ag-energiebilanzen.de>
- [26] Germany Electricity Data, U.S. Energy Information Administration, Saatavissa (viitattu 10.2.2021): <https://www.eia.gov/international/data/country/DEU/electricity/electricity-generation>
- [27] Nuclear share figures, 2009–2019 , World Nuclear Association, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 1.3.2021): <https://www.world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/nuclear-generation-by-country.aspx#.UkrawYakrOM>
- [28] Macron stresses importance of nuclear energy for France, World Nuclear News, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 1.3.2021): <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Macron-stresses-importance-of-nuclear-energy-for-F>
- [29] S. V. Valentine, B. K. Sovacool, The National Politics of Nuclear Power, Taylor and Francis, 2012, pp. 83-100.
- [30] H.M. Kepplinger, R. Lemke, Instrumentalizing Fukushima: Comparing Media Coverage of Fukushima in Germany, France, the United Kingdom, and Switzerland, Political communication, 2016, pp. 351-373.
- [31] D. Butler, France imagining the unimaginable. Nature, Vol. 481, 2012, pp. 121-122.
- [32] R. Mauger, Forced nuclear energy reactors shutdown in France: the Energy Transition Act's mechanisms, Journal of world energy law & business, 2018, pp. 270-281.
- [33] Macron clarifies French energy plans, World Nuclear News, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 1.3.2021): <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Macron-clarifies-French-energy-plans>

- [34] Annual national production by sector (2012 to 2020), Réseaux Énergies, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 5.3.2021): <https://opendata.reseaux-energies.fr/explore/dataset/prod-national-annuel-filiere/information/>
- [35] France's Efficiency in the Nuclear Fuel Cycle: What Can 'Oui' Learn?, International Atomic Energy Agency, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 6.3.2021): <https://www.iaea.org/newscenter/news/frances-efficiency-in-the-nuclear-fuel-cycle-what-can-oui-learn>
- [36] Le Grand carénage d'EDF : un chantier industriel d'ampleur, Techniques de L'ingénieur, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 6.3.2021), <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/le-grand-carenage-dedf-un-chantier-industriel-dampleur-64913/>
- [37] French nuclear regulator approves review of 10-year lifespan extension for 900 MW fleet, S&P Global, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 6.3.2021): <https://www.spglobal.com/platts/en/market-insights/latest-news/electric-power/022521-french-nuclear-regulator-approves-review-of-10-year-lifespan-extension-for-900-mw-fleet>
- [38] Ydinvoimalaitosyksikkö Olkiluoto 3, TVO, Saatavissa: https://www.tvo.fi/uploads/julkaisut/tiedostot/ydinvoimalaitosyksikko_ol3_fin.pdf
- [39] EDF's Levy confirms Flamanville EPR start-up in 2023, Montel, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 6.3.2021): <https://www.montelnews.com/en/story/edfs-levy-confirms-flamanville-epr-start-up-in-2023/1194318>
- [40] Pre-operational testing completed at Flamanville EPR, World Nuclear News, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 10.3.2021): <https://world-nuclear-news.org/Articles/Pre-operational-testing-completed-at-Flamanville-E>
- [41] More pressure for French EPR, Montel, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 10.3.2021): <https://www.montelnews.com/en/story/more-pressure-for-french-epr/1156576>
- [42] France to decide on new nuclear build after 2022, Nuclear Engineering International, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 10.3.2021): <https://www.neimagazine.com/news/newsfrance-to-decide-on-new-nuclear-build-after-2022-7598148>
- [43] EPR2: An optimized reactor, Bilfinger, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 12.3.2021): <https://www.bilfinger.com/en/press/customer-magazine-bilfinger-now/articles/2020/04/epr2-an-optimized-reactor/>

- [44] French regulator to EDF: don't assume new reactor model is accident-proof, Reuters, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 12.3.2021): <https://www.reuters.com/article/us-edf-nuclearpower-idUSKCN1UD2W0>
- [45] EDF / Company Says It Will Unveil EPR 2 Reactor Technology In 2021, Nucnet, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 12.3.2021): <https://www.nucnet.org/news/company-says-it-will-unveil-epr-2-reactor-technology-in-2021-10-5-2020>
- [46] Framatome and GA team up on fast modular reactor, World Nuclear News, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 14.3.2021): <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Framatome-and-GA-team-up-on-fast-modular-reactor>
- [47] GDP (current US\$), The World Bank, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 18.3.2021): <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD>