

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Majandusteaduskond

Jekaterina Murašina

TUUMAENERGIAJAAMA TASUVUSANALÜÜS EESTI NÄITEL

Bakalaureusetöö

Õppekava Ärindus, peeriala Ärirahandus

Juhendaja: Tõnn Talpsepp

Tallinn 2023

Deklareerin, et olen koostanud lõputöö iseseisvalt ja olen viidanud kõikidele selle koostamisel kasutatud teiste autorite töödele, olulistele seisukohtadele ja andmetele, ning ei ole esitanud sama tööd varasemalt ainepunktide saamiseks.

Töö pikkuseks 6157 sõna sissejuhatusest kuni kokkuvõtte lõpuni.

Jekaterina Murašina 11.05.2023

SISUKORD

SISUKORD	3
LÜHIKOKKUVÕTE	4
SISSEJUHATUS	5
1. TUUMAENERGIAJAAMA TASUVUSANALÜÜSI ASPEKTID	7
1.1 Energiasektor maailmas ja Eestis	7
1.2 Tuumaenergiajaama töö põhimõtted	8
1.3 Kütuse kättesaadavus.....	8
1.4 Kapitalikulu	9
1.5 Tegevuskulu	10
1.6 Tuumajäätmed	11
1.7 Kasvuhoooneefekt	13
1.8 Tuumareaktorid	14
1.8.1 BWRX-300 tuumareaktor	14
2. METOODIKA	15
2.1 CBA analüüs.....	15
2.2 Nüüdispuhasväärtuse leidmine	17
2.3 Tasandatud elektrikulu	18
3. TULEMUSED	19
3.1 Tuumaenergiajaama projekti kirjeldus	20
3.2 Mõjude identifitseerimine	20
3.2.1 Kulude identifitseerimine	21
3.2.2 Tulude identifitseerimine.....	22
3.5 Mõju rahalise ekvivalendi leidmine	23
3.5.1 Kulude rahalise ekvivalendi leidmine	23
3.5.2 Tulude rahalise ekvivalendi leidmine.....	25
3.6 Projekti nüüdispuhasväärtus	27
3.7 LCEO arvutus ja kokkuhoid aastas	27
3.8 Järeldused ja ettepanekud	28
KOKKUVÕTE	30
SUMMARY	32
KASUTATUD ALLIKAD	34
LISAD	39
Lisa 1. Kulude ja tulude kokkuvõtlik ülevaade	39
Lisa 4. Lihtlitsents	39

LÜHIKOKKUVÕTE

Energia tootmine on muutunud suureks väljakutseks paljudele riikidele. Tarbimine kasvab igal aastal. Maailm on keset energiakriisi ning valitusus on sunnitud otsima uusi lahendusi energia probleemi lahenduseks. Samuti on oluline ka energiallika jätkusuutlikkus. Eesti on seadnud eesmärgi 2030. aastaka toota 50% elektrienergiast taastuvatest energiallikatest. Tuumaenergia on tuntud kui madala emissiooni allikas, mille tõttu saab olla heaks alternatiiviks põlevkivitööstusele, mis on hetkel peamine energiaallikas Eesti Riigis.

Antud tööesmärk on teha tasuvusanalüüs esimesele tuumaenergiajaamale Eestis. Töö esimeses osas on uuritud tuumaenergeetika peamiseid aspekte ja tuumaenergiajaama projekti realiseerumise olulisi faktoreid. Teoreetiline uuring on tehtud erinevate uuringute, artiklide ja Fermi Energia OÜ analüüsi põhjal.

Tasuvusanalüüsi meetodiks on valitud CBA analüüs. CBA tasuvusanalüüs annab ülevaatliku pildi projektist ja arvestab nii majanudus, sotsiaal- kui ka keskkonnamõjudega. Tasuvusanalüüsi läbiviimiseks on identifitseeritud projekti kulud ja tulud. Hiljem kuludele ja tuludele on leitud rahaline ekvivalent.

Tasuvusanalüüsi järgmises osas on leitud projekti nüüdispuhasväärtus erinevatel stsenaariumitel. Nüüdispuhasväärtuse leidmiseks on kasutatud Metoodika osas toodud valem. Nüüdispuhasväärtus kõikidel stsenaariumitel on tulnud positiivne, mis näitab, et tegemist on atraktiivse projektiga.

Viimases osas on leitud tasandatud elektrikulu, mis on tähtis näitaja elektrienergia projektride puhul. Elektri tasandatud kulu on arvatud samuti erinevate stsenaariumite järgi.

Analüüs peegeldab ainult tänapäeva olukorda. Tulemused võivad oluliselt muutuda erinevate muutuse tagajärjel.

SISSEJUHATUS

Tänapäeval on energiatootmine muutunud suureks väljakutseks paljude riikidele. Prognoositakse, et 2040. aastaks suureneb energia tarbimine maailmas 45% ja mitte-OECD riikides 60% võrra (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019). Ebastabiilseks on muutunud ka energia hind. Eestis on praegu peamine energiatootmisallikas põlevkivi, mille tootmine tulevikus ei vasta Euroopa Liidu tuleviku eesmärkidele. Euroopa Liidu peamine eesmärk on vähendada heitgaaside kogust 2030. aastaks 85–90% võrra (European Commission, 2020). Arvestades ülaltoodud asjaolusid, Eestis hakati arutlema tuumaenergia jaama rajamise üle.

Tuumaenergia on tuntud kui suhteliselt madala süsinikuheitega energiaallikas, kuid ka tuumaenergiajaamal on omad miinused ja riskid. Need riskid on peamiselt seotud tuumaenergiajaamade õnnetustega ja tuumajäätmete likvideerimisega. Energia küsimust analüüsid pööratakse tähelepanu mitte ainult majanduslikele näitajatele, vaid ka keskkonnamõjule. Maailma tasemel hinnatakse puhta energia tähtsust jätkusuutliku arengu raames. (Azam. A *et al.*, 2021).

Lõputöö uurimiseesmärk on viia Eesti esimese tuumaenergiajaama tasuvusanalüüs. Eesmärgi saavutamiseks on valitud CBA (*cost-benefit analysis*) tasuvusanalüüsi meetod. Esimesel etapil on identifitseeritud tuumaenergiajaama projekti olulisemad aspektid, millele tasub tähelepanu pöörata, ja toodud välja võimalikud tagajärjed. Mõju identifitseerimiseks on läbi töötatud varasemad uuringud, teiste riikide tuumaenergiajaama CBA tasuvusanalüüsid ja CBA analüüsi juhendid. Olulisematele mõjudele on leitud rahaline ekvivalent. Projekti võrdlemiseks on leitud projekti nüüdispuhasväärtus (NPV). Elektritootmisviisi võrdlemiseks teistega on leitud elektrienergia tasandatud kulu (LCEO) ja arvatud kokkuvõtte saadud LCEO kasutamisel. Tasandatud elektrikulu arvutus ei ole võetud kogu projekti NPV arvutamisse, kuna elektrihinna turg on ebastabiilne ja reaalselt kokkuvõtte prognoosida pole võimalik.

Projekti objektiivsemaks analüüsiks on kulu, tulu ja NPV arvatud kolme erineva stsenaariumi järgi. Autor soovib anda lugejale objektiivse vaate, mis aitaks näha tuumaenergiajaama rajamise plusse ja miinuseid. See analüüs võimaldab arvestada nii majandus-, sotsiaal- kui ka keskkonnanäitajatega ning annab ülevaate Eesti tuumaenergiajaama projektist ja annab võimaluse kaaluda tuumaenergiajaama rajamist kui potentsiaalselt kasulikku projekti nii Eesti majandusele kui ka ühiskonnale.

Töös on kasutatud varasemaid uuringuid ning tasuvusanalüüs on tehtud EL juhendi järgi ja varasemate CBA projektide analüüsi põhjal. Samuti on kasutatud Peter Kennedy (2007) ja Anthony Boardman (2018) CBA juhiseid ning Fermi Energia OÜ eeltasuvusanalüüsi tulemusi ja soovitusi.

1.TUUMAENERGIAJAAMA TASUVUSANALÜÜSI ASPEKTID

Selles peatükis tutvustatakse peamisi tuumaenergiajaama projekti aspekte, millega tuleb arvestada tasuvusanalüüsi tegemisel. Peatüki alguses kirjeldatakse praegust olukorda maailma ja Eesti energiasektoris, mis võimaldab aru saada tuumaenergiajaama projekti analüüsi vajadust. Seejärel on kirjeldatud tuumaenergiajaama tööpõhimõtted ja projekti olulised faktorid.

1.1 Energiasektor maailmas ja Eestis

Maailm on praegu keset ülemaailmset energiakriisi. Kõrged ja kõikuvad energiahinnad kahjustavad kodumajapidamisi ja ettevõtteid, muutes kütuste valikut ja pidurdades edusamme energiale universaalse juurdepääsu saavutamisel. Energiakriisi üheks põhjuseks on märkimisväärne globaalse naftavarustuse häire. Ülemaailmne naftaturg on haavatav naftat tootvate riikide poliitilise ja majandusliku ebastabiilsuse ning tarneahela häirete tõttu. (International Energy Agency, 2022) Samal ajal kasvab iga aastaga üle maailma tarbitava energia kogus. Energiantarbitamist mõjutavad paljud sotsiaalsed ja majanduslikud tegurid. Eriti vähemarenenud riikides võib oodatav rahvastiku ja SKP kasv kaasa tuua olulise energiatarbitamise kasvu. (Santamouris, 2019)

Eesti energeetikas domineerib põlevkivi, fossiilkütus, mida leidub riigi idaosas. Põlevkivi moodustab ligikaudu 72% Eesti energia kogutoodangust ja 76% elektritootmisest. Põlevkivi peetakse kõrge CO₂-emissiooni allikaks, mis ei lähe kokku Eesti energiatootmise eesmärkidega. Ülejäänud osa energiatoodangust tuleb nafta, maagaasi ja taastuvate energiaallikate – tuule, päikese ja biomassi – impordist. (Majandus-ja kommunikatsiooni ministeerium, 2021) Eesti riik on viimastel aastatel teinud jõupingutusi oma energiavaliku mitmekesistamiseks ja taastuvate energiaallikate kasutamise suurendamiseks. Riik on seadnud eesmärgiks toota 2030. aastaks 50% elektrist taastuvatest allikatest. Tuuleenergia on Eesti suurim taastuenergia allikas, rannikul asub mitu suurt tuuleparki. Kiiresti kasvab ka päikeseenergia kasutamine, välja töötamisel on mitu uut projekti. (Majandus-ja kommunikatsiooni ministeerium, 2021).

Kokkuvõttes seisab Eesti energiasektor silmitsi probleemidega, mis on seotud suure sõltuvusega põlevkivist, kuid riik astub samme taastuvate energiaallikate kasutamise suurendamiseks ja energiapuuduse parandamiseks regionaalse koostöö kaudu.

Eesti ostab osa elektrienergiast Nordpooli elektribörsilt, mille hinnad on olnud viimastel aastatel olnud väga ebastabiilsed. Nord Pool on Euroopa suurim elektribörs, mis tegutseb 10 riigis: Eestis, Norras, Rootsis, Taanis, Soomes, Saksamaal, Hollandis, Belgias, Prantsusmaal, Austrias ja Ühendkuningriigis. See pakub turgu elektriga kauplemiseks, finantslepingute ja taastuvenergia päritolutagatiste (GO) jaoks. Nordpooli energiahind oli 2020. aasta novembris oli 40,99 eurot MWh, 2022. aasta novembris aga juba 218,99 eurot MWh.

1.2 Tuumaenergiajaama töö põhimõtted

Tuumaenergia on energia, mis vabaneb tuumareaktsiooni, näiteks aatomituumade ühinemise või lõhustumise, käigus. Tuuma lõhustumisel jaguneb aatomi tuum kaheks väiksemaks tuumaks, mille käigus vabaneb suur hulk energiat. Seda energiat kasutatakse tavaliselt vee soojendamiseks ja auru tootmiseks, mis seejärel paneb tööle turbiinid elektri tootmiseks. Tuumaelektrijaamad kasutavad suures mahus elektri tootmiseks tuuma lõhustumist. Need tehased kasutavad kütusena radioaktiivseid materjale, tavaliselt uraani või plutooniumit. Kütus laaditakse varrastesse, mis asetatakse reaktori südamikku. Kui reaktor aktiveeritakse, tekib tuumareaktsiooni käigus soojus, mida kasutatakse auru ja elektri tootmiseks. (Hewitt, G. F., & Collier, J. G., 2000)

Tuumaenergia üks eeliseid on see, et selle abil saab toota suures koguses elektrit ilma kasvuhoonegaase eraldamata, mis aitab kaasa kliimamuutuste pidurdamisele. Kuid tuumaenergiaga kaasnevad ka märkimisväärsed riskid, näiteks tuumaõnnetuste võimalus ja radioaktiivsete jäätmete pikaajaline ladustamine. Vaatamata riskidele kasutatakse tuumaenergiat siiski paljudes maailma riikides ning teadlased jätkavad tööd uue tehnoloogia väljatöötamise ja ohutusmeetmete täiustamisega, et muuta tuumaenergia turvalisemaks ja jätkusuutlikumaks energiaallikaks. (Karakosta, C., *et al* 2013)

1.3 Kütuse kättesaadavus

Tuumaenergiajaama peamiseks kütuse komponendiks on uraan, mille lõhustamise (töötlemise) käigus tekibki vajalik energia. Reaktorites tavaliselt kasutatakse uraani tahke oksiidi kujul (UO₂). Oluline aspekt, millele tuleb tähelepanu pöörata, on uraani kui tuumaenergiajaama kütuse kättesaadavus ja selle üldine varu maailmas. Teadlaste väitel on et uraanivarude maailmas küllaltki suur ning seda jätkub paljudele põlvkondadele. Majanduskoostöö ja Arengu Organisatsiooni (OECD) ja Tuumaenergia Agentuuri (NEA) andmetel asuvad peamised uraanikaevandused märkimisväärsel kaugusel Eestist: Austraalias (28%), Kasahstanis (15%), Kanadas (9%) ja

Nigeris. Kuigi suurim uraaniekspordi potentsiaal on Austraalias, on praegu suurim uraani eksportija Kasahstan (41% kogu ekspordist).

Soomes, mis on lähim Eesti naaber, on viis tegutsevat tuumareaktorit. Soome on ostnud uraani Kanadast, Austraaliast ja Aafrikast, lasknud selle Kanadas ja Prantsusmaal uraanheksafluoridiiks (UF₆) muuta ning Venemaal rikastada. Kütust on toodetud Saksamaal, Rootsis ja Hispaanias. Fortumi eelkäijafirma IVOI sõlmis lepingu kogu Loviisa tehase kütuse tarnimiseks Venemaalt. Hiljuti kinnitati Soome uraanikaevanduste riiklik projekt. 2024. aastaks plaanitakse avada Sotkamu uraanikaevandus, mis täies mahus hakkab tööle 2026. aastaks (Kojo ja Litmanen, 2009) See oleks väga kasulik Eestile, sest Soome on ajalooliselt olnud Eesti poliitiline sõber. Ent kui võta arvesse seda, et uraanikaevanduse loomise projekt võeti vastu juba 2012. aastal ehk selle realiseerumise pikk periood ning mitmesugused majanduslikud ja poliitilised muutused, mis on toimunud projekti loomise ajal, võib arvata, et kaevandust siiski ei avata 2024. aastaks ning Soomet kui potentsiaalset uraani eksportijat ei saa pidada väga kindlaks.

Uraani kaevandamine Eestis on väga ebatõenäoline. Eestis maapõues on küllaltki suur uraani kogus, kuid selle kaevandamine ei ole perspektiivne paljudel poliitilistel, majanduslikel ja geograafilistel põhjustel. (E. Lippmaa, E. Maremäe, 2003)

1.4 Kapitalikulu

Kapitalikulu on tuumaenergiajaama projekti puhul arvatavasti üks suurimaid kulusid. Alginvesteering on tavaliselt väga suur ja nõuab aega, et investeeritud raha tagasi teenida. Fermi Energia OÜ koos Tartu Ülikooli teadlastega on arvanud, et alginvesteering koos ettevalmistustööde ja võrguehitusega on kokku 1 miljard USA dollarit, mis on väikese riigi jaoks küllaltki suur investeering. (Hans Hõrak *et al.* 2020) 1 miljardise alginvesteeringu peab õigeks ka tuumareaktori tootja Hitachi Energy.

Väljastada ei saa ka alginvesteeringu mahu suurenemist. Kui vaadata USA ajalugu, siis tuumaenergiajaama rajamise investeering on ületatud algset investeeringut 200–400% võrra.) Soome Olkiluoto 3 planeeritud alginvesteering oli 3,2 miljardit eurot, mis nüüdseks on kasvanud 9 miljardi euronni ehk kolmekordseks. Olkiluoto 3 pole veel kasutuses, kuid ühendati võrguga 2022. aastal. (Jonathan Sträng, Ted Fjällström, 2011)

Kapitalikulu saab jagada järgmisteks kululiikideks (Jonathan Sträng, Ted Fjällström, 2011):

- inseneritöö;
- hanked;
- ehitus.

Ehitusmaksumus on tuumaelektrijaamade puhul palju suurem kui gaasi- ja söejaamade puhul. Suur kulu on peamiselt tingitud erimaterjalidest. Tuumaenergiajaama ehitus on kulukas ning nõuab tihti lisainvesteeringuid ja -aega. Jällegi on heaks näiteks Soome Olkiluoto 3, mille avamine oli planeeritud aastaks 2010, ent mis pole siiani töös ega teeni tagasi algseid investeeringuid. Sellised suured projektid nõuavad riigilt mitte ainult suurt alginvesteeringut, vaid ka vajadust projekti eelarvet suurendada.

1.5 Tegevuskulu

Analüüsi tegemisel tuleb arvestada ka tegevuskuluga, mis on tuumaenergiajaama ehitamisel, käivitamisel ja töötamisel vältimatud. Tegevuskulu on peamiselt seotud kütuse, tarne, halduse ja töötajatega. Üks suurematest kuludest on tööjõukulu. Tuumaenergiajaama opereerimiseks on vaja nii administratsiooni töötajaid, tippspetsialiste kui ka lihttöötajaid. Näiteks Soome 1600 MWh võimsusega tuumaenergiajaama, mis on Eestisse planeeritavast viis korda võimsam, käigus hoidmiseks on vaja 600 töötajat. (World Nuclear Assosiation, 2023) Tuleb arvestada ka tippspetsialistide raske kättesaadavusega ja kõrge tasustamisega. Fermi Energia OÜ (2020) teatab seda, et hetkel Eestis pole vastavaid spetsialiste. Tööjõu saab palgata välismaalt või organiseera väljaõpet koha peal. Samuti on vaja spetsialiste, kes oskavad tuumaenergiajaama projekteerida ja ehitada. Fermi energia OÜ andmetel on tuumaenergiajaama töös hoidmiseks vaja keskmiselt 170 inimest ja ehitamisel on vaja umbes 400 spetsialisti kolme aasta jooksul. (Hans Hõrak et.al, 2020)

Kuigi tööjõu värbamine on keeruline, on tuumaenergiajaama üldised tegevuskulud väiksemad kui muude energiaallikate kulu. Kütuse hind on märkimisväärselt madalam kui alternatiivallikate (gaas, põlevkivi ja süsi) oma. Kütuse hinna osakaal moodustab ainult 26% kogu tegevuskulust. Alternatiivallikate puhul on see 80–90%. (Rozylow M. 2013)

1.6 Tuumajäätmed

Tuumaenergiat peetakse madala süsihappegaasi (CO₂) emissiooniga energiaallikaks, mistõttu on tuumaenergia atraktiivsem kui alternatiivallikad. Tuumaenergiajaama keskkonnamõju arvutamisel pööratakse aga tähelepanu just jäätmete utiliseerimisele ja ladustamisele. Tuumaenergia tootmine on üks väheseid energiatootmisvaldkonna tehnoloogiaid, mis tegelikult võtavad täieliku vastutuse kõigi oma jäätmete eest, kaasates selle jäätmete hulga toote maksumusse. Eesmärk on kaitsta inimesi ja keskkonda radioaktiivsete jäätmete eest, vähendades loodusesse tagasi eralduva kiirguse kiirust või kontsentratsiooni. Sellegipoolest on radioaktiivsed jäätmed üks keerulisemaid jäätmetüüpe, mida ühiskond haldab. Maailmas on leiutatud mitu viisi, kuidas tuumaenergiajaamas tekkinud jäätmeid käidelda. Jäätmete radioaktiivsus aja jooksul väheneb, seega ladustamine on etapp, millele järgneb jäätmete täielik utiliseerimine ehk kõrvaldamine. See periood sõltub jäätmete radioaktiivsuse tasemest. Jäätmed, mis kvalifitseeritakse madala radioaktiivsusega jäätmeteks ja mille osakaal on umbes 90% kõigist jäätmetest, kuuluvad utiliseerimisele. Keskmise ja kõrge radioaktiivsusega jäätmed kõigepealt ladustatakse, et võimaldada radioaktiivsete ainete lagunemist. (World nuclear Association, 2022)

Tänapäeval on olemas mitu ladustamise viisi. Enim eelistatud lahendus on geoloogiline süvaladustamine (utiliseerimine) (*deep borehole disposal*, DBD). Rahvusvaheline Aatomienergiaagentuur (International Agency of Energy Atom, IAEA) hindas 2020. aastal Eesti geograafilist asukohta ja geoloogilist ehitus ning tõi järeldusena välja, et Eestis on kõige sobilikum ladustamisviis süvapuuraug-lõppladustus. Süvapuuraugude kontseptsioon on välja töötatud (kuid mitte rakendatud) mitmes riigis, sealhulgas Taanis, Rootsis, Šveitsis ja USA-s. Mitterealiseerimise põhjus on olnud see, et seda tüüpi ladustamine sobib pigem väikese jäätmekoguse korral.

Kontseptsioon seisneb puurauku puurimises kuni umbes 5000 meetri sügavusse aluskivimisse, kasutatud tuumkütuse või töötlemisel tekkinud klaasistunud radioaktiivseid jäätmeid sisaldavate jäätmekanistrite paigutamises puurkaevu alumisse 2000 meetrisse ning ülemise 3000 meetri tihendamises materjalidega nagu bentoniit, asfalt või betoon. Nagu Brady *et al.* (2017) väidavad, et sügavatesse puuraukudesse ladestamine võib olla efektiivsem ja turvakisem kui geoloogiline ladustamine. Peale selle on 5 km sügavusel vee liikumine äärmiselt väike ja vee kaudu radionukliidide pinnale migreerumise oht on tühine ajavahemike jooksul, mis ületavad miljonit aastat. (Chapman and Gibb 2003; Beswick, Gibb, and Travis 2014). DBD-le keskendunud lahendus alandab avalikku kulu ja otsustuskünniseid, lokaliseerib jäätmete kõrvaldamist,

vähendades transporti, ja lühendab ajavahemikku otsuse tegemisest rakendamiseni. Vaatamata plussidele, ei ole radioaktiivsete jäätmete hooldusbüroo (Radioactive Waste Management Committee, RWM) seda meetodit oma ametlikus eeskirjas arvesse võtnud arvesse praktiliste näidete puudumise tõttu.

Ameerika teadlaste poolt (Ernest Hardin, *et. al* 2015) on tehtud uuringu, mis analüüsis kulu ja riske 400 paki tuumajäätmete paigutamisel süvapuuraku. Ohuanalüüsi (*hazard analysis*) teostamisel võeti eelduseks, et on olemas neli ebasoovitavat olukorda, mis võivad esineda jäätmete paigutamisel süvapuuraku:

- paki või pakkide jada kukutamine pinnalt puuraku;
- ühe puurtoru või puurtorude jada paigutamine pakkide jada kukutamiseks puuraku;
- torujuhtme või puurtoru kukutamine juba paigaldatud jäätmepakendite peale;
- ühe või mitme pakendi kinnijäämine kõrvaldamistsooni kohal.

Tabel 1. Tavaliste ja ebatavaliste tulemustega seotud hinnangulised kestused ja kulud

Juhtum	Radioloogiline vabanemine	Päevad	Kulu (mln)
A1	Jah	965	346
A2	Jah	1330	328
A3	Jah	1005	350
B1	Jah	945	325
B2	Jah	1330	337
C1	Ei	409	43
C2	Ei	407	44
D	Ei	323	42
E1	Ei	600	74
E2	Ei	965	120
E3	Ei	640	78
E4	Ei	600	54
F (normaalne)	Ei	430	42

Allikas: Hardin. E *et.al* (2015)

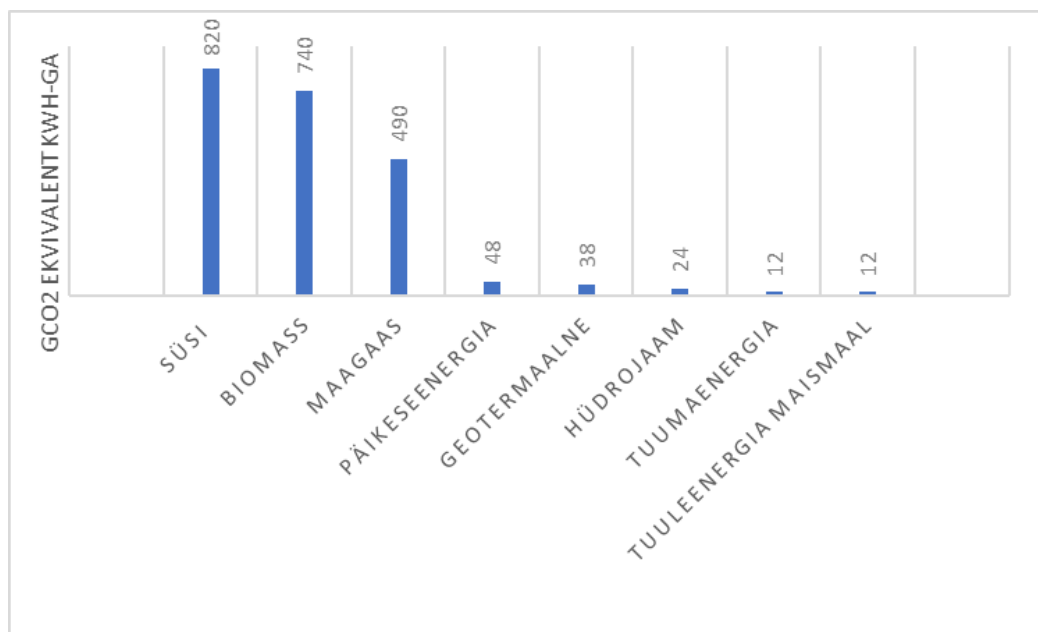
Uuringu tulemused on esitatud tabelis 1. Tabelist näeme, et 13 võimalikust olukorrast viie korral toimub radioaktiivse kiirguse vabanemine, kui juhtub 1 neljast ebatavalisest olukorrast või mitu ebatavalist olukorda kokku. Olukorral F, mis on määratletud kui tavaolukord (ilma ebasoovitavate situatsioonideta) on näha, et hind varieerub sõltuvalt kasutatud tehnoloogiast. Eriolukordade tekkimisel võib jäätmete paigutamise hind tõenäoliselt ulatuda 350 miljoni dollarini ja paigutamise aeg pikeneda 1330 päevani.

Samuti võib kaaluda varianti luua ühine rahvusvaheline hoidla Balti riikide jaoks, mis pakuks väikestele riikidele võimalust kulu optimeerida. Selline võimalus oleks teostatav vaid juhul, kui ka teised Balti riigid hakkavad kaaluma tuumaenergia kasutusele võtmist.

1.7 Kasvuhooneefekt

Alates 1880. aastast on globaalne keskmine temperatuur tõusnud umbes 1 Celsiuse kraadi võrra. (Rebecca Lindsey & Luann Dahlman, 2023). See suurendab ülemaailmse kliimamuutuste ohtu. Peamise gaasid, mis põhjustavad kasvuhoone efekti, on süsihappegaas (CO₂), metaan (CH₄) ja lämmastikoksiid (N₂O). Tavaliselt tekivad gaasid fossiilkütuse põletamise tagajärjel. Tuumaenergia on tuntud kui madala süsihappegaasi emissiooni allikas. Kui võta arvesse tuumaenergia tootmise kogu elutsükkel, siis CO₂ emissioon siiski toimub, nimelt uraani kaevandamisel ja rikastamisel, energiajaama rajamisel ja töös hoidmisel – toimub kaudne CO₂ emiteerimine. Sellegipoolest, kui võrrelda emissiooni suurust alternatiivsete, nii taastuv- kui ka mittetaastuvate energiaallikatega, on tuumaenergia kõige CO₂-neutraalsem energiatootmisviis.

CO₂ emissiooni suurus sõltub kasutatud tehnoloogiast ja tuumareaktorist. Joonis 2 kirjeldab, kuidas erinevad energiatootmisviisid erinevad üksteisest emiteeritud CO₂ poolest.



Joonis 2. CO₂ emissioon erinevate energiatootmisviiside korral.

Allikas: Autori koostatud Ingtergovernmental panel of climate change (2022) põhjal

1.8 Tuumareaktorid

Aja jooksul, mil tuumaenergia tootmine on alates 1950. aastatest arenenud, on reaktoriplokkide võimsus kasvanud 60 MWh-lt enam kuni 1600 MWh-ni, millega kaasneb vastav mastaabisääst. Eesti naaberriikides Soomes ja Rootsis on paigaldatud küllaltki suured reaktorid, mille võimsus ulatub kuni 1600 MWh. Soomes tuleb 30% elektrist tuumaenergiajaamast ja seda osakaalu soovitakse suurendada. Praegu ehitatakse Olkulouto 3 tuumajaama võimsusega 1600 MWh. Need reaktorid on keevaveereaktorid (*boiling water reactors*, BWR), milles kasutatud tehnoloogia on osutunud töökindlaks eelmiste põlvkondade reaktorites ja mille uuemad lahendused on litsentsinud USA tuumaohutusamet (Nuclear Regulatory Commission, 2021).

1.8.1 BWRX-300 tuumareaktor

Fermi Energia OÜ eeltasuvusanalüüsis on välja toodud, et BWRX-300 on kõige sobilikum variant Eesti jaoks. Reaktor BWRX-300 on võimsusega 300 MWh. See on X ehk kümnenda põlvkonna reaktor, mis on väidetavalt teistest odavam ja turvalisem. Selle eluiga prognoositakse kuni 60 aastat ja ehitusperiood on 26 kuud. Energia tootmishind on 50–60 eurot MWh. Esimene reaktori testimine praktikas hakkab toimuma Kanadas. Energiaettevõtte Ontario Power Generation alustab 2024. aastal esimese omataolise reaktori ehitamist ja see jõuab kommertskasutusse aastatel 2027–2028. Selle ehituse käigus on võimalik protsessi jälgida ja hinnata ning teha ettevalmistusi ehituseks Eestis. See reaktor on võrreldes Soome reaktoriga palju väiksema võimusega, mis lubab eeldada ka palju väiksemat kapitali- ja hoolduskulu. Tootja väidab sedagi, et järgmiste reaktorite paigaldamine on odavamad kui esimese reaktori paigaldus.

Energy Information Administrationi (EIA, 2022) andmetel tarbib keskmine Ameerika kodu aastas keskmiselt 10 632 kilovatt-tundi (kWh) energiat. Eesti andmed elektritarbimise kohta pole saadaval. Reaktor BWRX-300 toodab 300 MWh. Kui eeldada, et tuumaenergiajaam hakkab töötama täisvõimsusel, siis $300 \text{ MWh} \times 365 \text{ päeva} \times 24 \text{ h} = 2\,628\,000 \text{ MWh}$ aastas. See tähendab, et üks tuumaenergiajaam saab tagada elektrienergiaga aastas 247 178 maja.

2. METOODIKA

Lõputöö eesmärgi saavutamiseks valis autor tasuvusanalüüsi (CBA) läbiviimise meetoodika, et arvutada tulevase investeerimisprojekti tasuvust ja teostavust. Boardman *et al.* (2018) defineerib CBA kui „hindamismeetodi, mis kvantifitseerib rahalises mõttes poliitika kõigi tagajärgede väärtuse kõigile ühiskonnaliikmetele“. On olemas kaks tüüpi CBA-d – *ex ante* (enne sündmust) ja *post ante* (pärast sündmust). Esimest kasutatakse, kui soovitakse analüüsida tulevast potentsiaalset projekti, ja seda kasutatakse ka siinses töös (Boardman, 2018). Tulevaseks potentsiaalseks projektiks on esimese tuumaenergiajaama rajamine Eestis. See hõlmab projekti eeldatava kulu ja eeldatavate tulu võrdlemist, et teha kindlaks, kas projekt on tõenäoliselt kasumlik või mitte. Projekti tasub vastu võtta, kui selle elluviimise puhaskasum ületab kulu. Tasuvusanalüüsi käigus arvestatakse ka sotsiaal- ja keskkonnamõjuga. See annab parema ülevaate tulevases projektist ja selle mõjust. Sellist meetodid kasutatakse tihti just avaliku sektori projektide hindamisel, sest analüüsi käigus võrreldakse ka sotsiaalset hüve ja kulu, mis kaasneb projekti elluviimisega, mis näitab, kas ressursse kasutatakse tõhusalt või mitte. Tuumaenergiajaama rajamise analüüsimisel on võetud eelduseks, et Eestisse rajatakse väike moodulreaktor (VMR), mis on kuni 300 MWe tootmisvõimsusega tuumareaktor. Tasuvusanalüüsi läbiviimiseks on kasutatud Athony E. Boardman *et.al* (2018) pakutud juhiseid, Euroopa Komisjoni juhendit (Guide to ...2014) ja P. Kennedy CBA (2007) analüüsi.

2.1 CBA analüüs

Toetudes Euroopa Komisjoni loodud materjalile, koosneb tasuvusanalüüs koosneb järgmistest sammudest:

- 1) konteksti kirjeldamine;
- 2) eesmärkide defineerimine;
- 3) projekti identifitseerimine;
- 4) tehniline teostatavus ja keskkondlik jätkusuutlikkus;
- 5) finantsanalüüs;
- 6) majanduslik analüüs;
- 7) riskihindamine;
- 8) tulemused.

Anthony E. Boardman *et al.* (2018) soovitatud CBA koosneb järgmistest sammudest:

- 1) selgitage tasuvusanalüüsi eesmärki;
- 2) täpsustage alternatiivsete projektide kogum;
- 3) otsustage, kelle kasu ja kulu arvesse lähevad (täpsustage seisukoht);
- 4) tuvastage mõjukategooriad;
- 5) prognoosige kvantitatiivne mõju projekti eluea jooksul;
- 6) monetiseerige mõju;
- 7) allahindlushüved ja -kulu nüüdisväärtuste saamiseks;
- 8) arvutage iga alternatiivi nüüdispuhasväärtus;
- 9) tehke sensitiivsusanalüüs;
- 10) sõnastage soovitus.

Metoodika valimisel autor otsustas kohandada eeltoodud juhendeid selle töö jaoks – mõned sammud ühendada ja mõned välja jätta.

CBA sooritamiseks on vaja määratleda selge eesmärk ja analüüsi teostamise vajadus. Selleks tehti põhjalik taustauuring, mis annaks laiemat ülevaadet tuumaenergiasektorist ja Eesti energiasektorist. Eesmärgi määramise järel on vajalik määrata projekti alternatiivi. Selle projekti alternatiiviks võib olla põlevkivitööstusest saadud elektrienergia, kuid kuna põlevkivi litsents kaevanduse lõpetatakse 2030.aastal, siis kokkuhoid tuumaenergiajaama kasutusele võtmisest on arvatud energiabörsi hinna järgi.

Seejärel on vaja määrata kõik projekti mõjud, nii majanduslik kui ka sotsiaalne ja keskkonnamõju, mis on projekti puhul olulised. Antud juhul võrreldi Eesti esimese tuumaenergia jaama rajamise mõju. Mõjud olid kirjeldatud teooria peatükis. Olulistematele mõjudele arvutatakse rahaline ekvivalent. Nii saab mõjusid võrrelda ja arvutada projekti nüüdispuhasväärtuse. Projekti analüüsimiseks kasutati varasemaid uuringuid, tasuvusanalüüsi juhendeid ning muid teadusartikleid ja raamatuid, samuti statistikaameti andmeid, rahvusvahelise tuumaenergiaorganisatsiooni IEAE uuringuid ja Fermi Energia OÜ avalikustatud eeltasuvusanalüüsi.

2.2 Nüüdispuhasväärtuse leidmine

Nüüdispuhasväärtus (NPV) defineeritakse kui projekti puhasväärtus. NPV arvutamisel kasutati Euroopa komisjoni diskontomäära avalikele projektidele. NPV väärtus arvutati, lahutades rahavoogude nüüdisväärtuse summast esialgne rahaline väljaminek ehk alginvesteeringu summa.

Valem NPV arvutamiseks on (EVS 875-9, 2018):

$$NPV = \frac{CF_1}{(1+i)^1} + \frac{CF_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{CF_n}{(1+i)^n} + \frac{CF_{l\acute{o}petav}}{(1+i)^m} - IO$$

kus

$CF_1 \dots CF_n$ – rahavood aastas,

$CF_{l\acute{o}petav}$ – rahavoog prognoosiperioodi lõpus,

i – diskontomäär, s.t nõutav tulunorm või kapitali hind,

IO – esialgne kulu.

NPV väärtus näitab projekti tulevast atraktiivsust. Kui $NPV > 0$, võetakse projekt vastu. Muudel juhtudel lükatakse projekt tagasi.

Diskontomääraks baasstsenaariumil on võetud kapitali keskmine hind (WACC). P. Kennedy (2007) soovitusel on võetud vahemikus 5–10%. WACC on määr, millega vabasid rahavoogusid tuleb diskonteerida, et saada sama tulemus, mis on hinnatud aktsia rahavoogude alusel, mis on diskonteeritud nõutava omakapitali tootlusega (P. Fernandez, 2010)

Sotsiaalse mõju monetiseerimine võib osutada raskeks, kuna selline projekt on Eesti jaoks esimene ja unikaalne ning ei ole olemas praktilisi näiteid ja samasuguseid võrreldavaid projekte.

NPV arutamise käigus tehti ka stsenaariumite analüüs, mis on CBA viimane arvutusosa. Stsenaariumianalüüs on tähtis, sest selle abil saab prognoosida projekti tasuvust juhul, kui toimuvad muutused majanduses, näiteks nõudluse kasv, või poliitiliste otsuste tõttu, näiteks maksude tõusmine, nõudluse vähenemine ja kütuse hinna kasv. Stsenaariumi analüüs on tehtud vahega stsenaariumite vahega 15%.

2.3 Tasandatud elektrikulu

Tasandatud elektrikulu (*levelized cost of energy*, LCEO) on meetod, mida kasutatakse elektrijaama eluea jooksul elektri tootmise keskmise kulu arvutamiseks, võttes arvesse kogukulu. LCEO aitab võrrelda energia tootmise viise. LCEO arvutamisel on vaja arvestada järgmise kuluga:

- 1) kapitalikulu: elektrijaama ehitamise esialgne maksumus;
- 2) tegevuskulu: elektrijaama käitamise jooksev kulu, sealhulgas kütuse-, hooldus-, remondi- ja tööjõukulu;
- 3) dekomisjoneerimiskulud: elektrijaama demonteerimise ja kasutusest kõrvaldamise kulu selle kasuliku eluea lõpus.

Kogu eluea elektritoodangu arvutamiseks tuleb hinnata elektrienergia koguhulka, mida elektrijaam oma eluea jooksul toodab. See võib põhineda tehase võimsusel, tehase eeldataval võimsusel ja tehase töötundide arvul aastas. LCEO on iga riigi jaoks unikaalne. Siiski on vaja pöörata tähelepanu sellele, et LCEO arvutamisel ei ole arvestatud sotsiaal ja keskkonna kuludega.

LCEO valem (U.S department of energy) :

$$LCEO = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

kus

I_t – investeringute kulutused aastal t ,

M_t – tegevus- ja hoolduskulu aastal t ,

F_t – kütusekulu aastal t ,

E_t – elektri tootmine aastal t ,

r – diskontomäär,

n – eluiga.

Diskontomääraks LCEO arvutamisel on võetud kapitali keskmine hind (WACC) mis P. Kennedy (2007) soovitusel on võetud vahemikus 5–10%. Baasstsenaariumi korral on kapitalikuluks võetud vahemiku 5–10% keskmine ehk 7,5%.

3. TULEMUSED

Selles peatükis on metoodika- ja teooriapeatükile toetudes läbi viidud Eesti esimese tuumaenergia CBA ning selle raames ka sensitiivsusanalüüs. Viimases peatükis kirjeldab autor analüüsi järeldusi ja annab oma hinnagu CBA tulemustele. CBA analüüsi läbiviimise põhjused olid välja toodud sissejuhatuses ja teooriapeatükis.

Tasuvusanalüüs tehakse eeldades et:

- 1) tuumaenergiajaama rajamisel kasutatakse BWRX-300 reaktorit;
- 2) tuumaenergiajaam rajatakse Ida-Virumaa piirkonda;
- 3) riik on projekti vastu võtnud.

Tabel 2. Tuumareaktori BWRM-300 olulisemad näitajad.

Eluiga	60 aastat	–
Võimsus	300 M _w H	–
Ehituse maksumus	1 miljard eurot	–
Töövõime	95%	–
Kütusega tankimine	10–24 päeva iga 12–24 kuu tagant	–
Turbiini ülevaatamine	25 päeva iga 120 kuu tagant	–
Tööjõud (tuumaenergiajaama käigus hoidmiseks)	75 töötajat	–
Gaasiheide normaalsel ajal	3.3E+1 / 7.32E-4 / 1.08E-1	TBq/a (vääriskaasid / triitiumi gaas / vedelikud)
Jäätmete paigutus	Maa-alune	–

Litsents	DCR	–
Kogupindala	26 300 m ²	–
Kütus	U02	–
Kütuseühikute arv	240	–
Ehitusperiood	26 kuud	–

Allikas: autori koostatud GE Hitachi and Hitachi GE Nuclear Energy(2019) põhjal.

3.1 Tuumaenergiajaama projekti kirjeldus

2020. aastal tellis Eesti ettevõtte Fermi Energia OÜ Tartu Ülikoolilt tuumaenergiajaama eel-tasuvusanalüüsi, pakkudes välja tuumareaktori BWRM-300. See on X põlvkonna väikereaktor (SRM) suhteliselt väikse võimsusega – 300 Mwh. See reaktor on disainitud HITACHI Energy poolt ja litsentseeritud 2014. aastal NCR poolt. Tuumaenergiajaama geograafiline asukoht pole kindlaks tehtud. Fermi Energia pakutavad variandid on Ida-Virumaa – Lüganuse, Lääne-Virumaa – Kunda, Harjumaa idaosa – Kaberneeme. Tuumareaktoris kasutatav kütus on U-2. Tuumareaktori olulisemad näitajad on välja toodud tabelis 2.

3.2 Mõjude identifitseerimine

CBA järgmine oluline samm on kulude ja tulude identifitseerimine. Negatiivsed ja positiivsed mõjud on välja toodud tabelis 3.

Tabel 3. Kulude kokkuvõte

Kulud	Tulu (kasu)
Ehitusele eelnev kulu	Keskkonnamõju
Kapitalikulu	Kokkuhoid
Tegevuskulu	Uued töökohad

<ul style="list-style-type: none"> • kütus • jäätmed • juhtimiskulu 	
Tegevuse lõpetamine (dekomissioneerimine)	-

Allikas: Autori koostatud A. Boardman (2018) soovitude põhjal

3.2.1 Kulude identifitseerimine

Projekti ehituse aguses on ehitus eelnevad kulud. Ehitusele eelnev kulu on kulu, mis tekib projekteerimisel: litsentseerimis-, uuringu- ja muu taoline kulu. 2020. aastal Tartu Ülikooli poolt tehti eeltasuvusuuring, mida tellis Fermi Energia OÜ, mis hõlmas ka reaktori asukoha eeluuringut, kuid tuumaenergiajaama ehitamiseks on vajalik teostada laiem ja sügavam uuring. Kuna Eesti jaoks on tuumaenergiajaama projekt esimene, siis tuleb luua tuumaenergia regulatsiooni asutus. See oleks iseseisev regulatiivorgan, mis kontrolliks tuumaenergiajaama käsitlemise ja opereerimise protsessi IEAE nõuete kohaselt. Litsentseerimine võib koosneda mitmest etapist või olla kombineeritud. Kombineeritud litsentseerimine on mugavam, kuna võimaldab anda ühe loa. (Fermi Energia OÜ, 2020).

Tuumajaama ehitamine on alati väga kulukas ja kõige suurem osa sellest on alginvesteering ehk kapitalikulud. Tuumajaama ehitus kestab 26 kuud, mille jooksul tuumaenergiajaam ei tooda elektrit ega ei too kasumit. Kuna tihti ehitamisprotsess võib venida, siis sellega suureneb ka niinimetatud üleöökuulu. HITACHI Energy välja toodud reaktori rajamise kulu on 1 miljard eurot, aga kuna ajalooliselt on kulud suurenenud isegi 200% võrra, otsustas autor halva stsenaariumi puhul lisada kapitalikulule veel 50% alginvesteeringust.

Tuumajaama tegevuskulu oleneb jaama suurusest, kuid tavaliselt on see 20% kogukulust, mis on suhteliselt väike osakaal võrreldes Eesti põlevkivitööstuse kuludega. Selline väike osakaal on tingitud materjali ja kütuse madalast hinnast. Eesti põlevkivitööstuse kauba-, tooraine- ja materjalikulud moodustas 2021. aasta kasumiaruande järgi 67% kogukulust. BRWM-300 jaoks sobilik kütuse materjal on UO2, mille keskmine hind turul on umbes 40,27 USD kilogramm.

Reaktori prognoositav eluiga on 60 aastat. Tuumaenergiajaama eluiga võib olla ka pikem, kuid suurema tõenäosusega dekomissioneeritakse see 60 aasta pärast. Terminit dekomissioneerimine kasutatakse just tuumaenergias ja see tähendab tuumaenergiajaama tegevuse lõpetamist. Need toimingud võivad piirduda lihtsalt rajatise sulgemise ja minimaalse radioaktiivse materjali eemaldamisega koos jätkuva hoolduse ja järelevalvega. Vahel kaasneb sellega ka kogu vastu võetamatu radioaktiivse materjali eemaldamine rajatisest varsti pärast seiskamist.

Dekomissioneerimise kulu mõjutavad mitu tegurit: reaktori tüüp, dekomissioneerimise viis või valitud etapp, projekti kestus, jäätmekäitlus, inflatsioonimäär, diskontomäärad jne. (Costs of decommissioning nuclear power plants, 1990). Tuumaenergiaagentuur NEA (Nuclear Energy Agency, NEA) tegi järelduse, et dekomissioneerimiskulu on tavaliselt 10–20% tuumaenergiajaama kapitalukulust. Näiteks Soome tuumaenergiajaama Loviisa dekomissioneerimiseks (2×500 Mwh) on plaanis kulutada umbes 326 miljonit USD. Tavaliselt tasutakse dekomissioneerimiskulu juba enne seda, kui tuumaenergiajaama projekti hakatakse ellu viima. Raha kantakse deposiitkontole, et tagada tuumaenergiajaama turvaline dekomissioneerimine. Ameerikas võtavad ettevõtted dekomissioneerimise rahastamiseks tasu 0,1–0,2 senti/KWh.

3.2.2 Tulude identifitseerimine

Selles alapeatükis identifitseeritakse kogu projekti jooksul tekkiv tulu. Atvestatud on nii rahalised kui ka mitterahalised mõjud, mis tulenevad projekti realiseerimisest.

Keskkonnamõju on üks olulisemaid mõjusid, mida tuleb arvestada tuumaenergiajaama analüüsi tegemisel. Tuumaenergiajaam ei emiteeri gaase, mis võivad põhjustada kasvuhooneefekti – süsihappegaasi, metaani, lämmastikoksiidi. Väike kogus gaase võib emiteeruda ainult tuumaenergiajaama ehitamise käigus. Eesti praegune peamine energiaallikas põlevkivitööstus emiteerib suures koguses kasvuhoonegaase. Kennedy (2007) soovitusel põhjal on tuumaenergia keskkonnatulu hinnatud CO₂ heitkoguste vähenemisena võrreldes selle mittekasutamisega.

Fermi Energia OÜ eeltasuvusuuringu kohaselt on tuumaenergiajaama ehitamisega planeeritud luua 170 uut töökohta. 121 töötajat töötaksid tuumaenergiajaamas kohapeal ja 50 töötaksid peakontoris. Fermi Energia OÜ eelduses on tuumaenergiajaama jaoks sobivaim koht Ida-Virumaa piirkond Kirde-Eestis. Ida-Virumaa töötuse määr on läbi aegade olnud Eesti suurim. 2021. aasta statistikaameti andmete alusel oli see 11,9%. Uute töökohtade loomine alandab töötuse määra. Vastavalt nendele andmetele on riigil võimalik saada suuremat maksutulu.

Praegu ostab Eesti selle osa elektrienergiast, mida ise ei suudeta toota, Nordpooli börsilt. Nordpool on Euroopa suurim elektribörs. Praegu ei ole börsilt ostetava elektri osakaal väga suur, kuid see võib märkimisväärselt suureneda, arvestades fakti, et Eesti Energia sulgeb põlevkivitööstuse 2030. aastaks. Elektri hind elektribörsil on viimasel ajal olnud ebastabiilne. Näiteks 2020. aasta novembris oli energia hind Nordpooli elektribörsil 40,99 eur/MWh, aga 2022. aasta novembris juba 218,99 eur/MWh. Kõige kõrgem elektri hind Nordpooli börsil oli 2022. aasta augustis – 361,35 eur/MWh – ja kõige madalam aprillis – 65,89 eur/MWh. Tuumaenergiajaama LCEO kasutamisel on võimalik arvutada kokkuhoid riigile, kui riik toodaks ise elektrienergiat, mitte ostaks elektrit börsilt.

3.5 Mõju rahalise ekvivalendi leidmine

Selles alapeatükis leitakse projekti mõju rahaline ekvivalent. Kulude rahalise ekvivalendi leidmiseks kasutatakse P. Kennedy (2007) aasta soovitusi. Rahaline ekvivalent leitakse järgmisele kulule ja tulule:

- kapitalikulud;
- tegevuskulu;
- jäätmekulu;
- kütusekulu;
- dekomissioonikulu;
- keskkonnamõju;
- uute töökohtade loomine.

3.5.1 Kulude rahalise ekvivalendi leidmine

Selles alapeatükis moniteseeritakse peamised tuumaenergiajaama projekti kulud. Tulevasi kulusid ei saa täpselt prognoosida, seega kasutatakse kolme stsenaariumit, mis peegeldavad kolme olukorda: optimistlik, baas- ja pessimistlik stsenaarium. Stsenaariumite sensitiivsuseks on võetud 15%. Stsenaariumite paremaks võrdlemiseks arvutatakse iga stsenaariumi LCEO ehk tasandatud elektrikulu.

Ettevalmistuskulu ei ole eraldi arvutatud, kuna reaktori BWRM-300 tootja Hitachi Energy on ametlikus BWRM-300 raportis deklareerinud, et tuumaenergiajaama projekteerimis-, hanke- ja

ehituse üleöö-kapitalikulu koos võrguehitusega on 1 miljard eurot. Kulude kokkuvõte on esitatud tabelis 4.

Tabel 4. Kulude rahalised ekvivalendid

	Optimistlik	Baas	Pessimistlik
Alginvesteering (€)	850 000 000	1 000 000 000	1 150 000 000
Projekteerimine			
Võrguehitus			
Kütus (€)	8 807 000	10 361 000	11 915 000
Jäätmed (€)	1 909 000	2 247 000	2 584 000
Tööjõud (€)	19 099 000	22 470 000	25 840 000
Dekomissioon (€)	6 735 000	7 924 000	9 113 000
Reaktori eluiga (aastat)	60	60	60
Töövõime	95%	95%	95%

Allikas : Autori koostatud

Tuumaenergiajaama tegevuseks on vajalik väga väike kogus kütust. Uraani suureks eeliseks on see, et see on odav ja väga kontsentreeritud energiaallikas, mida on mugav transportida. 1000 MWh reaktor vajab igal aastal umbes 27 tonni värsket rikastatud kütust. (World Nuclear association, Nuclear Fuel Cycle Overview 2021). Seega et opereerida reaktori võimsusega 300 MWh reaktorit, on vaja umbes 8,1 tonni aastas. Kui reaktor BWRX-300 töötab aastas mahus 95%, hakkab see tootma umbes 2 496 600 MWh energiat aastas. Ülemaailmne tuumaühenduse andmetel on kütusekulu 0,46 €/kWh ehk 4,6 USD megavatt-tunni kohta (WNA, 2021). 4,6 USD on praeguse valuutakursi järgi 4,15 eurot. Nende andmete alusel on arvatud kogu kütusekulu aastal, mis on 10 361 000 eurot.

Energiatootmisel on jäätmete hulk suhteliselt väike võrreldes toodetud energia kogustega, ent osa jäätmetest on radioaktiivne ja väga ohtlik, mis nõuab hoolikat käitlemist ja turvalist säilitamist. Tuumakütuse tsükli kõik osad tekitavad radioaktiivseid jäätmeid ning nende käitlemise ja kõrvaldamise kulu on osa elektrikulust. See tähendab, et nendega arvestatakse energia tootmis-hinna arvutamisel ja nende eest maksavad elektritarbijad (WNA, 2022). Peter Kennedy arvas oma aruandes, et jäätmete kulu võib olla sama nagu Ameerika Ühendriikides ehk 1 USD/MWh (0,9 EUR/MWh). Sellest tuleneb, et kogu jäätmete kulu ühes aastas on 300 MWh võimsusega reaktori korral 2 247 000 eurot. Arvutamisel on arvestatud, et reaktori töövõime on 95%.

Hitachi Energia raportis on välja toodud, et reaktori igapäevaseks töötamiseks on vaja umbes 75 inimest. Fermi Energia OÜ prognoositav inimtöjõu vajadus on 171 inimest (tuumaenergiajaama töötajad + juhtkond). Peter Kennedy (2007) prognoositav töjõukulu ühe megavati kohta on 10 USD ehk 9 EUR. Kokku on 95% töövõimega tegutseva tuumaenergiajaama töjõukulu aastas 22 470 000 eurot.

Dekomissioonikulu on ajalooliselt moodustanud 10–20% kapitalikulust. Seega võib prognoosida, et dekomissioonikulu on baasstsenaariumi korral keskmiselt 15% ehk 150 miljonit eurot. Vastavalt regulatsioonile on tuumaenergiajaama omanikul vaja alustada raha kogumist juba projekti tegevuse ajal. Baasstsenaariumi diskontomäära korral on aastane kulu 7,9 miljonit eurot.

3.5.2 Tulude rahalise ekvivalendi leidmine

Rahaline ekvivalent on leitud järgmistele mõjudele: keskkonnamõju, elektrihinnast tulenev kokkuhoid ja töjõumaksud, mis laekuvad riigieelarvesse. Teiste mõjude rahalise ekvivalendi leidmine ei olnud võimalik või ei olnud autori arvates relevantne. Tabelis 5 on välja toodud kokkuvõtte arvutatud tuludest.

Tabel 5. Tulude rahalised ekvivalendid

Autori koostatud

	Optimistlik	Baas	Pessimistlik
Keskkonnamõju (€)	188 114 000	163 577 000	139 040 000
Töjõumaksud (€)	3 393 000	2 951 000	2 508 000

Põlevkivitööstus tekitab Eesti kogu CO₂-jalajäljest, mis on 15,5 miljonit tonni, 70% ehk 10,85 miljonit tonni. CO₂ hind Maailmaturul on umbes 90 eurot tonni kohta. Eesti põlevkivitööstuse toodetava CO₂ rahaline ekvivalent on 976,5 miljonit eurot aastas. Olelusringi alusel eraldab tuumaenergia vaid mõne grammi CO₂ ekvivalenti toodetud elektri kWh kohta. Kuigi hinnangud on erinevad, on ÜRO valitsustevaheline kliimamuutuste rühm (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, 2022) uuringute põhjal hinnanud keskmiseks väärtuseks 12 g CO₂ ekvivalenti kWh tuumaenergia puhul, mis on sarnane tuuleenergiaga ja madalam kui igat tüüpi päikeseenergia puhul. Põlevkivi kui biomassi põletamine on ekvivalente 740 CO₂ kWh kohta. Nende andme põhjal arvutati kokkuvõtteid, mis tekib, kui asendada põlevkivitööstus kui peamine energiaallikas Eestis tuumaenergiajaamaga. Kokkuvõtteid arvutades korrutati praegune CO₂ hind energiakogusega, mida suudab toota üks 300 MWh võimsusega tuumaenergiajaam ühe aasta jooksul. Kui aasta jooksul toodab tuumaenergiajaam 2 496 600 000 kWh, siis ühe aasta rahaline kokkuvõtteid tuumaenergiajaama korral on 163 577 000 eurot.

Tuumaeenergiajaama ehitamisel tuleb arvesse võtta ka riigile makstavad tööjõumaksud. Praegu on riigi eelarvesse laekuv sotsiaalmaks 33% töötajate brutopalgast. Tuumaenergiajaama spetsialistide palka prognoosida on väga keeruline, seega võeti selleks Fermi Energia välja toodud 3000 eurot. Fermi OÜ eeltasuvusuuring tehti aastal 2020, seega ei sobinud see summa preguseks uuringuks. Eesti keskmine palk, Eesti statistikaameti järgi, on aastast 2020 tõusnud 25% võrra, seetõttu võeti tuumaenergiajaam töötaja keskmiseks palgaks 3714 eurot. Kokku oleks töötajaid 171 töötajat ja riigi maksutulu moodustaks aasta 2 951 000 eurot.

2022. aasta keskmine elektri hind Nordpooli börsil oli 192,6 eurot MWh. LOEC-i arvutamisel baasstsenaariumi järgi on LCEO hind 54,5 eurot, mis on märkimisväärne vahe elektri hinna puhul. Kokkuvõtteid arvutamiseks võeti 2021. aasta Eesti riigi elektrienergia tarbimine. Andmeid 2022. aasta elektrienergia tarbimise kohta ei ole Eesti statistikaamet bakalaureusetöö koostamise ajal veel avalikustanud. Elektrienergia tarbimine oli Eestis 2021. aastal 116 836 TJ ehk 32 454 444 kWh. Tulenevalt sellest oleks ühe aasta kokkuvõtteid 4 489 098 749 eurot. Kuna hinna tõus 2022. aastal oli väga järsk ja ettearvamatu, võeti pessimistliku analüüsi jaoks turuhinnaks 86,73 eurot, mis oli elektrienergia turuhind 2021. aastal. See aitab aru saada, milline võib olla tulemus, kui elektrienergia börsihind langeb või tõuseb, mis võib omakorda viia tulemuste vale tõlgendamiseni.

3.6 Projekti nüüdispuhasväärtus

Nüüdispuhasväärtus ehk NPV leiti keskmise kapitali kuluga, mis võrdub 7,5%. P. Kennedy soovitusel on peab olema 5-10%. Autor kasutas valemit, mis on lahti kirjutatud metoodika peatükis. Eraldi leiti kulu ja tulu NPV erinevate stsenaariumite korral. Stsenaariumite sensitiivsuseks on 15%. Kulude ja tulude detailsemad NPV arvutused on esitatud tabelites 4 ja 5. Autor otsustas NPV arvutamisse mitte lisada elektriinna kokkuvõidu, kuna elektrienergia turuhind on ebastabiilne ning kokkuvõid ei võimalda peegeldada olukorda ja võib olla eksitav. Sellegipoolest tuleb arvestada, et LEOC hind on elektrienergia tootmisviiside võrdlemisel väga oluline, seetõttu on LCEO hinna arvutus ja kokkuvõid välja toodud eraldi alapeatükis. Tulu ja kulu NPV arvutuste tulemused on välja toodud tabelis 6. Detailsem vaade on esitatud lisas 1. Eelis on projekti kokkuvõtlik NPV, mis on saanud tulu NPV ja kulu NPV lahutamisel. NPV arvutuste järgi ükski potentsiaalsetest stsenaariumitest ei oleks kahjumis.

Tabel 6. NPV kokkuvõtlik tabel

Autori koostatud

	Optimistlik	Baas	Pessimistlik
Kulu kokku (€)	1 238 132 000	1 456 626 000	1 675 119 000
Tulu kokku (€)	2 522 442 000	2 191 407 000	1 862 696 000
Eelis (vahe)	1 284 310 000	734 781 000	187 577 000

3.7 LCEO arvutus ja kokkuvõid aastas

LCEO hind arvutati samuti kolme stsenaariumi järgi. Algandmeteks võeti projekti jooksul tekkinud kulu. Inflatsioonimääraks võeti Euroopa keskpanga prognoositud 2% . Tasandatud elektrikulu arvutamisel projekti kogukulu diskonteeriti ja jagati kogu kasutusaja elektritoodanguga. Projekti elueaks võeti 62 aastat, millest 2 aastat on tuumaenergiajaama ehitamine ja ülejäänud 60 on reaktori elektritootmine. Kogukulu koosnes alginvesteeringust, kapitalikulust, tegevuskulust ja dekomissioonikulust. Elektrikogutoodangu arvutamisel on võetud reaktori BWRM-X elektri tootmise näitajad.

Elektrituru ebastabiilsuse tõttu arvatati kolm võimaliku kokkuhoiustsenaariumit. Kokkuhoid tuleneb sellest, et riigil on võimalik tooda elektrit LCEO hinnaga, mitte osta seda börsilt. Kokkuhoid on arvatatud Eesti elektritarbimise alusel. Selleks võeti 2021. aasta Eesti elektritarbimine 116 836 TJ aastas. Kokkuhoiud arvatati eeldusel, et LCEO hind on aastate jooksul konstantne.

Kokku võeti kolm erinevat elektri hindu elektriturul Nordpool. Esimeseks arvutuseks võeti 2022. aasta elektri keskmine hind, mis oli 192,6 eurot MWh. Sellise hinnaga baasstsenaariumi kokkuhoid on 4,5 miljardit eurot aastas. Teiseks arvutuseks võeti kuue kuu keskmine elektri hind turul, 129,36 eurot MWh. Sellise turuhinna korral oleks kokkuhoid riigi jaoks 2,4 miljardit eurot aastas, mis on peaaegu 2 korda väiksem kui 2022 aasta keskmise turuhinna puhul. Kolmandaks kokkuhoiu arvutuseks võeti viie aasta keskmine elektri hind turul, 81,23 eurot MWh. Sellise hinna puhul oli kokkuhoid kõige väiksem – ainult 86,7 eurot MWh.

Tabel 7 LCEO ja kokkuhoid

Autori koostatud

	Optimistlik	Baas	Pessimistlik
LCEO (eurot MWh)	36,34	54,5	72,6
Kapitali kulu/WACC (%)	5	7,5	10
Kokkuhoid 2022 aasta keskmise hinna puhul (€)	5 078 471 000	4 489 098 000	3 901 673 000
Kokkuhoid kuue kuu keskmise hinna korral (€)	3 019 182 000	2 429 810 000	1 842 384 000
Kokkuhoid viie aasta keskmise hinna puhul (€)	1 457 009 000	867 637 000	280 211 000

3.8 Järeldused ja ettepanekud

Selles alapeatükis analüüsib autor läbiviidud analüüsi tulemusi ja teeb ettepanekuid. Esimeses osas identifitseeriti projekti mõjutavad kulud ja tulud, kasutades varasemaid uuringuid ja Fermi Energia OÜ tehtud eeltasuvusuuringut. Mõjud kattusid osaliselt teoreetilise osaga ning jagunesid

kvantitatiivseteks ja kvalitatiivseteks. Kulude osas välja valitud projekti kulud monetiseeriti. Kulude monetiseerimisel võetud aluseks A. Boardmani ja P. Kennedy soovitusel kapitalikulu ja tööjõukulu arvutamiseks. Alginvesteering võeti Hitachi Energy ametlikust reaktori väljaandest, kus on välja toodud kõik reaktori omadused. Analüüsi tegemisel oli üheks takistuseks eluliste näidete puudus, sest töös kasutatud väiksemodulaatorreaktor on uuenduslik ega ole kasutusel veel üheski riigis. Esimene reaktor plaanitakse ehitada Kanadas 2024. aastal. Pärast seda saab võrrelda autori teoreetilisi kuluarvutusi praktilise näitega ning teha vajalikud parandused ja muudatused.

Tuumaenergiajaama ehitamine on avaliku sektori projekt, seega tuleb keskenduda just riigi ja ühiskonna tulule ja kasule. Autor arvestas nii kvalitatiivse kui ka kvantitatiivse tuluga. Monetiseeriti keskkonnamõju, elektri hinna kokkuvõtteid ja maksutulu uutelt töökohtadelt. Elektri hinnast tulenevat kokkuvõtteid projekti NPV võrdlemisel arvesse ei võetud, sest elektri börsi hind muutub liiga järsult ja drastiliselt ega anna head ülevaadet elektri turuhinna seisust. Vaatamata sellele, et elektri hinna kokkuvõtteid ei läinud lõplikku diskonteeritud tulu ja kulu arvestusse, on elektri hinna vahe ja LCEO väga olulised elektrienergia tootmisviiside hindamised. Autori koostas tabeli (tabel 7), mille abil saab võrrelda elektri hindu.

Võimalike muutuste ja hälvete vältimiseks vaadati läbi kolm stsenaariumit, mille sensitiivsuse näitaja on 15%. Baasstsenaariumi korral on tulu ja kulu NPV positiivne. Optimistliku ja pessimistliku stsenaariumi puhul on lõplik NPV samuti positiivne. Sellest võib järeldada, et potentsiaalne tuumaenergiajaama projekt on Eesti riigile kasulik.

Kui võtta arvesse ka kvalitatiivne mõju, siis autor järeldab, et positiivse mõju osakaal on suurem ja projekti võib realiseerida. Autori arvates on suurimaks takistuseks Eesti riigi jaoks suhteliselt suur alginvesteering. Samuti ei saa vältida projekti venimist rahapuuduse tõttu. Arvestada tuleb ka seda, et elulise näite puudumise tõttu ei saa praegu täpselt prognoosida projekti rahavoogusid.

KOKKUVÕTE

Energia tarbimine kasvab igal aastal. Elektri hind on omakorda muutunud väga ebastabiilseks. Eesti on seadnud eesmärgi, et 2050. aastaks toodetakse 50% kasutatavast energiast taastuvenergiaallikatest. Praegu on Eesti peamine energiaallikas on põlevkivitööstus, mis paikneb Eesti kirdeosas. Põlevkivitööstus ei ole jätkusuutlik ega taastuvenergiaallikas, mis läheb lahku seatud eesmärgist. Riigil on vaja valida elektrienergia tootmisviis, mis oleks jätkusuutlik ja ka taskukohane riigi elanikele.

Selle töö eesmärk oli viia läbi Eesti esimese tuumaenergiajaama tasuvusanalüüs (*cost-benefit analysis*, CBA). CBA-d kasutatakse tihti just avaliku sektori projektide analüüsimisel, sest see meetodika annab võimaluse arvestada nii majanduslike, kui ka sotsiaal- ja keskkonnanäitajatega. CBA tehti A. Boardmani, P. Kennedy ja Euroopa Liidu juhendi ja soovitude põhjal.

Autor uuris esmalt elektrienergia sektori nõudlust ja vajadust alternatiivse energiatootmisallika leidmiseks, samuti tuumaenergiajaama tööpõhimõtteid, olemust ja riske. Üle vaadatud kirjanduse põhjal identifitseeriti peamised tuumaenergiajaama aspektid, millele tuleb tasuvusanalüüsi tegemisel tähelepanu pöörata. Peamiseks tuumaenergiajaama kuluks on alginvesteering, mis on väikse riigi jaoks suhteliselt suur. Kütuse- ja tegevuskulu on, vastupidi, suhteliselt väikes võrreldes muude energiaallikatega. Tuumaenergiajaama elektritootmiseks on vajalik väga väike kütusekogus, mille kasutegur on suur. Kütuse hind turul on samuti olnud stabiilne.

Eesmärgi täitmiseks tuvastati kõik kulud ja tulud. Tuumaenergiajaama peamised kulud on alginvesteering, kapitalikulu, tegevuskulu ja dekomissioonikulu. Töös kirjeldati ka muid kulusid, kuid neile ei leitud rahalist ekvivalenti. Peamisteks tuludeks on uute töökohtade loomine, keskkonnatulu ja kokkuhoid odavast tuumaenergiast. Peamistele tuludele leiti samuti rahaline ekvivalent. Selleks, et tulemused oleksid peegeldatud mitmel viisil tehti stsenaariumite analüüs sensitiivsusega 15%.

Tasuvusanalüüsi viimaseks sammuks on projekti nüüdispuhasväärtuse leidmine. Selleks diskonteeriti eraldi kõik tulud ja kulud. Nüüdispuhasväärtus diskonteeriti tulude ja kulude vahest.

Nüüdispuhasväärtuse leidmisel ei arvestatud kokkuhoidu odavast energiast, sest elektri turuhind on liiga ebastabiilne. Siiski arvutati tasandatud elektrikulu, mis on väga tähtis näitaja energia- tootmisviiside kaalumisel.

Analüüs peegeldab praegust olukorda ja tehti eeldusel, et tuumaenergiajaama ehitus algab aastal 2025. Tuumaenergia elektri hind võib muutuda vastavalt sellele kuidas muutuvad elektrienergia tootmisele vastavad sisendid.

SUMMARY

Energy consumption is increasing every year. In turn, the price of electricity has become very unstable. Researchers in PrognosvaEesti have set a goal for the year 2050 that 50% of energy production consists of renewable energy sources. At the moment, the main source of energy in Estonia is the oil shale industry, which is located in the northeastern part of Estonia. The oil shale industry is not sustainable or a renewable energy source that breaks up with its intended purpose. The country needs to choose a method of electricity production that is sustainable and affordable for the country's residents.

The purpose of this work is to carry out a cost-effectiveness analysis (CBA) of Estonia's first nuclear power plant. CBA (cost-benefit analysis) is often used in the analysis of public sector projects, because this methodology gives the opportunity to take into account economic as well as social and environmental indicators. The CBA analysis is based on A. Boardman, P. Kennedy and the guidelines and recommendations of the European Union.

The author has first studied the demand of the electricity sector and the need to find an alternative source of energy production. The operating principles, nature and risks of a nuclear power plant have also been studied. Based on the reviewed literature, the main aspects of a nuclear power plant that must be paid attention to when performing a cost-effectiveness analysis have been identified. The main cost of a nuclear power plant is the initial investment, which is relatively large for a small country. On the contrary, fuel and operating costs are relatively low compared to other energy sources. A very small amount of fuel with a high output is required for the electricity production of a nuclear power plant. The price of fuel on the market has also been stable.

All costs and benefits had been identified to fulfill the objective. The main costs of a nuclear power plant are - initial investment, capital costs, operating costs and decommissioning costs. Other costs are also described in the work, but no financial equivalent was found for them. The main benefits are the creation of new jobs, environmental benefits and savings from cheap nuclear power. Other costs are also described in the work. A financial equivalent has also been found for the main revenue streams. In order for the results to be reflected in several ways, the analysis of the scenarios was performed with a sensitivity of 15%.

The last step of the profitability analysis is to find the net present value of the project. To find the net present value, all income and expenses were discounted separately. Net present value is discounted from the difference between income and expenses.

Savings from cheap energy were not taken into account when finding the net present value, because the electricity price market is too unstable. However, the levelized electricity cost has been calculated, which is a very important indicator in finding ways of energy production. Savings calculations are presented in a separate chapter.

The analysis reflects the current situation and the assumptions were made that the construction of the nuclear power plant will begin in 2025. The price of electricity for nuclear power may change accordingly.

KASUTATUD ALLIKAD

World nuclear Association. (2023, April). *Nuclear Power in Finland*. Kasutatud 02.aprill. 2023 <https://world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/economics-of-nuclear-power.aspx>

Kennedy, D. (2007). New nuclear power generation in the UK: Cost benefit analysis. *Energy Policy*, 35(7), 3701-3716.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.01.010>

Hõrak H., Hakan M., Kuriakose K. & Pustovalova A.(2020). Võimalikuväiksemoodulreaktoriajanduslik mõju Eestile:eeltasuvusuuring. *Tartu Ülikool*

Sträng J. & Fjällström T. (2011). A critical study on Kennedys Cost-Benefit-Analysis. New nuclear power generation in the UK. *Linnaeus University*

Manning, M., Johnson, S. D., Tilley, N., Wong, G. T., & Vorsina, M. (2016). *Economic analysis and efficiency in policing, criminal justice and crime reduction: What works?* Springer.

Kojo, M., & Litmanen, T. (Eds.). (2009). *The renewal of nuclear power in Finland* (pp. 161-91). Basingstoke: Palgrave Macmillan.

Lee, S., & Huh, J. H. (2019). *An effective security measures for nuclear power plant using big data analysis approach*. *The Journal of Supercomputing*, 75, 4267-4294.

Gollier, C., Prout, D., Thais, F., & Walgenwitz, G. (2005). *Choice of nuclear power investments under price uncertainty: Valuing modularity*. *Energy Economics*, 27(4), 667-685.

Kennedy, D. (2007), *New nuclear power generation in the UK: Cost benefit analysis*, Department of Trade and Industry, Her Majesty's Government, London. *Energy Policy* 35: 3701-3716.

Abbott, D. (2012). Limits to growth: Can nuclear power supply the world's needs?. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 68(5), 23-32.

Abbott, D. (2012). Limits to growth: Can nuclear power supply the world's needs?. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 68(5), 23-32.

Gabriel, S., Baschwitz, A., Mathonnière, G., Eleouet, T., & Fizaine, F. (2013). A critical assessment of global uranium resources, including uranium in phosphate rocks, and the possible impact of uranium shortages on nuclear power fleets. *Annals of Nuclear Energy*, 58, 213-220.

Malischek, R., & Trüby, J. (2016). The future of nuclear power in France: an analysis of the costs of phasing-out. *Energy*, 116, 908-921.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.008>

Davis, L. W. (2012). Prospects for nuclear power. *Journal of Economic perspectives*, 26(1), 49-66.

Horvath, A., & Rachlew, E. (2016). Nuclear power in the 21st century: Challenges and possibilities. *Ambio*, 45, 38-49.

World nuclear Association. (2023, April). *Nuclear Power in Finland*. Kasutatud 03.aprill. 2023 <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/finland.aspx>

Fermi Energia OÜ. (2020). *Teostatavusanalüüs Väikse Moodulreaktori (Vmr) Sobivusest Eesti Energiavarustuse Tagamiseks Ja Kliimaeesmärkide Täitmiseks 2030+ Osa II*.

Du, Y., & Parsons, J. E. (2009). Update on the cost of nuclear power. *Center for Energy and Environmental Policy Research (CEEPR) No, 09-004*.

Schneider, M., & Froggatt, A. (2021). The world nuclear industry status report 2019. *In World Scientific Encyclopedia of Climate Change: Case Studies of Climate Risk, Action, and Opportunity Volume 2* (pp. 203-209).

Nuclear Energy Agency & Organisation for Economic Co-operation and Development. (2012). *The economics of long-term operation of nuclear power plants*. NEA no. 7054

Fermi Energia OÜ. (n.d) *BWRX-300 Linda*. Kasutatud 23. märts. 2023 <https://fermi.ee/en/bwrx-300/>

World nuclear Association. (2023, March). *Small Nuclear Power Reactors*. Kasutatud 01.aprill. 2023 <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>

International Energy Agency. (2022). The global energy crisis. Kasutatud 24.märts 2023 <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022/the-global-energy-crisis>

World nuclear Association. (2023, March). *Advanced Nuclear Power Reactors*. Kasutatud 01.aprill. 2023 <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/advanced-nuclear-power-reactors.aspx>

Corkhill, C., & Hyatt, N. (2018). Nuclear waste management. IOP Publishing.

International Atomic Energy Agency. (2022) Experience in the Management of Radioactive Waste After Nuclear Accidents: *IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.31*.

International Atomic Energy Agency. (2020). Underground Disposal Concepts for Small Inventories of Intermediate and High Level Radioactive Waste. *IAEA Tecdoc Series*.

World nuclear Association. (2023, January). *Storage and Disposal of Radioactive Waste*. Kasutatud 26.märts 2023 <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-waste/storage-and-disposal-of-radioactive-waste.aspx#:~:text=Disposal%20of%20low%2Dlevel%20waste,the%20most%20radioactive%20waste%20produced>

Cotton, M. (2022). Deep borehole disposal of nuclear waste: trust, cost and social acceptability. *Journal of risk research*, 25(5), 632-647.

International Atomic Energy Agency. (2021) *What are Small Modular Reactors (SMRs)?*. Kasutatud 26. märts <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs>

U.S energy information administration. (2022) *How much electricity does an American home use?*. Kasutatud 28.märts. <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=97&t=3>

Stewart, W. R., & Shirvan, K. (2022). Capital cost estimation for advanced nuclear power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 155, 111880. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111880>

Sovacool, B. K., Nugent, D., & Gilbert, A. (2014). Construction cost overruns and electricity infrastructure: an unavoidable risk?. *The Electricity Journal*, 27(4), 112-120. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2014.03.015>

Locatelli, G., & Mancini, M. (2012). Looking back to see the future: building nuclear power plants in Europe. *Construction Management and Economics*, 30(8), 623-637.

Locatelli, G. (2018). Why are megaprojects, including nuclear power plants, delivered overbudget and late? reasons and remedies. *arXiv preprint arXiv:1802.07312*.

Heising, C. D., & George, V. P. (1986). Nuclear financial risk economy-wide costs of reactor accidents. *Energy Policy*, 14(1), 45-51. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(86\)90088-1](https://doi.org/10.1016/0301-4215(86)90088-1)

Han, J. H., Ahn, Y. C., & Lee, I. B. (2012). A multi-objective optimization model for sustainable electricity generation and CO2 mitigation (EGCM) infrastructure design considering economic profit and financial risk. *Applied Energy*, 95, 186-195. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.02.032>

Hultman, N. E., Koomey, J. G., & Kammen, D. M. (2007). What history can teach us about the future costs of US nuclear power.

World nuclear Association. (2023, March). *Carbon Dioxide Emissions From Electricity*. Kasutatud 01.aprill. 2023 <https://www.world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/carbon-dioxide-emissions-from-electricity.aspx>

GE Hitachi and Hitachi GE Nuclear Energy. (2019). Status Report – BWRX-300.

Boardman A. E., Greenberg D. H., Vining A. R., Weimer D. L. (2018). Cost–Benefit Analysis. Concepts and Practice. Fifth edition. *Cambridge University Press*.

Nuclear Energy Agency & Organisation for Economic Co-operation and Development. (2012). *The financing of nuclear power plant*. NEA no. 6360

World nuclear Association. (2021, April). *Nuclear Fuel Cycle Overview*. Kasutatud 08.aprill. 2023 <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/introduction/nuclear-fuel-cycle-overview.aspx>

World nuclear Association. (2022, May). *Nuclear Fuel Cycle Overview*. Kasutatud 08.aprill. 2023 <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/decommissioning-nuclear-facilities.aspx>

Tasandatud elektrikulu (LCOE) - ülevaade, kuidas arvutada. (n.d) Kasutatud 14. märts. <https://et.imrobingood.com/958-what-is-the-levelized-cost-of-energy-lcoe>

European Commission (2014). *Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects. Economic appraisal tool for Cohesion Policy 2014-2020*.

Azam, A., Rafiq, M., Shafique, M., Zhang, H., & Yuan, J. (2021). Analyzing the effect of natural gas, nuclear energy and renewable energy on GDP and carbon emissions: A multi-variate panel data analysis. *Energy*, 219, 119592. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119592>

Hewitt, G. F., & Collier, J. G. (2000). *Introduction to nuclear power*. CRC Press.

Karakosta, C., Pappas, C., Marinakis, V., & Psarras, J. (2013). Renewable energy and nuclear power towards sustainable development: Characteristics and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 187-197.

Euroopa standardiseerimise ja- akrediteerimise keskus. (2018) EVS 875-9, 2018.

European Central bank, (n.d.). Kasutatud 10. aprill https://www.ecb.europa.eu/stats/macroeconomic_and_sectoral/hicp/html/index.et.html

Brady, P. V., Freeze, G. A., Kuhlman, K. L., Hardin, E. L., Sassani, D. C., & MacKinnon, R. J. (2017). Deep borehole disposal of nuclear waste: US perspective. *In Geological Repository Systems for Safe Disposal of Spent Nuclear Fuels and Radioactive Waste* (pp. 89-112). Woodhead Publishing.

M. Rozyłow. (2013), A Cost-Benefit Analysis Of The First Nuclear Power Plant In Poland. *Aarhus University, Business and Social Sciences*

Eesti Statistikaamet. (2021). TT4645: 15-74-Aastaste Hõiveseisund Piirkonna, Maakonna Ja Vanuserühma Järgi (Emtak 2008). Kasutatud 12 märts 2023 <https://www.stat.ee/et/avasta-statistikat/valdkonnad/tooelu/tooturg/tootuse-maar>

Eesti Statistikaamet. (2021). SN11: Säästva Arengu Näitajad Üro Eesmärkide Põhjal. Kasutatud 25 märts 2023 https://andmed.stat.ee/et/stat/eri-valdkondade-statistika_saastev-areng/SN11

Eesti Statistikaamet. (2021). IKE36: ENERGIA EFEKTIIVSUSE SUHTARVUD) ja tööga hõivatud isikute arvu järgi. Kasutatud 30 märts 2023

<https://www.stat.ee/et/avasta-statistikat/valdkonnad/energia-ja-transport/energeetika>

Eesti Energia OÜ, (n.d.) Kasutatud 10. märts 2023 <https://www.energia.ee/et/ettevottest>

LISAD

Lisa 1. Kulude ja tulude kokkuvõtlik ülevaade

		Optimistlik	Baas	Pessimistlik
TULU (aastas, €)				
	Tulu NPV	2 522 442 000	2 191 407 000	1 862 696 000
	Keskkonnamõju	188 113 000	163 577 000	139 041 000
	Tööjõumaksud	3 393 500	2 951 000	2 508 000
KULU (aastas, €)				
	Kulu NPV	1 238 132 000	1 456 626 000	1 675 120 000
	Alginvesteering projekteerimine võrguehitus	850 000 000	1 000 000 000	1 150 000 000
	Kütus aastas	8 807 000	10 361 000	11 915 000
	Jäätmekulu aastas	1 909 000	2 247 000	2 583 000
	Tööjõukulu aastas	19 099 000	22 470 000	25 834 000
	Dekomissioon aastas	6 735 000	7 924 000	9 113 000

Lisa 4. Lihtlitsents

Lihlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Jekaterina Murašina

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

„Tuumaenergiajaama tasuvusanalüüs Eesti näitel“,
mille juhendaja on Tõnn Talpsepp,

- 1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
 3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.
-

11.05.2023

Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.