



Teostatavusanalüüs väikse
moodulreaktori (VMR)
sobivusest Eesti energiavarustuse
tagamiseks ja kliimaeesmärkide
täitmiseks 2030+



Teostatavusanalüüs väikse
moodulreaktori (VMR)
sobivusest Eesti energiavarustuse
tagamiseks ja kliimaeesmärkide
täitmiseks 2030+



SISUKORD

Sissejuhatus (Kalev Kallemets)

I OSA – Väikse moodulreaktori olemus ja põhjendatus

1. Väikse moodulreaktori tutvustus ja erinevus suurtest tuumajaamadest (K. Kööp)
2. Tuumajaama käitumine elektriturtul (TalTech)
3. Võimaliku väikse moodulreaktori majanduslik mõju Eestile (TÜ)

II OSA – Väikse moodulreaktori tehnilised aspektid ja valikud

1. Ülevaade litsentseeritavatest väikestest moodulreaktoritest (Paist, Vrager)
2. Väikeste moodulreaktorite ohutusparameetrid (Paist, Vrager)
3. Võrdlev analüüs väikestest moodulreaktoritest (Tractebel)
4. Tuumaenergia kütuse, taristu ja kulumaterjalide ahelate sissejuhatav kirjeldus (TÜ)
5. Vesiniku tootmine tuumaenergia abil (R. Küngas)

III OSA – Väikse moodulreaktori programmis vajalikud võimekused ja tegevused

1. Väikse moodulreaktori rakendusprogrammi vahe-eesmärgid (Fortum)
2. Vajalikud riiklikud kompetentsid ja nende arendamine (VTT)
3. Vajalik ehitus- ja käitussuutlikus (Fortum)

Lugupeetud lugeja

Kliima soojenemine ning selle ulatuslikud mõjud on tänaseks alaliselt uudistes ning toovad noore põlvkonna kogu maailmas tänavatele. Euroopa Liit on võtnud eesmärgiks 2050 aastaks saavutada süsinikneutraalsuse. See on tohutu eesmärk, mis sisuliselt lõpetab fossiilkütuste kasutamise elektri tootmises ning oluliselt vähendab ka transpordis ja soojuse tootmises. Peab toimuma süsinikheitmeta elektrifitseerimine ning energia tootmise dekarboniseerimine. Fermi Energia asutajad ja investorid on veendunud, et nagu ka põhjala riigid nagu Soome, Rootsi ja Kanada on põhjendatud, et ka Eesti tõsiselt kaalub tuumaenergia kasutamist nii süsinikneutraalsuse kui samal ajal elektri varustuskindluse ja Eesti majandusarengu tagamiseks.

Käesoleva teostatavusanalüüsi eesmärk on lähtudes IAEA juhise „Riikliku tuumaenergia taristu arendamise teemärgid“ (NG-G-3.1.) esitada analüüs Eestis võimaliku väikse moodulreaktori olemusest, kasutuselevõtu põhjendustest, kaasnevatest tehnilistest ja regulatiivsetest väljakutsetest. See on vajalik, et oleks võimalik alustada Eestis teadmistepõhist arutlust kas Eestile on põhjendatud luua võimalus kasutada kaasaegset väikest moodulreaktorit enda energiajulgeoleku tagamiseks peale 2030 aastat.

Tuumaenergeetika kätkeb endas tugevaima füüsilise jõu, tugeval vastasmõjul põhineva tuumajõu, juhtimist inimese hüvanguks. Seega olemuslikult on see ühtaegu võimas kui ka keeruline. Tuumafüüsika arendamisega 20. sajandil anti välja mitmeid Nobeli preemiaid ning maailma juhtivate riikide tuhanded teadlased tegid tuhandeid eksperimente kümnetel uurimisreaktoritel, et omandada alustadmisi. Euroopa Liidus töötavad alates 1951. aastast täna 14 liikmesriigis 110 tuumareaktorit ohutult ja kasumlikult tootes süsinikheitmeta elektri- ja soojusenergiat. 2018 aastal tootsid tuumajaamad 783 TWh elektrienergiat ehk 25% EL'i kogutoodangust.

Fermi Energia nimi on tunnustus tuumaenergeetika isale, Nobeli preemiaga itaalia-ameerika füüsikule Enrico Fermile, kelle juhtimisel käivitati Chicagos 1942. a. detsembris esimene tuumareaktor CP-1. Enrico Fermi oli tõeline geenius, kes põhjaliku teadustööga lõi inimkonnale kümneid innovatsioone ja avastusi, kuid üks tema omadus on väga oluline ka tänapäeva energeetikale – selleks on efektiivsus, fookus tulemusel ja ajasäästlikkus. Nii Eesti, Euroopa kui maailm peavad töötama tuumaenergeetikas sama julgelt, efektiivselt ja innovatiivselt kui Enrico Fermi, et kõige võimsam süsinikuvaba energialiik saaks anda suuremahulise panuse süsinikheitmete vähendamisse ning lõpuks ka miljardite tonnide CO₂ atmosfäärist väljatõmbamisse.

Tuumaenergia on tõeliselt teadmistepõhine energia. Käesoleva töö autoriteks on Eesti, Soome ja Belgia eksperdid tuginedes Ameerika Ühendriikide ja Kanada tehnoloogiaarendajate andmetele. Tuumaenergia on enda olemuselt alati rahvusvaheline, sest nii ohutus, pädevus kui tehnoloogia on rahvusvaheline. Fermi Energia tänab autoreid ning juba 2021 aastal plaanime avaldada järgmise kogumi partneritega koostatud analüüsides, mis käsitlevad juba detailsemalt kuidas väikse moodulreaktori rajamine Eestis on teostatav.

Kalev Kallemets, Ph.D.

Fermi Energia
Juhatuse esimees, kaasasutaja

1. OSA

VÄIKSE MOODULREAKTORI OLEMUS JA PÕHJENDATUS

1.1 VÄIKESTE MOODULREAKTORITE TUTVUSTUS JA ERINEVUS SUURTEST TUUMAJAAMADEST

Kaspar Kööp, Ph.D.; Kalev Kallemets, Ph.D.; Henri Ormus, M.Sc.

Valdav osa maailmas töös olevatest tuumareaktoritest arendati ja ehitati eelmise sajandi teises pooles. Need, peamiselt II-generatsiooni reaktorid on oma võimsuselt suured, ulatudes 1000 MWe ja rohkem reaktori kohta. Reaktorid ehitati suured peamiselt ökonoomilistel põhjustel. Keerukad ohutussüsteemid ja primaarjahutusvee ahel tegid reaktorid kalliks ja mõistlikuks ehitada vaid juhul kui genereeritav energia hulk oli piisavalt suur. Samuti võib suurte reaktorite edu põhjuseks pidada tuumariikide energiaturu suurust, elektrienergia tarbimise järsku tõusu ja vajadust stabiilse baaselektrienergia järele.

Väiksesed Moodulreaktorid (VMR) on definitsiooni kohaselt kuni 300 MWe tootmisvõimsusega tuumareaktorid. VMRid suudavad hinnas konkureerida suurte reaktoritega tänu oma kompaktsusele ja uudsetele (passiivsetele) ohutuslahendustele. VMRides on vähendatud keerukate ja kallite süsteemide arvu, samas tagades ning suurendades reaktori ohutust. Terved reaktorid, või valdav osa reaktorist plaanitakse ehitada tehases moodulitena ning transportida valmis moodul lõppasukohta. Moodulite ehituse koondamine ühte tehasesse võimaldab reaktori tootjal alandada reaktori tootmise omahinda, tõstes samas toote ehituse kvaliteeti ja efektiivsust. Moodultootmine vähendab lõppasukoha riigi sõltuvust kõrgelt kvalifitseeritud tööjõust ja suurendab tõenäosust, et ehitus valmib plaanitud tähtajal.

Maailmas on erinevas arengujärgus umbes 50 erinevat VMR disaini, neist mõned ka aktiivselt ehituses Argentiinas, Hiinas ja Venemaal. Väikseid moodulreaktoreid kavandatakse nii olemasolevate reaktorite vähendatud vormis kui ka täiesti uudsete IV-generatsiooni lahendustena, kus vee asemel jahutab reaktorituuma gaas, sulasool või vedelmetall. Tehnoloogiaid on erinevaid, kuid kõik VMRid on konventsionaalsetest reaktoritest lihtsama ehitusega, väiksema arvu aktiivsete süsteemidega ja parema võimekusega võimsust juhtida. Väikereaktorite võrdleva analüüsi leiab käesolevast raportist koostatuna Belgia tuumaenergiaettevõtte Tractebel poolt. VMRide populaarsuse tõusule võib põhjusi otsida mitmelt poolt. Tuumaaenergia laialdase kasutuselevõtu üheks piduriks, nii eelmise sajandi lõpus kui ka nüüd, võib pidada suurt alginvesteeringu vajadust ning suurusest tingitud ehituse kompleksust võrreldes teiste

elektrienergia tootmise liikidega. VMRide madal võimsus ja seetõttu ka suurusjärk madalam vajalik alginvesteering võimaldab tuumaenergia kasutuselevõttu kaaluda riikidel, kus eelnevalt see võimalus puudus. Modulaarne ehitus ja väikesed võimsused võimaldavad ühele platsile ehitada mitu reaktorit, investeerides tuumareaktoritesse astmeliselt. Teise reaktorimooduli investeerimise otsuse tegemine siis kui esimene moodul on oma investeeringut juba õigustanud vähendab oluliselt investeerimisriski ning reaktori tarnija poolt mitmetele väikestele jaamadele tootmisahela rajamine alandab tarneriski võrreldes suurte jaamade üksikute unikaalsete komponentide tootmisega. Eestile väheoluline pole ka väikereaktoriga kaasnev väiksemahulisem algne vajalik pingutus pädeva personali väljaarendamiseks. Seda käsitleb käesolevas raportis VTT koostatud analüüs.

Ohutuse seisukohalt on VMRidel konventsionaalsete reaktorite ees palju eeliseid. Tänu väiksemale võimsusele on reaktorituuma võimalik eriolukorras jahutada passiivseid süsteeme kasutades. Peamiselt tähendab see seda, et reaktori jahutamiseks ei lähe tarvis välist energiaallikat vaid reaktorituuma jääksoojus juhitakse reaktorist ümbritsevasse keskkonda ilma pumpadeta. Erinevates VMRides on kasutusel erinevad ohutussüsteemid. Näiteid süsteemidest ja kasutatavast tehnoloogiast leiab käesolevast raportist. Mitmetel VMRi disainidel massiivne paksust betoonist reaktori kaitsehoone pudub või on oluliselt lihtsustatud võrreldes konventsionaalsete reaktoritega. VMRide tootjad põhjendavad seda uuenduslike tehnoloogiliste lahendustega millede abil reaktorituuma sulamine ja radioaktiivse materjali levik reaktorianumast välja on füüsiliselt mittetõendatav. Tänu radioaktiivse materjali koguse väiksusele on ka VMRi jaoks vajalik ohu- ja evakueerimise tsoon plaanitud tunduvalt väiksem, laiendades oluliselt võimalike asukohtade arvu ning asukohti asustuse ja tööstuste läheduses võimaldades ka soojusenergia rakendamist.

Lisaks operatiivsele ohutusele toodab VMR tänu reaktorituuma väiksusele ka väiksema koguse radioaktiivseid jäätmeid, lihtsustades nende ladustamist. Reaktori eluea lõpus on reaktor võimalik lõppladestuskohta transportida terve moodulina. Väike võimsus ja passiivne ohutus on põhjuseks miks peetakse VMRe heaks võimaluseks riikidele, kus elektrivõrk (ja tarbimine) on väike ning kus puudub pikaajaline tuumaenergia kasutuse kogemus.

1.2 TUUMAJAAMA KONKURENTSIVÕIME REGIONAALSEL ELEKTRITURUL 2030-2040

Uurimistöö eesmärk on hinnata Fermi OÜ poolt kirjeldatud tuumaelektrijaama konkurentsivõimet regionaalsel elektriturul aastatel 2030-2040.

Uurimistöö metoodika

Tuumaelektrijaama tasuvuse hindamisel on arvesse võetud nii erainvestori investeeringu tasuvuse mõõde kui ka sotsiaalmajanduslik mõõde.

Tasuvuse hindamiseks on kasutatud sisemise kasuminormi ja puhasnüüdisväärtuse meetodeid. Erainvestori kapitali tootlikkuse jaoks on olulisemateks sisenditeks tuumaelektrijaama investeeringu-, hoolde-, käidu- ja kütusekulud ning võimalikud tulud energia müügist. Sotsiaalmajanduslike mõjutegurite analüüsimisel on arvesse võetud muutusi elektrisüsteemi kogukuludes ja tuludes, mille hulka kuuluvad elektritarbijate kulud energiale, tootjate kulud investeeringutele, kütusele, heitmetele ning kogu süsteemi keskkonnaheitmed.

Kuna tuumaelektrijaama ehitamise otsus ja selle mõjud on pikaajalise iseloomuga, sisaldab analüüs olulisel mahul ebamäärasust. Seepärast on traditsioonilist finantsanalüüsi täiendatud ka tundlikkuse analüüsiga, kus on testitud finantsanalüüsi tulemuste robustsust olulisemate muutuste suhtes.

Kõiki uurimistöös käsitletud tulevikustsenaariumid on modelleeritud Balmorel elektriturumudelil, kus on võimalik lahendada erinevat tüüpi optimeerimisprobleeme. Antud turumudelil on suur kasutajaskond ning sellega on eelnevalt teostatud mitmeid rahvusvahelisi ja Eesti siseid uuringuid, nt BENTE, Flex4RES ja ENMAK.

Balmorelis modelleeritud turupiirkond sisaldab andmeid järgnevate riikide või elektrisüsteemi osade kohta: Balti riigid, Skandinaavia, Saksamaa, Holland, Belgia, Prantsusmaa, Poola ja Suurbritannia.

Käesoleva analüüsi aluseks on Fermi Energia OÜ hinnangud neljanda generatsiooni tuumaelektrijaama kulude kohta ning arvutused elektrijaama tulude kohta päev-ette elektriturul.

Põhja-Euroopa energiasüsteemi modelleerimine 2030-2040

Tuumaelektrijaama käitumist Eesti elektriturul on uuritud IEA World Energy Outlook 2018 kirjeldatud kahe baasstsenaariumi makroökonomiliste parameetrite kontekstis: *Current Policies* ja *Sustainable Development* (vastavalt siis vähe- ja tugevalt ambitsioonikas kliimastsenaarium).

Mõlema salvestatud tulevikuvisiooni puhul on modelleeritud energiasüsteemi aastatel 2030-2040 koos ja ilma tuumaelektrijaamadeta: 1) 300 MW tuumaelektrijaam ilma energiasalvestita ja 2) 600 MW tuumaelektrijaam koos energiasalvestiga. Kokku on analüüsitud kuute erinevat tuumaelektrijaama stsenaariumit.

Analüüsitavad stsenaariumid erinevad teineteisest makroökonomiliste eelduste poolest, mis on sisestatud elektriturumudelisse Balmorel. Seejärel on modelleeritud energiasüsteemi talitlust kuni aastani 2040, lastes mudelil teha investimisotsuseid uutesse tootmisvõimsustesse ja

ülekanaliinidesse kulude minimeerimise põhimõttel. Investeerimisotsused mudeli tulemusena salvestatakse ning neid kahte teekonda tulevikku kasutatakse tuumaelektriijaama majandusliku mõju hindamise kontekstina.

Baasstsenaariumite tulemused

Modelleeritud stsenaariumite olulisim erinevus kogu analüüsitud turupiirkonna ulatuses tuleneb taastuvenergia tugevamas konkurentsivõimes suurema süsinikheitme hinna tõttu *Sustainable Development* stsenaariumis. Lisaks tuuleenergiale suurendavad antud stsenaariumis turuosa ka päikeseenergia ja biokütused. Kõige olulisemal määral kaotavad turuosa kütusena maagaasi kasutavad elektrijaamad.

Kui võrrelda stsenaariumite lõikes kogu modelleeritud piirkonna elektritootmise portfelle, siis *Current Policies* stsenaariumis pääseb turule ka teatud kogus tahkeid fossiilkütused põletavaid elektrijaamu. *Sustainable Development* stsenaariumi korral on nende kasutamine miinimumilähedane. Gaasiliste kütuste kasutamise erinevus 2040. aastaks on kahe stsenaariumi võrdluses juba kahekordne, mis on seotud otseselt antud kütuseid põletatavate elektrijaamade konkurentsivõimega suurema süsinikheitme hinna juures.

Ka Balti regioon järgib üldisemat trendi sarnaselt kogu modelleeritava piirkonna tulemustele. Hinnates Balti riikide tuleviku tootmisvõimsusi, siis kõrgem süsinikheitme hind motiveerib samuti tuuleenergeetika arengut. Summaarselt kasvatab koos tuuleparkidega turuosa ka biokütustele rajatud tootmine ning kaotab maagaasi põletavad elektrijaamad.

Eesti tulemustes on märkimisväärne põlevkivi kasutamise sisuline lõpetamine elektrienergia tootmises juba 2030. aastaks *Sustainable Development* stsenaariumi korral. Samuti peegeldub gaasiliste kütuste tarbimise vähenemise all uttegaasi konkurentsivõime drastiline langus suurema kliimamaksu korral. Summaarne elektrienergia tootmise tase on aga *Sustainable Development* stsenaariumi korral kõrgem. Kohalikest fossiilkütustele rajatud elektrijaamadest tootmata jäänud elektrienergia katavad eeskätt uued tuulepargid.

Balti riikide summaarne ja Eesti elektrienergia bilanss viitavad mõlemad sellele, et summaarsena jäävad Balti riigid importivaks piirkonnaks mõlemas stsenaariumis. Kuigi *Sustainable Development* stsenaariumi puhul on Eesti elektrienergia bilanss ligikaudu neutraalne tänu suuremale kogusele kasutatavale tuuleenergiale.

Sustainable Development stsenaariumis on märgatavalt kõrgemad aasta keskmised turuhinnad. Süsinikdioksiidi kvoodi märkimisväärselt kõrgem turuhind on fossiilkütuseid kasutavate elektrijaamade konkurentsivõimele olulisem kui mõnevõrra madalam kütusega varustamise hind. Modelleeritud ajavahemikul 2030-2040 on mudeli tulemusena *Sustainable Development* stsenaariumi aasta keskmine elektrituruhind Eesti hinnapiirkonnas 7-13 % kõrgem, kui *Current Policies* stsenaariumi puhul.

Elektrihinna kujunemine Eestis on seotud suurema mahu taastuvenergiaallikatele rajatud tootmisvõimsuste integreerimisega Eesti elektrisüsteemi. Seetõttu võrreldes *Current Policies* stsenaariumiga on *Sustainable Development* stsenaariumi korral märgata olulisemat suuremat volatiilsust elektrienergia tunnihindes.

Tuumaelektrijaama stsenaariumite tulemused

Võrreldes baasstsenaariumite tulemustega mõjub tuumaelektrijaama rajamine Eesti elektrienergia bilansile positiivselt. Samas on Eesti jätkuvalt summaarselt elektrienergiat importiv riik kogu modelleerimisperioodi ja uuritud stsenaariumite lõikes. Summaarselt on elektrienergia eksport suurem *Sustainable Development* stsenaariumis, millele viitasid ka baasstsenaariumite tulemused.

Elektrienergia tootmisvõimsuste portfell aastatel 2030 ja 2040 kõikide modelleeritud stsenaariumite puhul näitab, et tuumaelektrijaama lisamine Eesti elektrisüsteemi kahandab teatud määral tuuleparkide turuosa. Tuuleparkide väljatõrjumise määr aga väheneb üldjuhul energiasalvesti lisamisel, võimaldades katta tuuleparkide poolt võrku antavast toodangust tingitud ebahühtlust. Summaarne elektrienergia tootmisvõimsus Eestis on samuti suurim salvestiga stsenaariumites. See tähenda ühtlasi seda, et tuumaelektrijaama lisamisel turult väljatõrjutav tuuleenergia võimsus jääb väiksemaks kui tuumaelektrijaama poolt lisanduv võimsus.

Mõlema baasstsenaariumi juhul on tuumaelektrijaamal koos salvestiga võimalik elektriturult saadavat tulu suurendada. Energiasalvesti eelis kerkib suurema elektrituru hinna volatiilsuse tõttu rohkem esile kõrge süsinikheitme kvoodi hinna juures (*Sustainable Development*), kus 2040 aastal on elektriturult saadav tulu kerkinud 23% võrra võrreldes ilma salvestita tuumaelektrijaama variandi puhul. *Current Policies* stsenaariumis on sama näitaja märkimisväärselt madalam, piirdudes 14%-ga.

Tuumaelektrijaama integreerimine Eesti elektrisüsteemi ei too kaasa olulist muutust elektrienergia turuhinnas ühelgi uuritava stsenaariumi juhul. Kõikides stsenaariumites on märgata vähesel määral elektrienergia turuhinna langust, eriti modelleerimisperioodi algaastatel. Suurim muutus esineb 2030. aastal salvestiga tuumaelektrijaama lisamisel, kus on vastavalt *Current Policies* ja *Sustainable Development* stsenaariumites elektrienergia hind langenud 3 ja 3,5% võrra. Kui *Sustainable Development* stsenaariumis ei ole 2040. aastal hinnavahet tuumaelektrijaamaga ja ilma tuumaelektrijaamaga tulemuste vahel sisuliselt märgata, siis *Current Policies* stsenaariumis on ka 2040. aastal hind mõnevõrra madalam, olles baasstsenaariumi puhul 56,1 €/MWh ja salvestiga tuumaelektrijaama puhul 53,7 €/MWh. Ilma salvestita tuumaelektrijaama puhul siis vastavalt 55,3 €/MWh.

Tuumaelektrijaama lisandumine Eesti elektrituru piirkonda muudab teatud määral keskkonnanahaitmete taset. *Current Policies* stsenaariumis on baasstsenaariumi ja salvestiga tuumaelektrijaama stsenaariumite heitmete erinevus 7%. *Sustainable Development* stsenaariumis on suhteline muutus samas suurusjärgus, kuid kuna selles stsenaariumis on üldiselt märkimisväärselt madalamad heitmed, on absoluutne erinevus vähemärgatav.

Tuumaelektrijaama mõju *Current Policies* stsenaariumis toob tarbijateni väikese kogukulu alanemise, mis jääb 3,6% piiresse. *Sustainable Development* stsenaariumis on tarbijate kulude alanemine marginaalne. Mõlemas baasstsenaariumis on Eestis summaarselt elektrienergia müügist teenitud tulu tõusnud tuumaelektrijaama enda tulu arvelt. Ülejäänud elektrijaamad on tulu kaotanud turuosa vähenemise ja/või hinna alanemise tõttu.

Lihtsustatud finantsanalüüsi tulemused näitavad, et tuumaelektrijaama projekt on kasumlik kõikide analüüsitud stsenaariumite lõikes. Kõige suurem majanduslik tasuvus on saavutatav *Sustainable Development* stsenaariumi korral, kus ilma salvestita tuumaelektrijaama projekti sisemine tasuvus on 14,7% ning projekti rahavoogude nüüdisväärtus on 250 miljonit eurot.

Arvestades tänapäeva kliimapoliitika olukorda on peetud tõenäoliseks, et aja jooksul lisandub järjest rohkem ja rangemaid kliimapoliitilisi meetmeid. Seetõttu on stsenaariumi *Sustainable Development* realiseerumist peetud mõnevõrra tõenäolisemaks kui *Current Policies* stsenaariumi realiseerumist.

Tuumaelektrijaama sensitiivsusanalüüs *Sustainable Development* stsenaariumi korral näitab, et väikeste muutuste korral on projekti kasumlikkus võrdselt tundlik nii investeringukulu kui kapital hinna suhtes. Testitud sisendmuutujatest olulisim on aga elektrienergia turuhinna muutus. Elektrijaama projekti kasumlikkus läheneb nullile, kui elektrienergia turuhind on rohkem kui 20% võrra väiksem modelleeritud aastate keskmisest turuhinnast, milleks on 44 €/MWh.

Finantsanalüüsi põhimõtted

Käesoleva aruande eesmärk on hinnata Fermi OÜ poolt kirjeldatud tuumaelektrijaama (edaspidi TEJ) finantsilist tasuvust. Tasuvuse hindamisel saab olla mitu mõõdet, nt erainvestori investeeringu tasuvus ja ühiskonna jaoks sotsiaalmajanduslik tasuvus. Käesolevas aruandes on nii erainvestori kui ka ühiskonna seisukohast lähtuvalt analüüsitud TEJ projekti tasuvust erinevatel juhtudel.

Tasuvuse hindamiseks on kasutatud sisemise kasuminormi (IRR) meetodit, mille põhimõte seisneb kapitali tootlikkuse (i^*) hindamist vastavalt valemis 1.1 toodud seosele.

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1 + i^*)^t} = 0, \quad (1.1)$$

Erainvestori kapitali tootlikkuse jaoks on sisenditeks olulisemad sisendid TEJ investeeringu-, hoolde-, käidu- ja kütusekulud ning võimalikud tulud energia müügist.

Sotsiaalmajanduslike mõjutegurite analüüsimisel on arvesse võetud muutusi elektrisüsteemi kogukuludes ja tuludes, mille hulka kuuluvad elektritarbijate kulud energiale, tootjate kulud investeeringutele, kütusele, heitmetele ning kogu süsteemi keskkonnaheitmed.

Kuna TEJ ehitamise otsus ja selle mõjud on pikaajalise iseloomuga, sisaldab analüüs olulisel mahul ebamäärasust. Seepärast on traditsioonilist finantsanalüüsi täiendatud ka tundlikkuse analüüsiga, kus testitakse saavutatud finantsanalüüsi tulemuste robustsust olulisemate muutujate suhtes.

Järgnevas peatükis on täpsemalt käsitletud finantsanalüüsi jaoks oluliste andmete eelduste arväärtusi, olulisi algandmete allikaid ning eelduste püstitamise eeldusi.

Finantsanalüüsi ja tundlikkuse analüüsi tulemusi kirjeldab peatükk 3.

Finantsanalüüsi sisendid

Neljanda põlvkonna tuumaelektrijaamade disaini detailid on veel arendusjärgus, seega on TEJ kirjeldavad tehnilised ja finantsandmed seotud suurema ebamäärasusega kui traditsiooniliste elektrijaamade puhul. Käesoleva analüüsi aluseks on Fermi Energia OÜ hinnangud neljanda generatsiooni TEJ kulude kohta ning arvutused elektrijaama tulude kohta päev-ette elektriturul.

Fermi Energia OÜ poolt antud sisendandmed tuumaelektrijaama modelleerimiseks ja finantsanalüüsiks on esitatud tabelis 1.1.

Tabel 1.1. *Tuumaelektrijaama sisendandmed*

Parameeter	Väärtus
Investeeringu kulu (M€/MW)	2,5
Kütusekulu (€/MWh)	3
Püsikulu (€/MWh)	6
Väljundvõimsuse muutumise piirkiirus (MW/h)	puudub
TEJ salvesti investeeringu kulu (M€/MW)	0,7
TEJ salvesti kasutamise muutuvkulud	0
TEJ salvesti tsükli kaod (%)	0
Energiasalvesti minimaalne energiasaldus (MWh)	0
Energiasalvesti maksimaalne energiasaldus (MWh)	3600
Talitluskõlblikkus (%)	93

Käesolevas töös on TEJ tuludena analüüsitud ainult päev-ette elektriturult (spot turult) saadavat tulu. Elektriturul elektrienergia müügist saadav tulu sõltub tunnipõhisest elektrienergia hinnast ja müüdavast kogusest.

Kui ilma salvestita TEJ töötab ligikaudu baaskoormusena ja aasta läbi küllaltki ühtlase võimsusega, on tema poolt saadav tulu võrdne ligilähedaselt tema võimsuse ja aasta keskmise elektrienergia turuhinna korrutisega.

Energiasalvestiga TEJ-l on aga võimalus toodangut paindlikult ajastada ning päev-ette elektriturult saadavat tulu maksimeerida. Oluline on samaaegselt arvesse võtta nii elektri turuhinna kõikumist tundide lõikes kui ka TEJ salvesti võimalikku paindlikkust. Eelnevat arvesse võttes ei piisa käesolevas analüüsis lihtsast elektrituruhinna eeldusest, vaid on vaja uurida TEJ käitumist elektriturul detailsemalt, mistõttu on elektriturul toimivat uuritud elektrituru mudeliga Balmorel. Balmorel võimaldab modelleerida elektrijaamade talitlust päev-ette turul. Mudeli väljundina on käesolevas analüüsis kasutatud TEJ poolt elektriturult saadavat tulu.

Balmorel mudeli kirjeldust ning analüüsis rakendamist kirjeldab järgnev peatükk.

Elektrituru mudel Balmorel

Kõiki uurimistöös käsitletud tulevikustsenaariumid on modelleeritud Balmorel elektrituru mudelis [3], mis põhineb lineaarprogrammeerimise põhimõttel. Balmorel on kirjutatud optimeerimiskeskonnas GAMS (General Algebraic Modeling System). GAMS on suurte probleemide lahendamiseks mõeldud keskkond, kus on võimalik lahendada erinevat tüüpi optimeerimisprobleeme. Balmorelis optimaalse lahenduse leidmiseks kasutatakse Simplex algoritmil põhinevad lineaarprobleemide lahendajat CPLEX.

Balmoreli sihifunktsioon summeerib elektri- ja kaugküttesoojusega varustamise kogukulud simuleeritavas piirkonnas. Seega on mudeli lahendiks igakordselt vastavalt kasutaja seatud tingimustele odavaim viis elektrienergia ja kaugküttesoojuse tarbimisnõudluse rahuldamiseks.

Balmorel mudeli eelised ja piirangud

Balmorel mudelil on mitmeid eeliseid teiste turumudelite ees:

- Suur kasutajakogukond;
- Vabavaraline (kood kontrollitav ja täiendatav);
- On teostatud Eestis mitmeid uuringuid: ENMAK, BENTE [4] jne.

Samas on Balmorel mudelil ka rida piiranguid:

- Balmorel vaatleb tunnipõhist tarbimise-tootmise tasakaalu, sarnaselt elektriturule;
- Ei kajasta elektrivõrgu tehnilisi parameetreid (pinge, sagedus, stabiilsus jt.);
- Ei modelleerita elektrisüsteemi süsteemiteenuseid;
- Ühe elektrituru hinnapiirkonna (näiteks Eesti) siseseid elektrienergia vooge ei vaadelda, hinnapiirkonna siseselt on tegu „*Copper plate*“ lähenemisega.

Modelleeritud turupiirkond

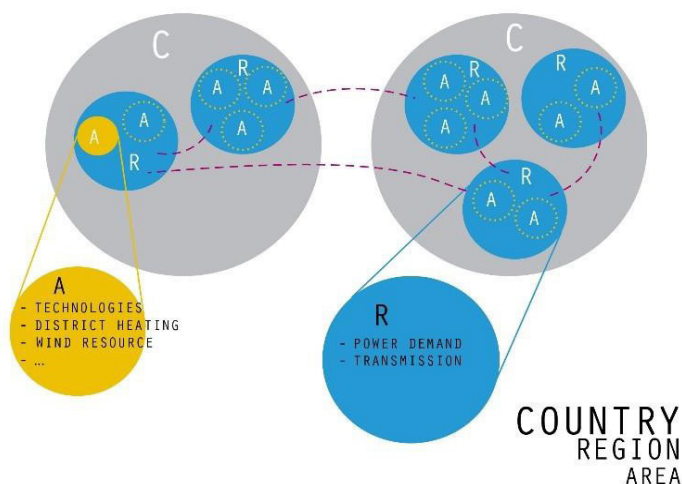
Balmoreli mudel kujutab elektrisüsteemi mitmel tasemel geograafiliste piirkondadena. Suurim geograafiline jaotis on riik (*Country*) või kui kogu riiki ei ole mudelis otstarbekas kajastada siis ühe riigi teatav elektrisüsteemi osa, (näitena Venemaa Kaliningradi oblast). Tallinna Tehnikaülikoolis kasutatud Balmoreli andmestik sisaldab andmeid joonisel 1.1 „sinisega“ markeeritud riikide või elektrisüsteemi osade kohta.



Joonis 1.1. *TTÜ Elektroenergeetika ja Mehhatroonika instituudis kasutatud Balmoreli versiooni andmestiku geograafiline mastaap*

Hinnapiirkondade tasemel on defineeritud mudelis elektritarbimised ja hinnapiirkondade vahel elektrienergia ülekandevõimsused, mis lubab ka mudelis igas hinnapiirkonnas leida elektri hinna.

Täpsemate andmete sisestamiseks on hinnapiirkonnad veel omakorda jagatud alampiirkondadeks (Area), millega on seotud elektritootmise tehnoloogiad ja ka näiteks kaugküttesoojuse tarbimised, mis lubab ühes hinnapiirkonnas simuleerida mitut kaugküttepiirkonda. Alampiirkonna piires on võimalik defineerida lokaalseid elektrienergia tootmisega seonduvaid tegureid, näiteks tuuleenergia või hüdroenergia ressurss aasta jooksul. Balmorel geograafia ülesehituse põhimõtteskeem on ära toodud joonisel 1.2.



Joonis 1.2. Geograafia ülesehituse põhimõtteline skeem mudelis Balmorel

Modelleerimise ajahorisont

Simulatsioonis sisalduv ajahorisont on vabalt muudetav ning võib ulatuda ühest tunnist kuni paljude aastateni. Detailsete modelleerimisülesannete korral on võimalik simuleerida süsteemi talitlust tunnipõhiselt, vaadeldes ühte nädalat korraga. Pikema ajahorisondiga ülesannete puhul on võimalik mudelil otsuseid langetada pidades silmas energiasüsteemi arengut mitme aasta jooksul korraga. Modelleerimisülesande lahendi leidmise aeg on tugevalt sõltuvuses mudeli ajalisest keerukusest, korraga vaadeldavate tundide ja aastate arvust. Seetõttu on tavapäraselt mudeli aasta kirjeldatud lihtsustatud kujul. Kuigi NordPoolSpot elektriturul selgitatakse elektrienergia turuhind igaks tunniks, siis mudelis kirjeldatakse aasta sees kujunevat tootmise ja tarbimise dünaamikat lihtsustatud kujul.

Käesolevas analüüsis vaadeldakse iga modelleeritud aastat üksikuna ning aasta siseselt on aeg kirjeldatud 8 hooaja abil, mis kujutavad ressursside kasutatavust ning tarbimise muutumise sesoonsust. Iga hooaja sees on kujutatud 72 ajaühikut, millest esimesed 48 kirjeldavad tööpäevade dünaamikat ning 24 nädalavahetuse dünaamikat. Seega on käesolevas lihtsustatud mudelis aasta kirjeldatud 576 ajaühiku abil. Nende ajaühikute sees on välja toodud nii tarbimise kui ka ressursside hooajalisus, miinimum- ja maksimaalväärtused, tagades lihtsustatud kujutise tõeläheduse.

Baltimoreli mudeli sisendid ja väljundid

- **Mudeli olulisemad sisendid:**
 - Elektrienergia ja soojuse tootmise võimsused;
 - Ülekandevõimsused;
 - Kütuste hinnad, heitmete hinnad, maksud;
 - Elektrienergia ja kaugküttesoojuse tarbimised;
 - Kasutatavad (uued) tehnoloogiad ja nende hinnad.
- **Mudeli olulisemad väljundid**
 - Elektrienergia ja soojuse tootmine elektrijaamade kaupa;
 - Kütuste kasutus;
 - Elektrituru hinnad;
 - Elektrienergia vood;
 - Heitmed;
 - Investeeringud uutesse tootmisvõimsustesse ja ülekandevõimsustesse;
 - Eelnevatest arvatavad majandusnäitajad.

Tootmistehnoloogiate kirjeldamine mudelis

Elektri- ja koostootmise tehnoloogiad on sisestatud mudelisse alampiirkondade tasemel. Tehnoloogiad võib sisestada nii üksikelemendi täpsusega kui ka agregeeritud kujul. Igal mudelis oleval tehnoloogial on hulk sisendandmeid, mis määravad selle tehnoloogia kasutusvõimaluse mudeli piires.

Tähtsamad elektrijaama käitumist simulatsioonis kirjeldavad parameetrid on:

- Netovõimsus;
- Kasutegur;
- Elektrijaama tüüp (kondensatsiooni-, vaheltvõtu-, vastutõhuruturbiin, elektrituulik jne);
- Koostootmisjaamade soojuse tootmist väljendavad muutujad;
- Elektrijaama muutuvkulud.

Mudelis on võimalik simuleerida olulisemate elektrienergia ja kaugküttesoojuse tootmises rolli mängivate tehnoloogiate käitumist, nagu soojuselektrijaamad, tuulepargid, päikesepaneelid, hüdroelektrijaamad, energiasalvestid, soojuspumbad.

Mudelis kasutatud sisendandmed

Balmorel mudelis kajastuvad turu- ja tehnoloogiate andmed on võetud järgmistest allikatest:

- Tootmisvõimsuste andmed on kogutud Flex4RES projekti [5] raames Eesti, Läti, Soome, Rootsi, Norra ja Taani ülikoolide teadlaste poolt;
- Tehnoloogia hinnad ja hindade prognoosid on mudeldatud Taani tehnoloogiakataloogi alusel (Technology data for Energy plants for Electricity and District heating generation) [6];
- Maagaasi, kivisöe ja süsinikheitme hinnad on võetud World Energy Outlook 2018 alusel (*Current Policies ja Sustainable Development*) [1];
- Ülekandevõimsused on võetud ENTSO-E TYNDP 2018 [7] arengukava analüüsist.

Mudelis kasutatud piirkondlikud elektrienergia ülekandevõimsused on esitatud tabelis 1.2 [7].

Tabel 1.2. Riikide vaheliste ühenduste ülekandevõimsused

Lähtepiirkond	Sihtpiirkond	Ühendusvõimsus pärisuunas (MW)	Ühendusvõimsus vastusuunas (MW)
Eesti	Soome	1016	1016
Eesti	Läti	1379	1379
Soome	Rootsi 1	2000	2000
Soome	Rootsi 3	1200	1200
Leedu	Läti	1200	1500
Leedu	Poola	1000	1000

Mudeli tehnoloogiakataloog koosneb paljudest elektrienergia tehnoloogiatest, millesse mudelil on võimalik investeerida. Aastatel 2030 ja edasi on eeldatavasti olulisemad madala süsinikusisaldusega elektrienergia tootmise tehnoloogiad: tuulepargid, päikesepaneelid, biokütustel elektrijaamad ja teatud määral maagaasil põhinevad tootmisvõimsused. Nimetatud olulisemate tehnoloogiate põhilised majanduslike parameetrite eeldused on toodud tabelis 1.3.

Tabel 1.3. Balmorel mudelis kirjeldatud tootmistehnoloogiate majanduslikud parameetrid

Tehnoloogia	Investeeringukulu (M€/MW)	Muutuvkulu (€/MWh)	Püsikulu (€/MW/a)	Kasutegur (%)
Maismaatuulepark	1,04	1,35	12 600	100
Meretuulepark	1,93	2,7	36053	100
Päikeseelektrijaam	0,51	0	6500	100
Kombineeritud tsükliga gaasiturbiinelektrijaam	0,83	4,2	27800	63
Lihttsükliga gaasiturbiinelektrijaam	0,56	4,2	18600	43

Tabelis 1.3 toodud investeeringute hinnad põhinevad Taani Energiaagentuuri ja Taani elektrija maagaasi põhivõrguoperaatori Energineti dokumendil [6]. Dokumenti uuendatakse pidevalt ning see on oma põhjalikkuse ja usaldusväärsuse tõttu olnud mitmete suurte modelleerimisprojektide algandmete allikas (nt ENMAK, NETP; Flex4RES). Tehnoloogiate investeeringukulude hindades peegelduvad erinevad hinnakomponendid, nagu kulu materjalidele ja

seadmetele, kulu püstitamisele, maa ostuks, võrguühendusele ja muule. Näiteks moodustab andmestikust esitatud maismaatuulepargi investeringukulust kulu võrguehituse väljaehitusele 0,05 M€/MW ning meretuulepargi korral 0,36 M€/MW.

Käesolevas analüüsis ei ole lubatud mudelil investeerida Põhjamaades kõige laialdasemalt kasutatavale taastuvenergiaallikasse, hüdroenergiasse. Nimetatud eeldust on kasutatud ka mitmetes varasemates uuringutes, kuna praegustes tingimustes on Põhja-Euroopas hüdroenergia ressurss praktiliselt ammendunud.

Elektrienergia pikaajaline tarbimise prognoos Eesti jaoks põhineb Eleringi 2019. aasta Varustuskindluse aruandel. Muude riikide jaoks on kasutatud BENTE projektis rakendatud elektrienergia tarbimise prognoose [2] [3].

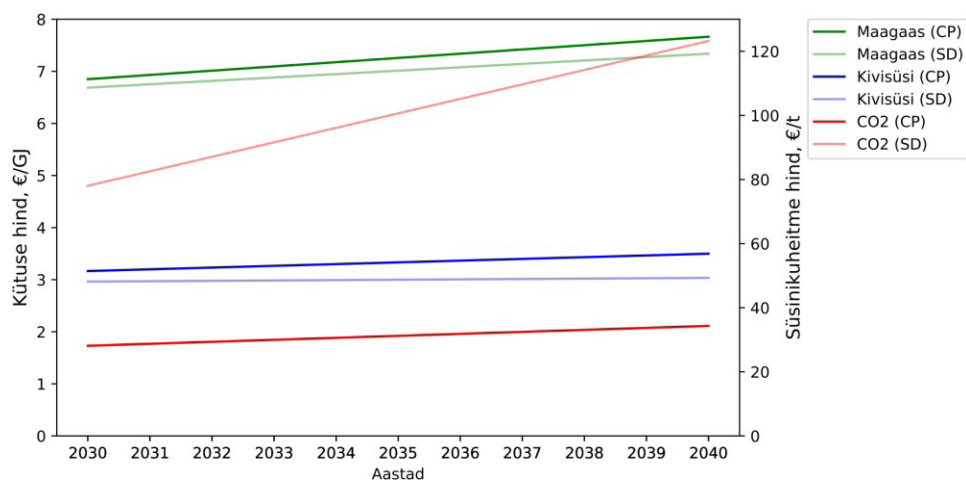
PÕHJA-EUROOPA ENERGIASÜSTEEMI MUDELDAmine 2030-2040

Baasstsenaariumid

Baasstsenaariumid on valitud hindamaks TEJ konkurentsivõimest ja rollist varustuskindluse ja kliimapoliitika eesmärkide tagamisel kahe erineva turu iseloomu korral, lähtudes IEA aruandest World Energy Outlook 2018 [1]:

- 1) Baasstsenaarium I „Sustainable Development“ (edaspidi SD): Ambitsioonika kliimapoliitika eesmärgi täitev ja suures osas taastuvatel energiaallikatel rajanevatele tootmisvõimsustele tuginev turukeskkond:
 - kõrge CO₂ kvoodi hind;
 - madalam fossiilkütuste hind.
- 2) Baasstsenaarium II „Current Policies“ (edaspidi CP): Tavapärasem, suuremas mahus fossiilkütuseid eksploateeriv turukeskkond:
 - madal CO₂ kvoodi hind;
 - kõrgem fossiilkütuste hind.

Baasstsenaariumite süsiniku kvoodi ja kütuste hindasid illustreerib joonis 1.3.



Joonis 1.3. Baasstsenaariumite süsiniku kvoodi ja kütuste hindade prognoos

Teineteisest makroökonomiliste eelduste poolest erinevad stsenaariumid sisestatakse elektrituru mudelisse Balmorel ja seejärel modelleeritakse energiasüsteemi talitlust kuni aastani 2040, lastes mudelil teha investeerimisotsuseid uutesse tootmisvõimsustesse ja ülekandeliinidesse kulude minimeerimise põhimõttel. Investeerimisotsused mudeli tulemusena salvestatakse ning neid kahte teekonda tulevikku kasutatakse TEJ majandusliku mõju hindamise kontekstina.

Tuumaelektrijaama stsenaariumid

Tuumaelektrijaama stsenaariumite puhul on koos töö tellijaga kirjeldatud kaks stsenaariumit:

- TEJ stsenaarium 1: tuumaelektrijaam nimivõimsusega 300 MW;
- TEJ stsenaarium 2: tuumaelektrijaam nimivõimsusega 300 MW + 300 MW energiasalvesti.

TEJ talitus on Balmorel mudelis kirjeldatud järgmiselt:

- TEJ võimsus sisestatakse baasstsenaariumi alusandmetega mudelisse ette antud võimsusega ning vaadeldakse selle talitlust modelleeritava perioodil:
 - Muutuvkulud;
 - Tulud elektri müügist.
- Energiasalvestiga TEJ modelleeritakse spetsiaalse tootmisvõimsusega millega on vahetult seotud salvesti
- Energia väljub elektrijaamast salvestisse ja salvestist võrku
- Energiasalvestile on määratud:
 - Minimaalne energiasaldus (0);

- Maksimalne energiasisaldus (3600 MWh);
- Sisend-ja väljundvõimsused (vastavalt siis 300 MW ja 600 MW).
- Salvesti opereerib mudelis ise optimaalsel režiimil, st salvesti talitlust elektriturul lubatakse optimeerida mudelil, mis võimaldab TEJ-l salvestit kasutada parimal võimalikul moel ja seeläbi tulusid maksimeerida.

Analüüsitavad turuväljundid

Elektrituru talitlust uuritakse läbi järgnevate mudeli turuväljundite:

- TEJ mõju regionaalsele elektriturule, sh mõju:
 - summaarsele õhuheitmete kogusele, sh Euroopa Liidu ja Eesti kliima- ja energiapoliitika eesmärkide täitmine;
 - varustuskindlusele/energiajulgeolekule;
 - Eesti energiabilansile;
 - tarbijate ja tootjate kuludele/tuludele.
- TEJ elektriturul opereerimisel saadav tulu;
- TEJ talitlusega seonduvad kulud.

Turuväljundeid analüüsitakse ajavahemikul 2030-2040, kaheaastase sammuga.

Tulude-kulude analüüsi raames analüüsitakse vaid Eesti hinnapiirkonda. Teiste Balti riikide kohta tuuakse välja vaid summaarsed numbrid.

STSENAARIUMITE TULEMUSED

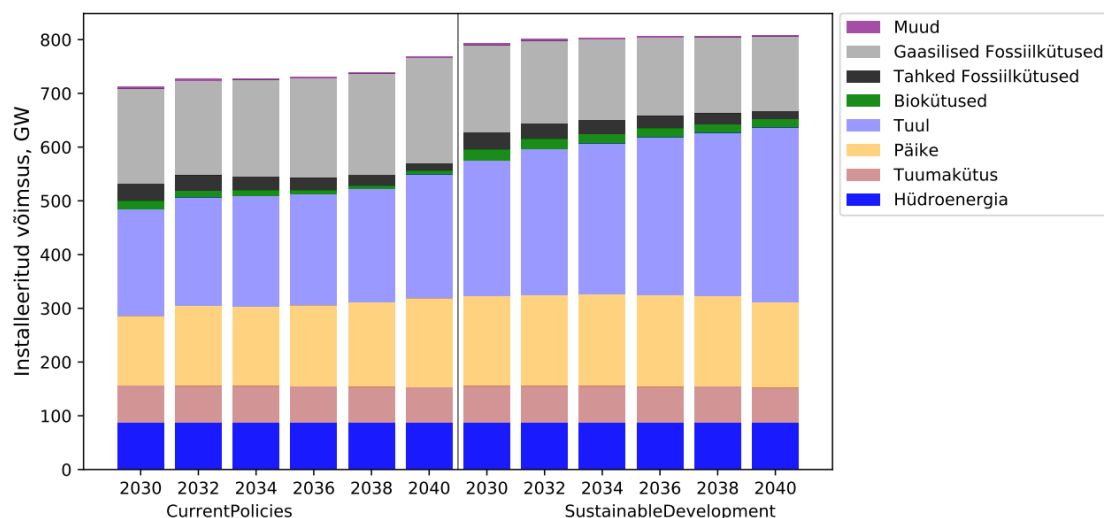
Käesolevas peatükis tutvustatakse modelleerimisülesande tulemusi. Peatükk 2.1 keskendub baasstsenaariumite tulemusetele, analüüsides energiasüsteemi arengut valitud põhistsenaariumites ilma uue TEJ rajamiseta. Peatükk 2.2 kirjeldab konkreetsete TEJ stsenaariumitega kaasnevaid olulisemaid muutusi elektriturul ning elektrisüsteemi toimimises.

Baasstsenaariumite tulemused

Käesoleva peatüki eesmärk on kirjeldada mudeli tulemusi vastavalt makromajanduslikele aluseeldustele ning luua ülevaade elektrisüsteemi arengust regionaalsel tasemel ja Eestis ilma TEJ-ta.

Mudeldatud piirkonna elektrienergia tootmisvõimsused

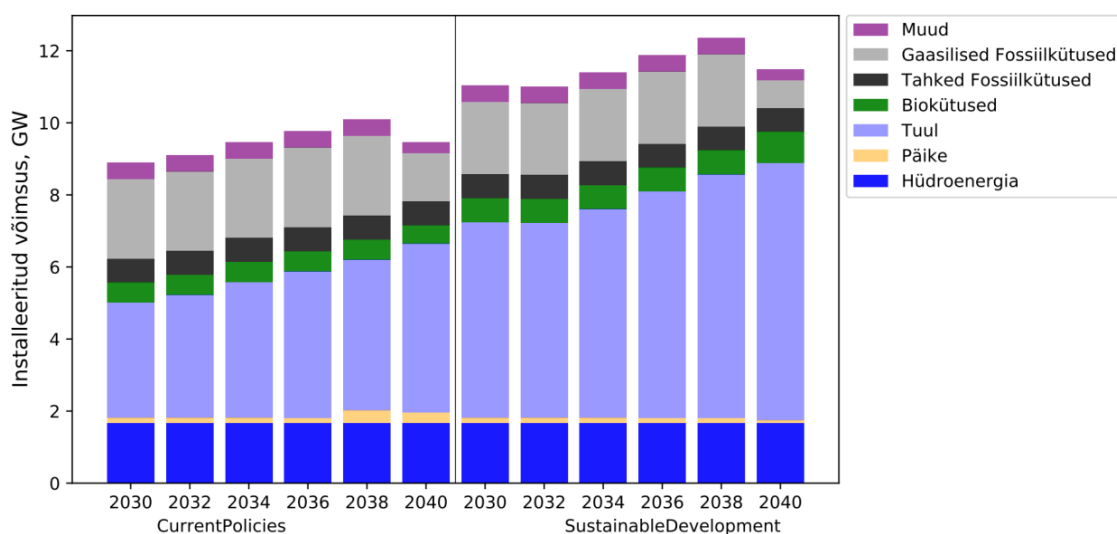
Mudeldatud piirkonna elektrienergia tootmisvõimsuste prognoosid on esitatud joonistel 2.1 – 2.3.



Joonis 2.1. Kogu mudeldatud piirkonna tootmisvõimsuste areng ajaperioodil 2030 – 2040

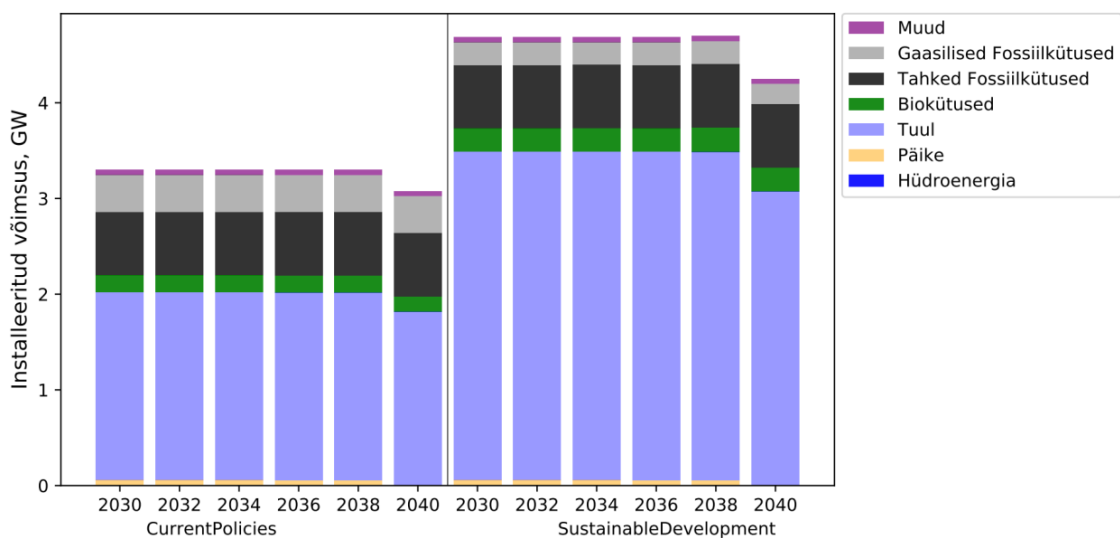
Joonisel 2.1 on näha, et stsenaariumite olulisim erinevus on tuuleenergia suuremas konkurent-sivõimes suurema süsinikheitme hinna tõttu SD stsenaariumis. Mõnevõrra on turuosa suu- rendanud ka päikeseenergia ja biokütuste osakaal. Kõrge süsinikheitme hinna korral kaotavad turuosa kõige olulisemal määral kütusena maagaasi kasutavad elektrijaamad.

Sarnane trend ilmneb ka jooniselt 2.2 Balti riikide tootmisvõimsusi jälgides, kus kõrgem sü- sinikheitme hind motiveerib olulisel määral tuuleenergeetika arengut. Ka Balti riikides sum- maarselt kasvatavad koos tuuleenergiaga turuosa biokütused ning kaotab maagaas.



Joonis 2.2. Balti riikide tootmisvõimsused perioodil 2030 – 2040

Eesti tootmisvõimsuste areng on välja toodud joonisel 2.3. Eestisse on tuuleparkide rajamine koondunud modelleeritava perioodi algusesse, pärast mida enam uusi tuuleparke ei ole rajatud. 2040. aastal on märgata teatavat tuuleparkide installeeritud võimsuse vähenemist, mis tuleneb praeguste tuuleparkide eluea lõppemisest.

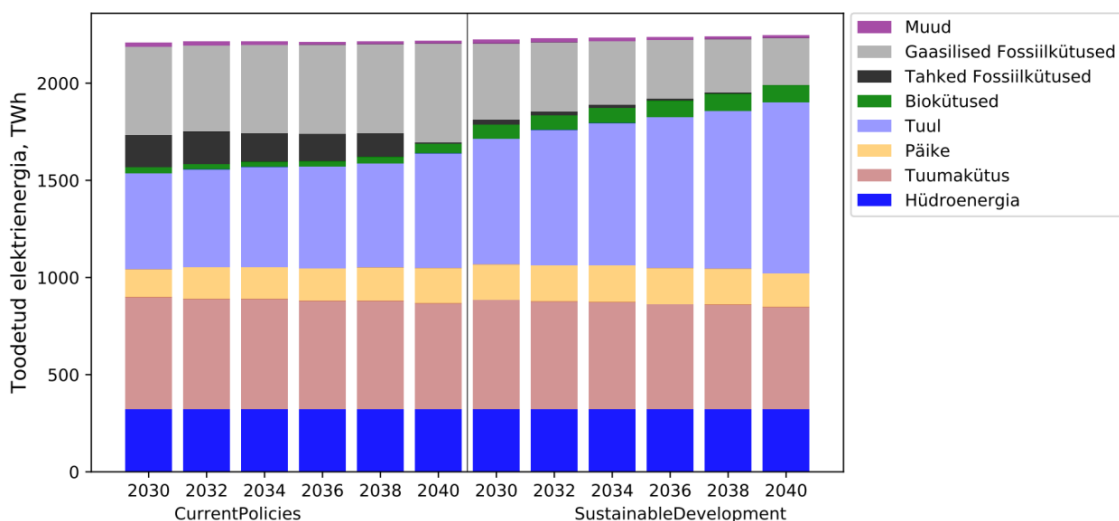


Joonis 2.3. Eest tootmisvõimsused perioodil 2030 – 2040

Kõige olulisemad muutused Eesti elektrisüsteemi tootmisvõimsuse portfellis ongi seotud tuuleenergiaga, kus toimub lõviosa kogu muutustest. Kahe stsenaariumi erinevuses võib veel märkata, et süsinikheitme hinna kasvades loovutab maagaas osaliselt oma turuosa biomassile.

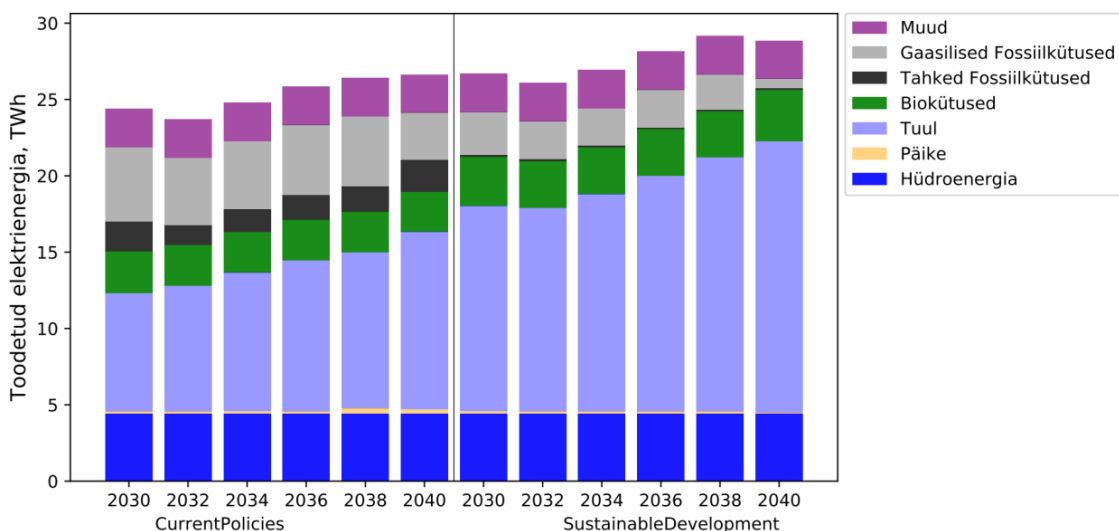
Elektrienergia tootmine mudeldatud turupiirkonnas

Mudeldatud piirkonna elektrienergia toodanguproгноosid on esitatud joonistel 2.4 – 2.6.



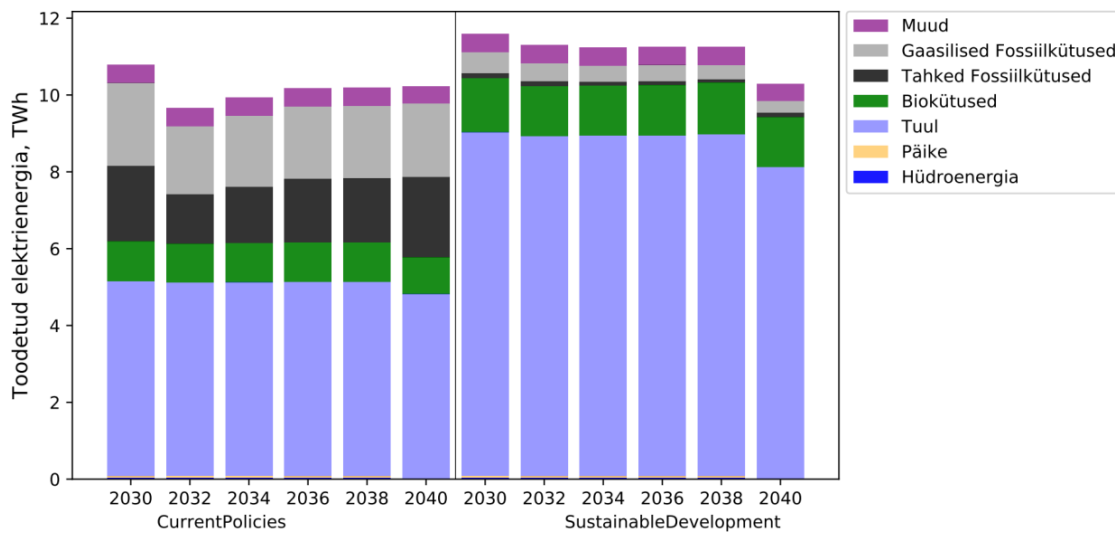
Joonis 2.4. Kogu mudeldatud piirkonna elektrienergia toodang perioodil 2030 – 2040

Kui võrrelda stsenaariumite lõikes kogu modelleeritud piirkonna elektritootmise portfelle on näha, et kui CP stsenaariumis pääseb ka teatud kogus tahkeid fossiilkütused põletavaid elektrijaamu turule, siis SD stsenaariumis on nende kasutamine miinimumilähedane. Märkimisväärset turuosa kõrgema süsinikheitme hinna juures kasvatab tuule- ja bioenergia, mida oli juba ka märgata tootmisvõimsuste joonistelt 2.1. Gaasiliste kütuste kasutamise erinevus 2040. aastaks on kahe stsenaariumi võrdluses kahekordne, mis viitab otseselt antud kütuseid põletatavate elektrijaamade konkurentsivõime vähenemisele.



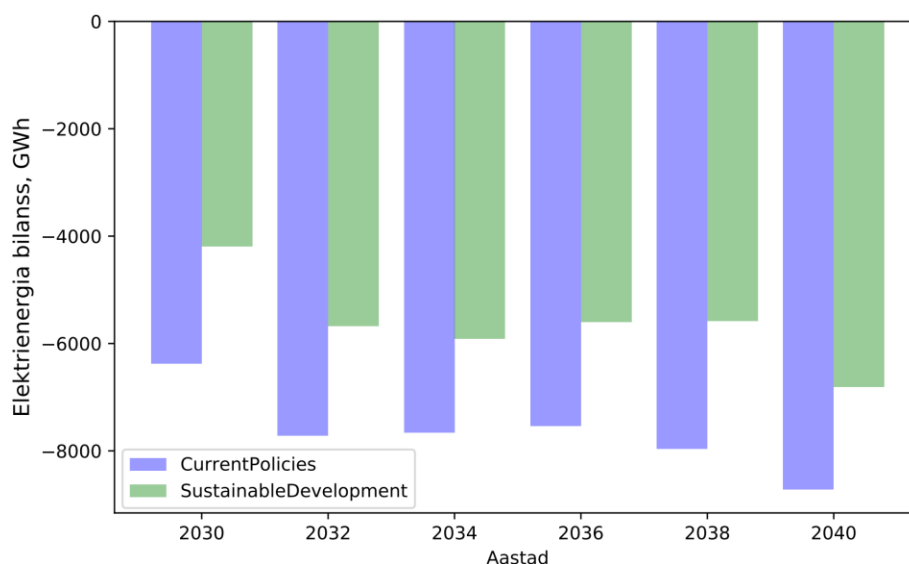
Joonis 2.5. Balti riikide elektrienergia toodang perioodil 2030 – 2040

Ka Balti regioon järgib mudeli üldisemat trendi sarnaselt kogu modelleeritavale piirkonnale. Eesti tulemustes on märkimisväärne tahkete kütuste ehk siis põlevkivi kasutamise sisuline lõpetamine elektrienergia tootmises juba 2030. aastaks kõrge süsinikheitme hinnaga SD stsenaariumi korral. Samuti peegeldub gaasiliste kütuste tarbimise vähenemise all uttegaasi konkurentsivõime drastiline langus suurema kliimamaksu korral. Summaarne elektrienergia tootmise tase on aga ambitsioonika kliimaststsenaariumi korral kõrgem. Kohalike fossiilkütuste tootmata elektrienergia katavad SD stsenaariumi korral eeskätt uued tuulepargid.



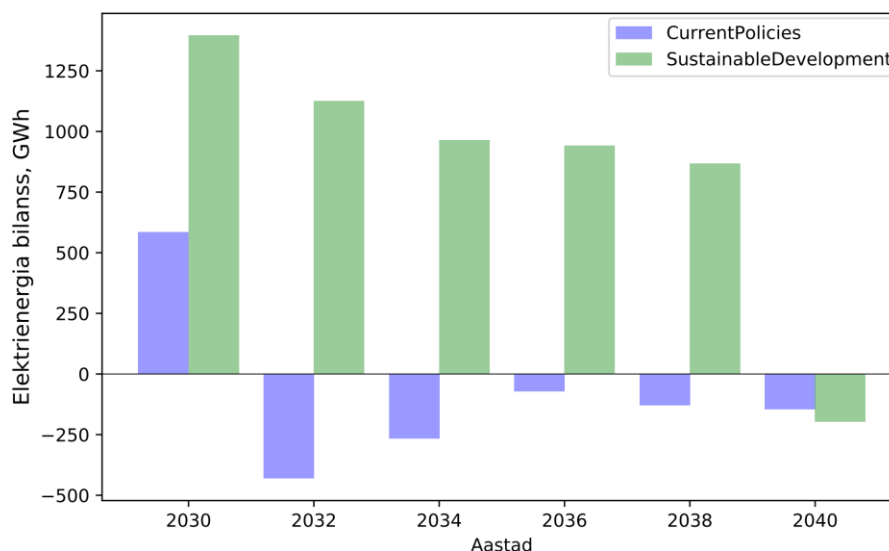
Joonis 2.6. Eesti elektrienergia toodang perioodil 2030 - 2040

Joonistel 2.7 ja 2.8 esitatud Balti riikide summaarne ja Eesti elektrienergia bilanss viitavad üheselt, et summaarsena jäävad Balti riigid importivaks piirkonnaks mõlemas stsenaariumis.



Joonis 2.7. Balti riikide elektrienergia bilanss perioodil 2030 – 2040

Kuigi CP stsenaariumi puhul on mudeli tulemusena märgata elektrienergia summaarset defitsiit Eestis, moodustab defitsiit väikese osa kogutarbimisest. SD stsenaariumi puhul on Eesti baasstsenaariumis elektrienergiat eksportiv riik kuni aastani 2040 kui tööst lähevad eluea lõppemise tõttu välja 2019. aasta seisuga Eestis püstitatud tuulepargid.

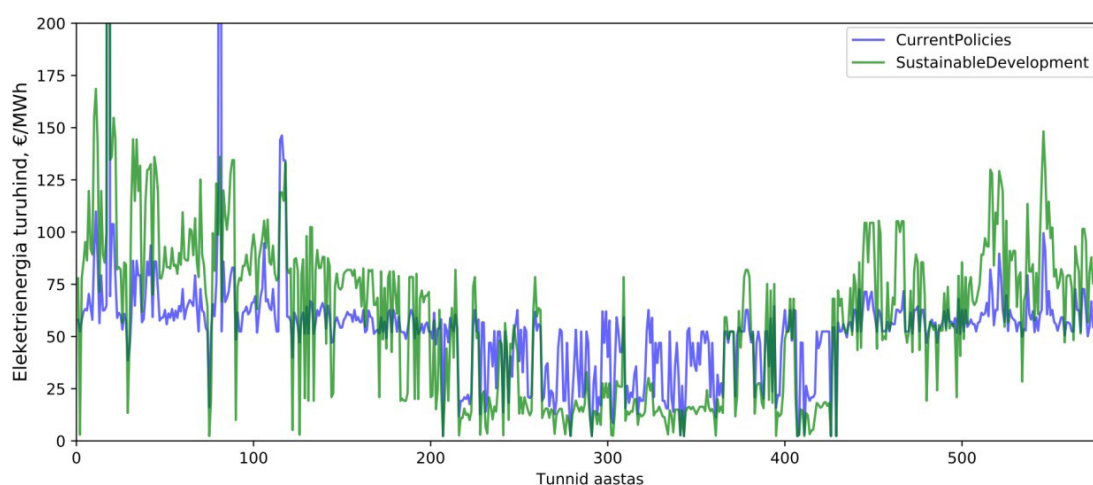


Joonis 2.8. Eesti elektrienergia bilanss perioodil 2030 – 2040

Elektrihinna kujunemine Eestis

Kuna SD stsenaariumi tootmisportfellis sisaldub märgatavas mahus rohkem varieeruva tootlikkusega taastuvenergiaallikaid, võib eeldada, et võrreldes CP stsenaariumiga on tulemustes märgata ka kõrgemat elektrienergia turuhinna volatiilsust.

Joonisel 2.9. on kuvatud elektrienergia turuhind modelleeritud tundide jooksul Eesti elektrituru hinnapiirkonnas aastal 2040. Joonisel on selgelt näha, et elektri turuhinna dünaamika on stsenaariumites selgelt erinev.

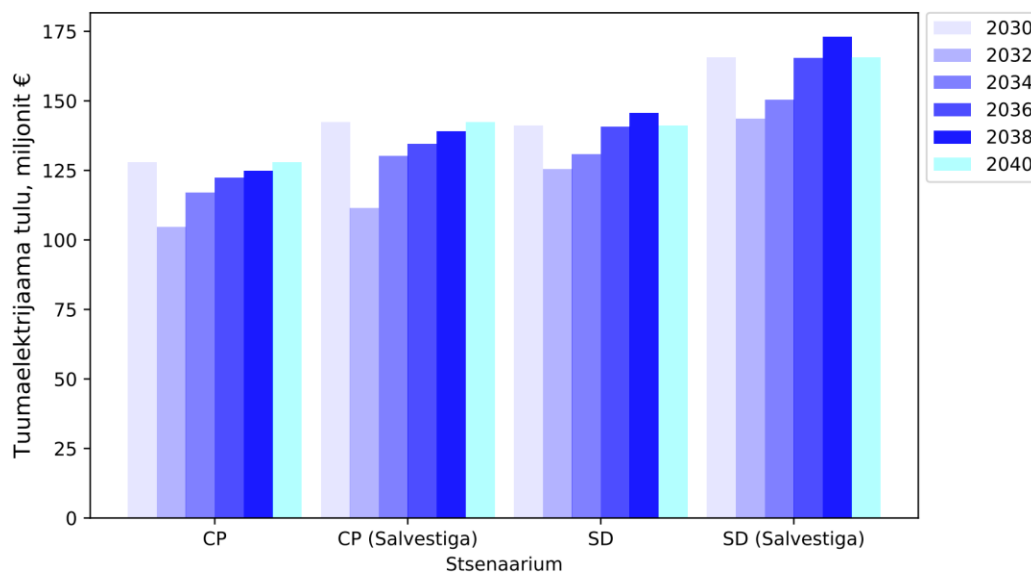


Joonis 2.9. Eesti elektrituru piirkonna hind mudeli väljundina 2040. aastal tundide lõikes

SD stsenaariumis on ka märgatavalt kõrgemad aasta keskmised turuhinnad. Süsinikdioksiidi kvoodi märkimisväärselt kõrgem turuhind on fossiilkütuseid kasutavate elektrijaamade konkurentsivõimele olulisem kui mõnevõrra madalam kütusega varustamise hind. Modelleeritud ajavahemikul 2030-2040 on mudeli tulemusena SD stsenaariumi aasta keskmine elektrituruhind Eesti hinnapiirkonnas 7-13 % kõrgem, kui CP stsenaariumi puhul.

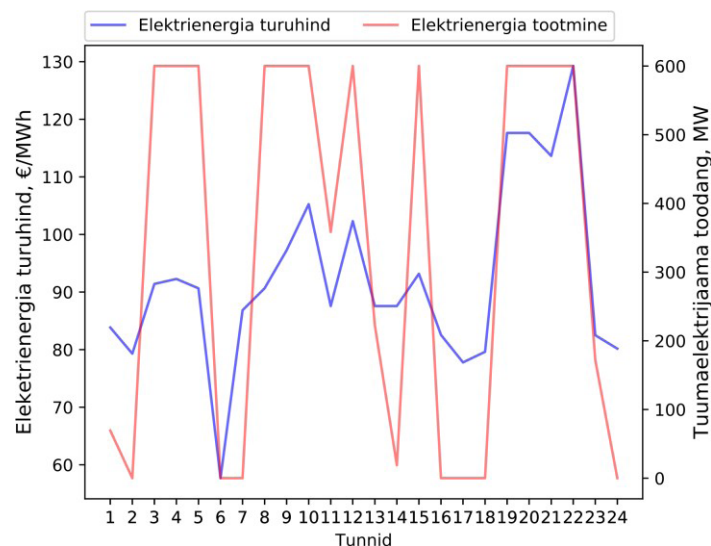
Tuumaelektrijaama stsenaariumite tulemused

Olulisim väljundparameeter käesolevas modelleerimisülesandes mudeli tulemustest on TEJ poolt päev-ette elektriturult saadav tulu elektrienergia müügist. Nimetatud tulemus on esitletud joonisel 2.10.



Joonis 2.10. Modelleeritud tuumaelektrijaama tulu elektrienergia müügist päev-ette elektriturult

Jooniselt on näha, et mõlema stsenaariumi juhul on salvestiga võimalik elektriturult saadavat tulu suurendada. Energiasalvesti eelis kerkib suurema elektrituruhinna volatiilsuse tõttu rohkem esile kõrge süsinikheitme kvoodi hinna juures, kus 2040 aastal on elektriturult saadav tulu kerkinud 23% võrra võrreldes ilma salvestita variandiga. CP stsenaariumis on sama näitaja märkimisväärselt madalam, piirdudes 14%-ga.



Joonis 2.11. *Energiasalvesti poolt turule müüdav elektrienergia 24h jooksul*

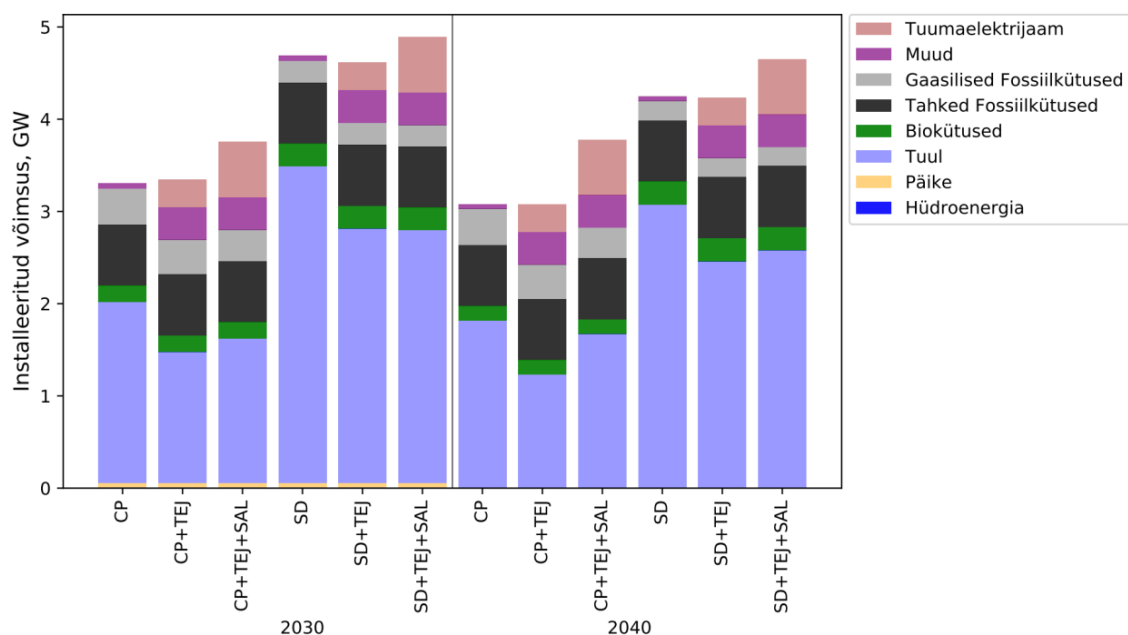
Energiasalvesti kasutamist elektriturul kasumi maksimeerimiseks illustreerib joonis 2.11, kus on kõrvutatud 24 järjestikkuse modelleeritud tunni jooksul elektrienergia turuhind ja salvestiga TEJ-st elektrivõrku antav elektrienergia tootang. Selgelt on märgatav tootmise ajastamine kõrgema elektrienergia turuhinnaga tundidele.

Tuumaelektrijaama mõju Eesti elektrituru hinnapiirkonnale

Kõikides stsenaariumites on märgata vähesel määral elektrienergia turuhinna langust, eriti modelleerimisperioodi algaastatel. Suurim muutus esineb 2030. aastal salvestiga TEJ lisamisel, kus on vastavalt CP ja SD stsenaariumites elektrienergia hind langenud 3% ja 3,5% võrra. Kui SD stsenaariumis ei ole 2040. aastal hinnavahet TEJ-ga ja ilma TEJ-ga tulemuste vahel sisuliselt märgata, siis CP stsenaariumis on ka 2040. aastal hind mõnevõrra madalam, olles baasstsenaariumi puhul 56,1

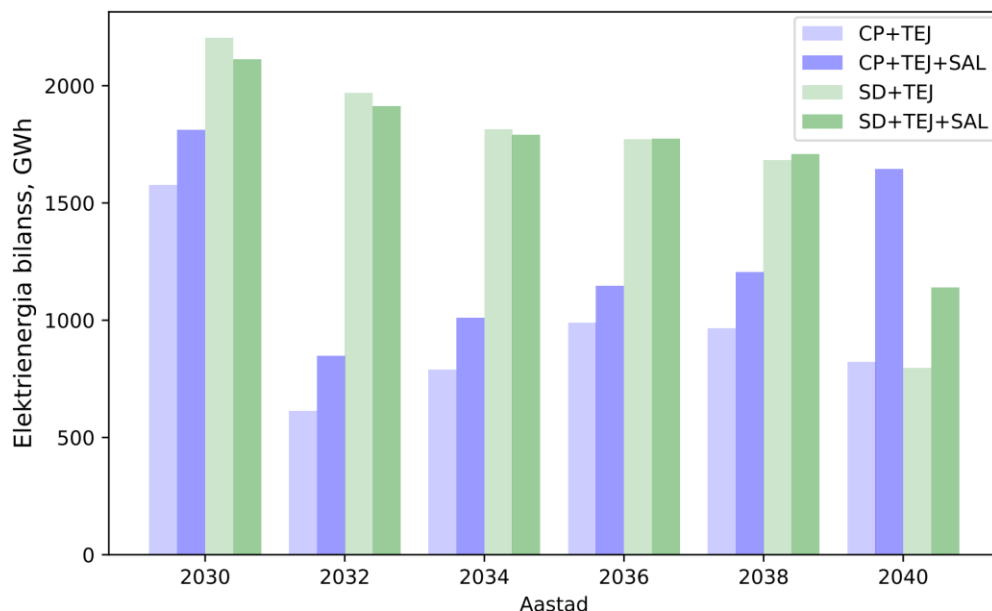
€/MWh ja salvestiga TEJ puhul 53,7 €/MWh. Ilma salvestita TEJ puhul siis vastavalt 55,3 €/MWh. Käesolevad tulemused viitavad üheselt, et neljanda generatsiooni TEJ lisamine Eesti elektrisüsteemi ei too kaasa olulist muutust elektrienergia turuhinnas ühegi uuritava stsenaariumi juhul.

Elektrienergia tootmisvõimsuste portfell aastatel 2030 ja 2040 kõikide modelleeritud stsenaariumite lõikes on esitatud joonisel 2.12. Jooniselt võib välja lugeda, et TEJ lisamine Eesti elektrisüsteemi kahandab teatud määral tuuleparkide turuosa. Tuuleparkide välja tõrjumise määra väheneb üldjuhul energiasalvesti lisamisel, mis võimaldab optimaalsemalt katta tuuleparkide ebaühtlasest toodangust põhjustatud elektrisüsteemi eabilanssi. Summaarne elektrienergia tootmisvõimsus Eestis on samuti suurim salvestiga stsenaariumites. See tähenda ühtlasi seda, et TEJ lisamisel turult väljatõrjutav tuuleenergia võimsus jääb väiksemaks kui TEJ poolt lisanduv võimsus.



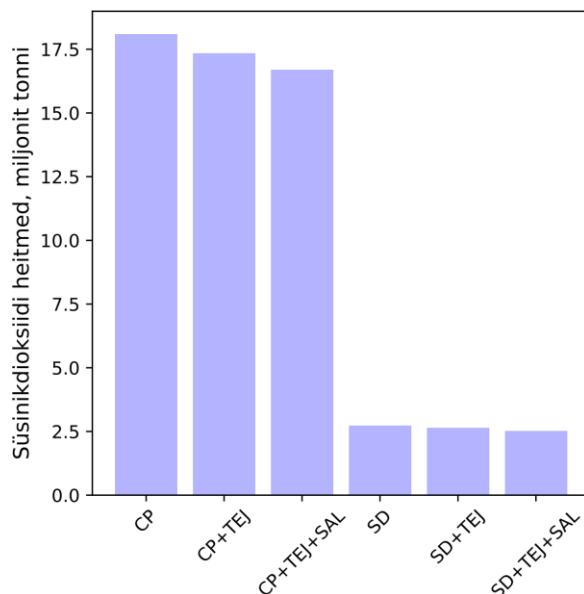
Joonis 2.12. Eesti elektrienergia tootmisvõimsused modelleeritud stsenaariumites 2030. aastal ja 2040. aastal

Joonisel 2.13 on kujutatud Eesti elektrienergia bilanss modelleeritud TEJ stsenaariumites. Võrreldes baasstsenaariumi tulemustega saab välja lugeda, et TEJ lisamine on mõjunud elektrienergia bilansile positiivselt ning Eesti on summaarselt elektrienergiat eksportiv riik kogu modelleerimisperioodi ja uuritud stsenaariumite lõikes. Summaarselt on elektrienergia eksport suurem SD stsenaariumis, nagu viitasid ka baasstsenaariumite tulemused.



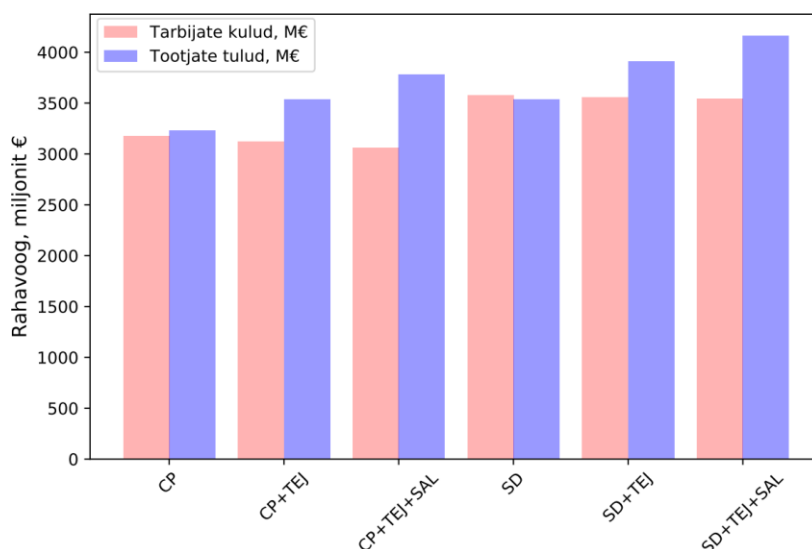
Joonis 2.13. Eesti elektrienergia bilanss modelleeritud TEJ stsenaariumites

Joonisel 2.14 on välja toodud elektrienergia ja kaugkütte soojuse tootmisel eralduvad süsinikdioksiidi heitmed modelleerimisperioodi vältel summaarselt. Selgub, et TEJ lisandumine Eesti elektrituru piirkonda muudab teatud määral keskkonnaheitmete taset. CP stsenaariumis on baasstsenaariumi ja salvestiga TEJ stsenaariumite heitmete erinevus 7%. SD stsenaariumis on suhteline muutus samas suurusjärgus. Kuna selles stsenaariumis on üldiselt märkimisväärselt madalamad heitmed, on absoluutne erinevus sisuliselt märkamatu.



Joonis 2.14. Eesti elektrienergia ja kaugkütte soojuse tootmisel eralduva süsinikdioksiidi summaarsed heitmed modelleeritud aastate jooksul summaarselt

TEJ, kui juhitava tootmisvõimsuse ehitamisega kaasneb ka mõju varustuskindlusele. Aasta 2019 teise poole seisuga eksisteerivatest ja planeeritud elektrijaamadest on eelduste kohaselt 2030-2040 aastatel töökorras kolm moodsaimat põlevkivielektrijaamade plokki (8., 11. plokk ja Auvere elektrijaam), uttegaasi põletavad elektrijaamad ja biomassi koostootmisjaamad. Taastuvaid energiaallikaid, nagu tuulepargid ja päikesepaneelid, Elering tootmisvaru hindamisel arvesse ei võta. Summaarselt on 2040. aastaks CP ja SD baasstsenaariumites juhitavaid tootmisvõimsusi Eesti elektrituru hinnapiirkonnas vastavalt 1260 ja 1180 MW. Uuritud tuumaelektrijaama stsenaariumites (salvestiga ja ilma) muude juhivate tootjate tootmisvõimsused oluliselt ei muutunud. Seega on TEJ näol lisandunud juhitavaid tootmisvõimsusi Eestisse, millel on positiivne mõju tootmispiisavusele. Suurem mõju on SD stsenaariumis, kus salvestiga tuumaelektrijaama puhul on süsteemi lisandunud täiendavalt 600 MW, ehk täiendavalt 50% juhivat tootmisvõimsust võrreldes baasstsenaariumiga.



Joonis 2.15. Eesti tarbijate kulud elektrienergia ostmiseks ja elektritootjate tulud elektrienergia müügist modelleeritud aastate jooksul summaarselt

Joonisel 2.15 on välja toodud Eesti elektrituru hinnapiirkonnas toimunud muutused elektrienergia tarbijate kuludes elektrienergia ostmisele ning elektritootjate tuludele energia müügist. Jooniselt on jälgitav, et TEJ lisamine CP stsenaariumis toob tarbijateni väikese kogukulu alanemise, mis jääb 3,6% piirsesse. SD stsenaariumis on tarbijate kulude alanemine marginaalne. Mõlemas baasstsenaariumis on Eestis summaarselt elektrienergia müügist teenitud tulu tõusnud TEJ enda tulu arvelt. Ülejäänud elektrijaamad on tulu kaotanud turuosa vähenemise ja/või hinna alanemise tõttu.

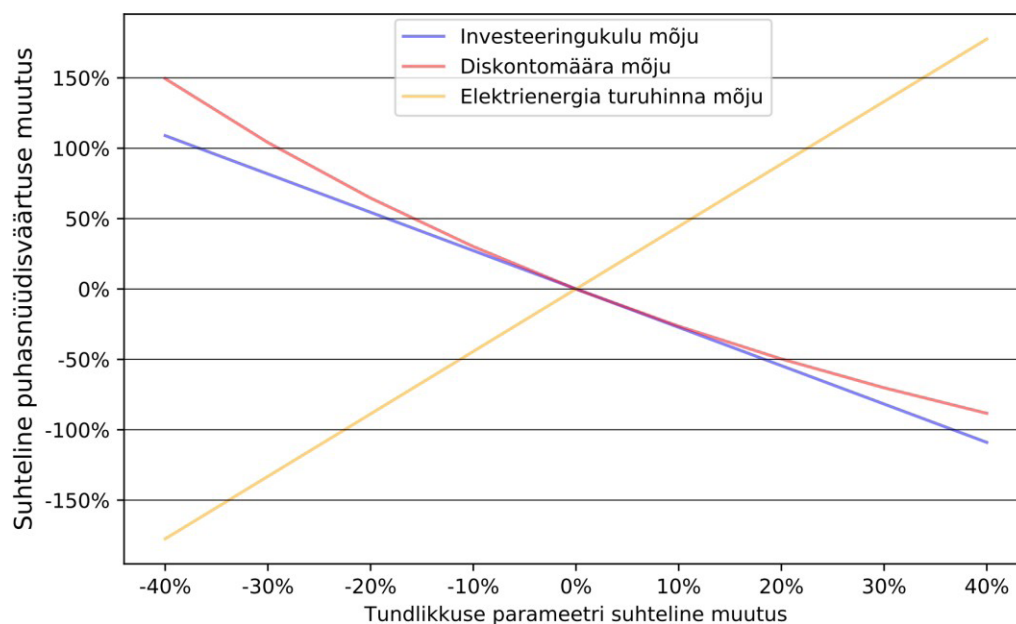
TUUMAELEKTRIAAMA FINANTSANALÜÜSI TULEMUSED

Vastavalt peatükis 1 ja 2 kirjeldatud metoodikale, püstitatud aluseeldustele ja modelleerimise tulemustele on finantsanalüüsi teostamiseks arvatud IRR ja NPV väärtused kõikide TEJ stsenaariumite jaoks. Tulemused on toodud tabelis 3.1. TEJ valmimise aastaks on võetud aasta 2030. Finantsarvutuste jaoks arvestati diskontomääraks 10% [8].

Tabel 3.1. Tuumaelektrijaama stsenaariumite finantsnäitajad

Stsenaarium	IRR (%)	NPV (M€)
CP	12,0%	124
CP salvestiga	10,2%	13
SD	14,7%	250
SD salvestiga	13,5%	236

Arvestades tänast Euroopa kliimapoliitikat on peetud tõenäoliseks, et aja jooksul lisandub järjest rohkem ja rangemaid kliimapoliitilisi meetmeid, mistõttu on stsenaariumi SD realiseerumist peetud mõnevõrra tõenäolisemaks kui CP realiseerumist. Seetõttu on sensitiivsusanalüüs sooritatud baseerudes SD stsenaariumi tulemustele.



Joonis 3.1. Tuumaelektrijaama projekti nüüdisväärtuse tundlikkus olulisematele muutujatele

Tundlikkuse analüüsi tulemused on toodud joonisel 3.1. Tundlikkuse analüüs viitab, et väikes- te muutuste korral on projekti kasumlikkus võrdelt tundlik nii investeeringukulu kui kapital hinna suhtes. Testitud sisendmuutujatest olulisim on aga elektrienergia turuhinna muutus. Projekti kasumlikkus läheneb nullile, kui elektrienergia turuhind on rohkem kui 20% võrra väiksem käesolevas analüüsis leitud elektrienergia turuhinnast, mis on umbkaudu 44 €/MWh modelleeritud aastate keskmisena.

KASUTATUD ALLIKAD

- [1] IEA, World Energy Outlook 2018. [Võrgumaterjal]. Leitav: <https://www.iea.org/weo2018/>.
- [2] Elering, „Eestie elektrisüsteemi varustuskindlsue aruanne 2019”. [Võrgumaterjal]. Leitav: https://elering.ee/sites/default/files/public/Infokeskus/elering_vka_2019_web_final2.pdf
- [3] Balmorel mudel. [Koduleht]. Leitav: <http://www.balmorel.com/>.
- [4] Nordic Energy Research, “Baltic Energy Technology Perspectives 2018”. [Võrgumaterjal]. Leitav: <https://www.nordicenergy.org/project/bente/>
- [5] Flex4RES projekt. [Võrgumaterjal]. Leitav: <https://www.nordicenergy.org/flagship/flex4res/>.
- [6] Taani Energiaagentuur ja Energinet, „Technology data for Energy plants for Electricity and District heating generation”. [Võrgumaterjal]. Leitav: <https://ens.dk/en/our-services/projections-and-models/technology-data/technology-data-generation-electricity-and/>.
- [7] ENTSO-E, „TYNDP 2018 arenguplaan aastateks 2025-2040”. [Võrgumaterjal]. Leitav: <https://www.entsoe.eu/Documents/TYNDP%20documents/TYNDP2018/Scenarios%20Data%20Sets/Input%20Data.xlsx/>
- [7] BPIE ja Fraunhofer, „Discount rates in energy system analysis”. [Võrgumaterjal]. Leitav: http://bpie.eu/uploads/lib/document/attachment/142/Discount_rates_in_energy_system-discussion_paper_2015_ISI_BPIE.pdf/

1.3 VÕIMALIKU VÄIKSE MOODULREAKTORI MAJANDUSLIK MÕJU EESTILE

EELTASUVUSUURING

Hans Hõrak,

Mustafa Hakan Eratalay,

Kevin Kuriakose,

Anastasiia Pustovalova

Sotsiaalteaduslike rakendusuringute keskus RAKE

Tartu Ülikool

2019

Uuringu tellija: Fermi Energia

Uuringu tegijad tänavad

Elsa Trummi ja Ene Tubeltit keeletoimetuse ja jooniste kujunduse eest.

TUUMAENERGEETIKA JA VÄIKESTE MOODULREAKTORITE MAJANDUSLIKUD ASPEKTID

Eestis on juba pikka aega olnud probleemiks suures osas põlevkivienergia tootmisest tulenevad väga suured kasvuhoonegaaside (KHG) emissioonid – peaaegu 70% energiavajadusest kaetakse põlevkivienergia. Põlevkivi kaevandamise ja töötlemisega kaasnevad suured keskkonna- ja tervisekahjud. Heitmetega ei kaasne aga eriti suurt lisandväärtust – Eestil on OECD riikide seas kõrgeima süsinikuintensivsusega majandus (OECD, 2017). Kuigi Eesti on saavutanud 2020. aasta taastuvenergia eesmärgid (25% lõpptarbimisest), on rohelise energia osakaalu kasv olnud tagasihoidlik¹: 2018. aasta seisuga on Eesti süsinikdioksiidi emissioonide osas inimese kohta Euroopa Liidus esirinnas, jäädes maha vaid Luksemburgist. Põlevkivitööstus, mille käigushoidmist on toetanud senised maksustamise põhimõtted, tekitab umbes 90% Eesti CO₂ emissioonidest². Kuigi põlevkivisektori suuri heitemahte tunnistatakse probleemina, on põlevkivienergeetika võimaldanud Eestile sõltumatust kütuseimpordist ning pakkunud tööd ligi 6400 inimesele, olles Ida-Virumaal tööhõive mõttes olulisim majandusvaldkond. Sellest tulevalt on olnud mõistetav soov valdkonna hõive langust vältida (Bauer ja Tappe, 2018).

Kehtiv Energiamaajanduse arengukava³ seab KHG heitmete vähendamise peamiseks vahenditeks ulatusliku taastuvenergia kasutuselevõtu, põlevkivitööstuse tipp tehnoloogilise ümberkujundamise ja optimeerimise ning energia kokkuhoiu elamumajanduses. Energiamaajanduse arengukava ega ka selle koostamise aluseks olnud uuringud aga tuumaenergiat võimaliku vahendina ei käsitle. Käesoleva uuringuga püütakse seda lünka täita, käsitledes üht tuumaenergia alakategooriatest, mis võiks Eesti-suurusele riigile sobilikuks osutuda, nimelt väikseid moodulreaktoreid (VMR).

VMR-i defineeritakse enamasti reaktorina, mille elektrivõimsus on alla 300 MW ja erinevalt suurematest reaktoritest peaks saama neid toota tehases, transportida sihtkohta ja paigaldada valmistootena. Mitmed uuringud on näidanud tuumaenergia positiivset mõju majanduskasvule (Saidi ja Mbarek, 2016; Wolde-Rufael ja Menyah, 2010; Nazlioglu jt, 2011) ning viimasel ajal on hakanud eelistatava reaktoriklassina toetust koguma just VMR-id. See on peamiselt tingitud tõdemusest, et mõistlikum on investeerida reaktoritesse, millega kaasnevad madalamad kapitalikulud ja mis vastaksid paremini energiaturu muutuvale dünaamikale (Buongiorno jt, 2018). Selliste reaktorite eeldatav madalam hind ja kiirem paigaldus viitavad, et nende turg võiks olla oluliselt laiem kui suurtel reaktoritel, mida paljud riigid ei saaks realistlikult kaaluda. Rahvusvahelise Aatomienergiaagentuuri andmetel⁴ on praeguseks erinevates arendusetappides umbes 50 VMR-i kavandit, kusjuures neli reaktorit on juba jõudnud ehitusetappi (Argentiinas, Hiinas ja Venemaal).

Kirjanduses viidatakse, et suured reaktorid võimaldavad VMR-dest enam mastaabisäästu (Lokhov jt, 2013). Samas peaksid VMR-id oma mõõtmete ja lihtsuse tõttu olema ohutumad, seda muuhulgas passiivsete ohutussüsteemide tõttu (nt jahutus, mis ei vaja elektrit). Reaktortechnoloogia lihtsustused peaksid võimaldama ka varasematest kavanditest vähemalt 15% madalamat kapitalikulu toodetava elektrienergia ühiku kohta (Lokhov jt., 2013). Praegu võib VMR-id klassifitseerida tõestatud kergevee reaktortechnoloogiate põhisteks (nt käesolevas analüüsis

1 Tuuleenergia assotsiatsioon: <http://www.tuuleenergia.ee/en/2019/02/estonian-renewable-energy-association-growth-of-share-of-green-energy-is-modest/>

2 Rahvusvaheline Energiaagentuur (2016), IEA CO₂ Emissions from Fuel Combustion Statistics (andmebaas)

3 https://www.mkm.ee/sites/default/files/enmak_2030.pdf

4 <https://www.iaea.org/topics/small-modular-reactors>

käsitletav keevveereaktor) ja keerukamateks tehnoloogiateks (nt sulasoolareaktorid), mis ei pruugi veel lähiajal turuvalmidust saavutada.

VMR-ide oluliseks eeliseks on modulaarsus – reaktorid kui kombineeritavad valmistooted. Kogu reaktori valmistamine tehases peaks erinevalt kohapealsest monteerimisest vähendama nii investeerimis- kui ka tegevuskulusid. Selline tootmine peaks võimaldama standardiseerimist ja täiendavate moodulite kiiret lisamist tuumaelektrijaama (TEJ) olemasolevasse infrastruktuuri. Carelli jt (2008) analüüsid viitavad, et võrreldes suurte reaktoritega kaasneks väikeste ja keskmistega 2–5% kokkuhoid kapitalikuludelt ning 3% käitamise- ja hoolduskuludelt. Lisaks võimaldaks modulaarsus õppimismajandust tootjatele, kes tarnivad ja hooldavad standardiseeritud komponente – samale tööjõule peaks olema iga järgneva mooduli paigaldamine ja hooldamine lihtsam ja kiirem. VMR-id peaksid tänu oma ülesehitusele võimaldama lihtsat TEJ – keerukuse vähendamine lihtsustab käitamist ja hooldust ning vähendab rikete ohtu. VMR-ide suurus ja modulaarsus peaksid võimaldama TEJ kiiremat ehitust ja arvestatavat isefinantseerivust (esimene moodul hakkaks oma investeeringut kiiremini tagasi teenima ja rahastama ka järgmist moodulit). Lühem ehitusgraafik võimaldaks säästa ehitusetapi igapäevastelt kuludelt ja elektrimüügieelsetelt intressimaksetelt. See võimaldab muutuvate turutingimustega paremini kohaneda, kuna investeeringud hakkavad end kiiremini tagasi teenima (Mignacca jt, 2019).

Kuludest parema ülevaate saamiseks on püütud hinnata VMR-ide sihtkulu erinevates turutingimustes. Kuigi need uuringud näitavad, et väikeste ja keskmiste reaktorite kapitali- ja finantseerimiskulud peaksid olema väiksemad (Shropshire jt, 2011), on leitud, et absoluutarvudes on suurte reaktorite tasandatud elektrenergia maksumus⁵ madalam (Carlsson jt, 2012). Sellest võib järeldada, et VMR-id sobivad paremini nišiturgudele, kus saaks enam kasu lõigata VMR-ide tootmise ökonoomsusest, lihtsusest ning lühemast ehitusperioodist. Seega võiks VMR sobida Eesti väiksele majandusele ja kiiret ümberstruktureerimist nõudvale energiasektorile.

Selles analüüsis käsitletakse oletuslikku tulevikku, kus 2030. aastate alguses lisatakse Eesti elektriturule ühe väikse reaktormooduliga TEJ. Vanade põlevkivielektri tootmisüksuste sulgemise tõttu on elektri tootmisvõimsus Eestis viimasel ajal oluliselt langenud. 2018. aasta esimese kolme kvartali jooksul toodeti 9376 GWh elektrit, mis langes 2019. aasta esimese 3 kvartalil 5865 GWh-ni (www.stat.ee). Analüüsis käsitletakse TEJ võimsusega 300 MWe, mis toodaks täisvõimsusel ligikaudu 2500 GWh elektrit aastas (umbes 1875 GWh kolme kvartali kohta). 2018. aastal importis Eesti 3053 GWh elektrit ning selle analüüsi kontekstis eeldatakse, et elektri nõudlus ei lange ning täiendavat tootmisvõimsust palju ei lisandu. Seega ei too ühe 300 MWe reaktormooduli lisamine nende stsenaariumide puhul Eestile kaasa elektri netoeksporti.

Analüüsi eeldused ja ülevaade

Analüüs põhineb reaktori tootja esitatud hinnangulisel projekteerimisel, hanke ja ehituse üldöisel kapitalikulul⁶ üks miljard USD ehk ligikaudu 900 miljonit eurot (2019. aasta lõpus) ühe General Electric Hitachi BWRX-300 reaktormooduliga TEJ eest. Eeldatakse, et see summa hõlmab juba kõiki makse ja tolle, kuid ei sisalda reaktori tootjale ettenägematu omanikukulusid. Tegemist on 300 MWe võimsusega vesijahutusega VMR-ga, mis põhineb suuremal

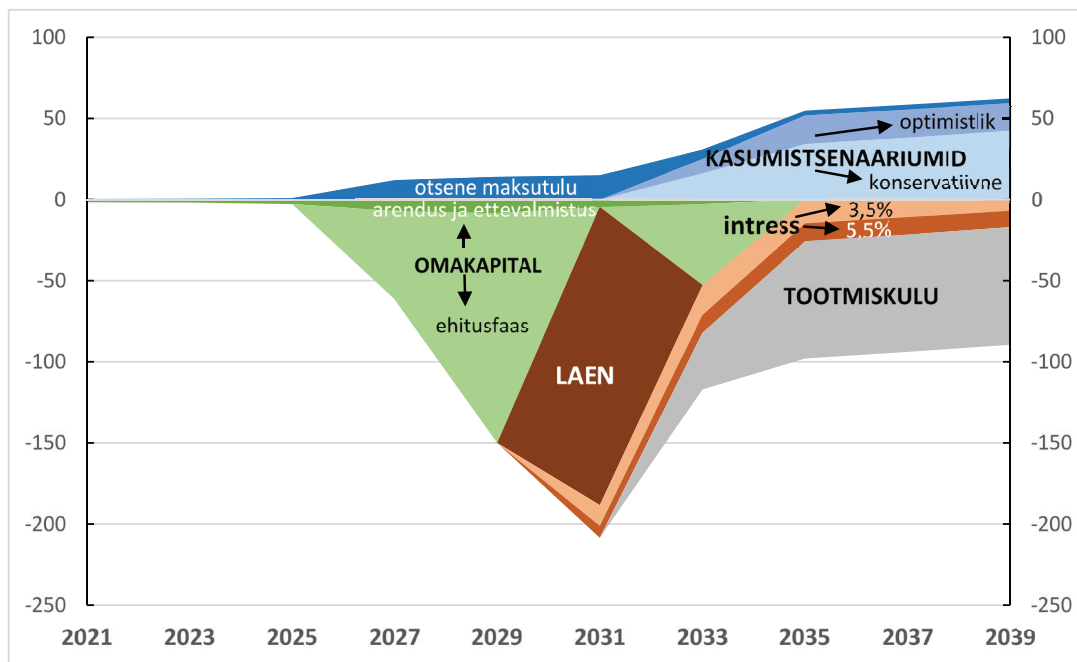
5 *Levelized Cost of Electricity (LCOE)* – elektri ühikuhinna nüüdisväärtus genereeriva vara eluea jooksul.

6 *Overnight capital cost* – elektrijaamade kavandamisel ja võrdlemisel kasutatav kapitalikulu hinnang, mis ei hõlma intresse – justkui elektrijaam ehitataks üleöö (Kooimey ja Hultman, 2007).

ESBWR (1520 MWe) mudelil. Viimane on juba Ameerika Ühendriikides saanud ühe ehitus- ja tegevuslitsentsi, kuid BWRX-300 puhul praeguseks veel pretsedent puudub. Esitatud stsenaariumid eeldavad ranget arendustegevuse ajagraafikut ja kiiret ehitustempot (3 aastat), kuid tuleb märkida, et mida kauem TEJ-de ehitamine aega võtab, seda kulukamas need projektid kipuvad muutuma (Harvey, 2010, lk 361) – iga-aastased intressimaksud kuhjuvad, kuid elektrit ei müüda.

Elektrivõrgu ehituse kulud põhinevad Eleringi hinnangul (330 kV alajaam kahe ühenduspunkti- ning 2×20 km õhuliini kogumaksumuses ≈17 miljonit eurot). Ettevalmistamis- ja arenduskulude ning elektritootmise kulu kohta (40 €/MWh ehk 100 miljonit eurot aastas) esitas hinnangu analüüsi tellija, Fermi Energia. Tootmiskuludesse on arvestatud ka laenu intressi maksed, jäätmekäitlusfondi (2€/MWh) ja lammutusfondi (1€/MWh) rahastus. Tootmisetapi stsenaariumite aluseks olevad elektrienergia börsihinnad 2030. aastatel (konservatiivne 53 €/MWh ja optimistlik 60 €/MWh) esitati samuti Fermi Energia poolt. Projekti tööjõuvajaduse hinnang ja vastav tööjõu struktuur põhineb VTT *Technical Research Centre of Finland* poolt tehtud analüüsil (Suolanen, 2019). Töökohtade palgatasemete hinnangud andis Fermi Energia. Kõik maksutulude prognoosid põhinevad 2019. aasta maksusüsteemil. Eeldatakse, et 60% TEJ tootmisvara ning võrguehituse investeeringust on laenukapital, mis laenatakse ehitusaastatel kolmes osas (183 miljonit eurot igal aastal, kogu laenukoormuseks 550 miljonit – joonis 3). Käsitletakse kahte võimalikku intressimäära (3,5% optimistlik ja 5,5% konservatiivne) ja eeldatakse, et tootmise etapis suunatakse kogu kasum laenu tagasi maksmisele. Investeeringu omakapitali (367 miljonit eurot) puhul eeldatakse üle 50% eestimaist kapitali.

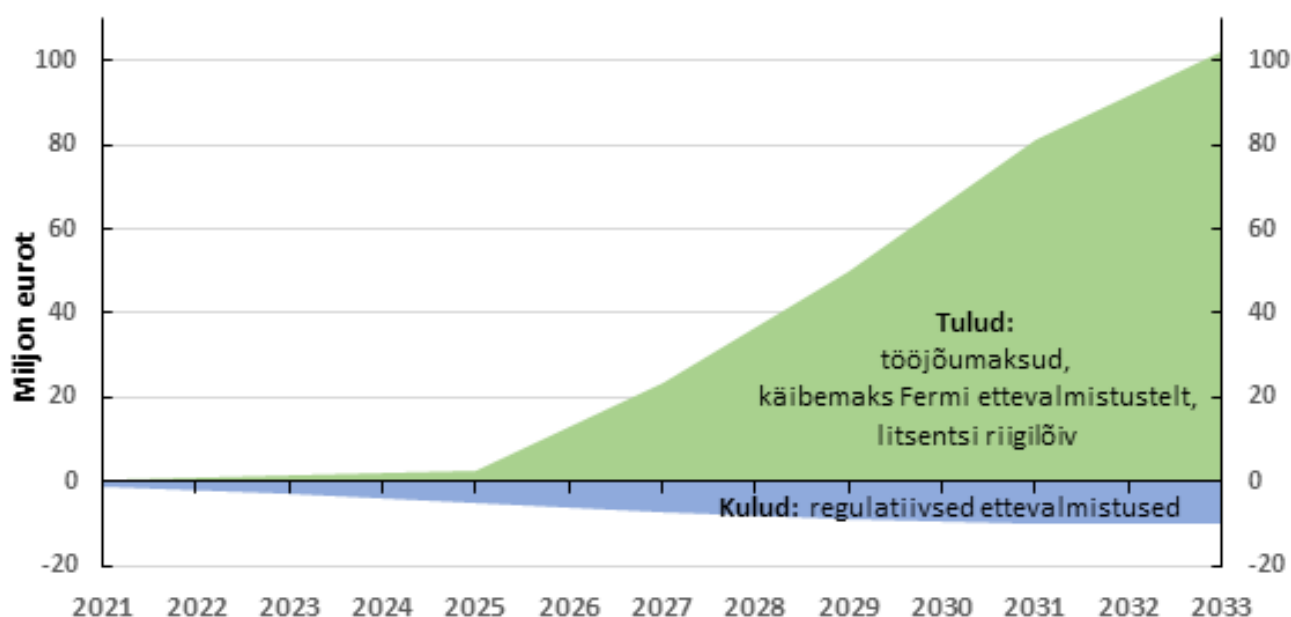
Investeeringute, jooksvate kulude, otseste maksutulude ja omaniku kasumi ajaline jaotus kahes staatilises stsenaariumis on esitatud joonisel 1.



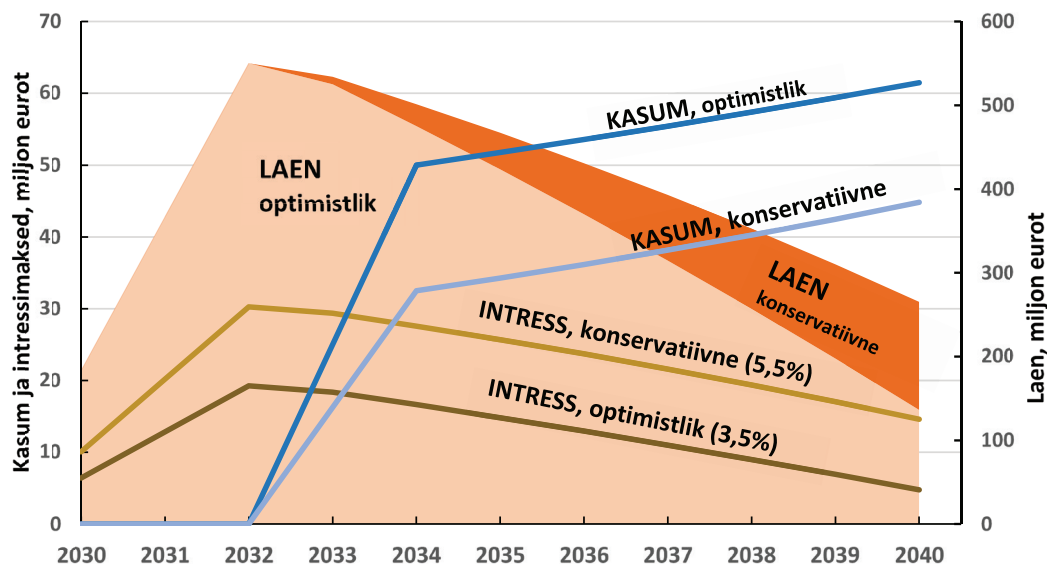
Joonis 1. Ühe BWRX-300 reaktormooduliga TEJ-ga kaasnevad kulud, otsesed maksud ja omaniku kasum aasta kaupa kahes stsenaariumis. Võimalikust intressimäärast ja elektri hinnast lähtuvalt on esitatud kaks stsenaariumit: optimistlik (intressimääraga 3,5% ja elektri hulgihinnaga 60 €/MWh) ja konservatiivne (intressimääraga 5,5% ja elektri hulgihinnaga 53 €/MWh). Eeldatakse, et elektri tootmine algab 2033. aasta juulis ning kogu kasum suunatakse laenu tagasimaksmisele. Miljonit eurot.

Vaadates intressimaksete osa joonisel 1, võib ette kujutada olukorda, kus mingil põhjusel 2033. aastal veel elektri müük ei algaks. Siin esitatud stsenaariumite puhul tähendaks see 19–30 miljoni euro jagu intressimakseid igal aastal ilma elektrit müümata – mida kauem aega läheks TEJ käivitamiseks pärast laenu võtmist, seda suuremaks kasvaks intressimaksete osakaal kogukulu enne tagasiteenimise algust. Võimaliku TEJ kavandamisel ja rahastamisel tuleks seda riski kindlasti minimeerida.

Joonisel 2 on esitatud ettenähtavad riigi kulud tuumaenergeetikat reguleeriva üksuse ja seadusandluse loomiseks ning TEJ projektiga seoses riigile laekuv tulu. Kuni prognoositava TEJ valmimiseni 2033. aastal laekuks riigikassasse projekti tegevustest kümme korda rohkem otsest maksutulu, kui kuluks regulatiivsele ettevalmistusele. Siin peab aga rõhutama, et riigi kulusid tuumaenergeetika valdkonna õppekavade välja töötamisele jm haridusalasale arendustegevusele ei hinnata, kuigi sellele elektritootmise tehnoloogiale vastav hariduslik võimekus tuleks välja töötada.



Joonis 2. Riigi kulud regulatiivsele ettevalmistusele ning TEJ projektiga seotud riigi tulud (tööjõu maksud, 15% hinnangulise määraga käibemaks keskkonnamõjude hindamiselt jm ettevalmistustelt ning 3,5 miljont eurot litsentsimise riigilõivu) kumulatiivselt kuni elektri tootmiseni. Miljonit eurot.



Joonis 3. Laenukoormuse vähenemine ja kasumi tõus kahes stsenaariumis, kus kogu kasum suunatakse laenu tagasimaksmisele: optimistlik (intressimääraga 3,5% ja elektri hulgihinna 60 €/MWh) ja konservatiivne (intressimääraga 5,5% ja elektri hulgihinna 53 €/MWh). Eeldatakse, et elektri tootmine algab 2033. aasta juulis. Vasakul teljel aastane kasum ja intressimaksed ning paremal teljel kogu laen. Miljonit eurot.

Joonisel 3 on kujutatud kahte laenu teenindamise stsenaariumi lähtuvalt võimalikust elektri börsihinnast 2030. aastatel ning laenu intressi tasemest. Kui suunata kogu elektri müügi kasum laenu tagasimaksmiseks, siis konservatiivse prognoosi puhul oleks 2040-ndate aastate alguseks tagasi makstud umbes pool 550 miljoni eurosest laenust ning optimistliku stsenaariumi puhul kolmveerand.

Majanduslikud mõjud arendustegevuse etapis

Projektiga seotud töö ning teatud ettevalmistustegevuste kohta arvutati otsene maksutulu. Fermi Energia hangitavate ettevalmistustööde (kokku 13 miljonit eurot) puhul kasutati maksumaksjate arvutamiseks 15% hinnangulist maksumäära, kuna seda laadi tegevustes on raske ette näha kulude struktuuri ning need tegevused võivad hõlmata mõningaid 9% käibemaksumääraga kaupu ja teenuseid. Laekuvaid tööjõu makse arvestatakse ligikaudu 39–42% palgafondist sõltuvalt töökohast, kusjuures füüsilise isiku tulumaksu tagastusega pole arvestatud. Analüüs eeldab, et kõik VTT prognoositud töötajad, Fermi Energia töötajad ja need, kes on seotud „Eestist hangitud töö” osaga investeeringustruktuurist, veedavad Eestis üle 183 päeva aastas, seega maksustatakse nende tulud Eestis. Maksutulud küll arvutati VTT prognoositud ekspert-tööjõule, aga sellise võimekuse saavutamiseks vajalikke kulusid ei hinnatud (uute õppekavade arendamine ülikoolides, jooksvad hariduskulud jms). Ei hinnatud ka selliste teadusväljade edendamiseks kaasnevaid võimalikke majanduslikke kõrvalmõjusid.

Tabel 1. Hinnanguline investeeringu struktuur, tööjõukulud ning otsene maksutulu kuni oletatava TEJ valmimiseni 2033. aasta alguseks, miljonit eurot (allikad: General Electric Hitachi, Fermi Energia, VTT).

		TEJ + võrk	Muud kulud	Riigi tulu	Fermi kulu
Imporditavad kaubad USA (reaktor)		307,1			
Imporditavad kaubad EL (turbiingeneraator)		102,4			
Imporditavad teenused		175,5			
Eestist hangitav	Tööjõud	189		75,6	
	Kaubad ja teenused (sh. võrk)	143			
Ettevalmistused	Regulatiivne ettevalmistus (riigi kulu)		10	-10	
	KMH* ja muud ettevalmistused		13	1,7	✓
	Litsentsimine (riigilõiv)		3,5	3,5	✓
Ettenähtavad töökohad	Välja arendatud eksperttööjõud (VTT)		18,1	7,7	
	Fermi Energia tööjõukulud		31,9	13,5	✓
TEJ maksumus ja muud kulud		917	76,5		
Kogu investeering ja otsene maksutulu			993,5	92	
Laen (60 % TEJ investeeringust)		550			
Intressimaksed tootmiseni 3,5% määra puhul		48,2	1041,7		
Intressimaksed tootmiseni 5,5% määra puhul		75,7	1069,2		

*Keskkonnamõjude hindamine

Tabelis 1 on esitatud ligikaudne investeeringute struktuur, mis on vajalik 300 MWe tootmisvõimsuse saavutamiseks 2033. aastal, kui eeldada staatilist majandust ning kiire ettevalmistus-, litsentsimis- ja ehitusgraafiku teostumist (vt lisa). Kuni oletatava ehituse alguseni 2030. aastal prognoositakse VTT-analüüside järgi 56 uut kõrge kvalifikatsiooniga töökohta, mis eeldatavasti tõuseks 121 töökohani reaktori käivitamisel. Lisaks peaks Fermi Energia enda tegevus kuni ehituse alguseni looma 65 töökohta, edasine vajadus oleks ligikaudu 50 töökohta peakontoris väljaspool elektrijaama. Eeldatakse, et reaktori tootja pakutud 900 miljoni eurosest tootmisvara kapitalikulust 35% oleks Eestist hangitav ning sellele lisanduks võrguehitus (17 miljonit eurot). Eeldatakse, et 60% sellest investeeringust (550 miljonit eurot) oleks laenukapital, mis võetakse laenuna kolmes ühtlases osas ehitusaastatel (2030-2032). TEJ ehitamine peaks tooma Eesti majandusse ligi 330 miljonit eurot (suures osas ehitustegevus, aga ka betooni ja võimalik, et osaliselt ka teraskomponentide tootmine). Riigil kuluks regulatiivsetele ettevalmistustele hinnanguliselt 10 miljonit eurot, samas sellise stsenaariumi korral võiks juba enne elektritootmise algust laekuda Eesti riigikassasse otseste maksude ja riigilõivuna 100 miljonit eurot. Hinnanguliselt 21 miljonit sellest peaks töötajate sissekirjutuste alusel liikuma tulumaksuna kohalikele omavalitsustele. TEJ asukoha omavalitsusele laekuks veel maamaks 50-100 ha suuruselt kinnistult ning omavalitsusele kuuluva kinnistu puhul ka hoonestusõiguse või maa võõrandamise tulu. See maksutulu ei hõlma kõiksuguseid kaudseid maksuvooge nagu transpordi ja masinate käitamisega seotud elektri- ja kütuseaktsiis, võõrtööliste kohalikust tarbimisest laekuv käibemaks jms.

TEJ ehitamiseks vajaminevaks tööjõuks arvestati 400 ehitustöölist kolme aasta jooksul (Riser Ehitus OÜ eksperthinnang). Hiljutine Eesti ehitussektori analüüs (Kask jt, 2018) tuvastas probleemi, mis võib mängida olulist rolli sellise infrastruktuuriprojekti ja kaasnevate majanduslike mõjude kujunemisel. Kask jt. leidsid, et ehitussektori üheks suuremaks nõrkuseks on oskuste ja kvalifikatsiooni puudus. Arvestades taolise TEJ pretsedenditust, kõrgtehnoloogilist olemust ja tuumaenergiale omaseid riske, võib ette näha vajaliku kvalifikatsiooniga kohapealse tööjõu puudust. Ehitustegevuse viivituste ja/või ulatusliku võõrtööjõu kaasamise vältimiseks võib osutuda vajalikuks täiendav oskuste arendamine võimalike kohalike ehitustööliste hulgas lisaks VTT analüüsis tuvastatud 22 ehitusinseneri vajadusele.

Ehitustegevuse majandusmõjude analüüsis esitatakse kaks stsenaariumit lähtuvalt võimalikust palgatasemest⁷: vaatlusaluse sektori keskmine palgatase (2017. aastal 1024€ bruto) ning tööjõukulu poolest sektori neljanda kvintiili ettevõtete palgatase (2017. aastal 1413€ bruto), mis võiks sobida paremini sellise ehitusprojekti töö kvaliteedi nõuetele. Tuginedes üldise palgakaasvu pikaajalisele prognoosile⁸, hinnati ehitusperioodi (2030-2032) brutopalgatase tasemeteks vastavalt 2020€ ja 2825€. Eeldades sellistele palgatasemetele kehtiva maksupoliitika jätkumist (≈39% palgafondist maksudeks), tooks ehitustöö riigile ja kohalikele omavalitsustele 14,8–20,7 miljonit eurot maksutulust.

Võttes aluseks Eesti leibkondade keskmise säästmiskalduvuse (8%⁹), võiksid ehitajad kulutada kolme aasta jooksul hinnanguliselt 22–30 miljonit eurot. Ehitustööliste tarbimise struktuuri ja kanaleid (nt internetiostud välisriikidest) on küll raske hinnata, aga ehitustöö tempo ning eeldatav korraldus (8 tundi päevas, 5 päeva nädalas) viitavad, et suurem osa sellest sissetulekust kulutatakse Eestis.

Teadmata oletatava TEJ täpset asukohta, on väga keeruline hinnata ehitustegevuse kohalikke majandusmõjusid ja transpordikuluseid. Ehitusobjekti kaugus linnadest ja suurematest asulatest ning objekti vahetus ümbruses olemasolev taristu võivad mängida olulist rolli töö korralduses ning tööliste igapäevases rände- ja tarbimiskäitumises. Asukohast võib sõltuda see, kas on vaja tellida suures koguses soojakuid või saab ehitajaid tööajal majutada lähedal asuvatesse korteritesse ja külaliskodadesse. Asukohast sõltuvalt võib osutuda vajalikuks ka tööliste igapäevase transpordi korraldamine objekti ja majutuskoha vahel. Sarnaselt võib tekkida vajadus toitlustuse tellimiseks kaugematest asulatest, kui kohapealsed võimalused on puudulikud. Transpordiga seotud kulud ja majandusmõjud sõltuvad suuresti ka transpordi liigist (sisepölemis- või elektrimootor) ning sellel perioodil kehtivatest emissiooni eeskirjadest, kütuse ja/või elektri hinnast ning aktsiisidest. Seega võib asukohast sõltuvalt ette kujutada väga erinevaid võimalikke tarbimismustreid ning rahavoogude suuruseid, geograafilisi ja sektorilisi jaotuseid. Võib aga eeldada, et ehitusobjekti vahetus läheduses paiknevad tanklad, kauplused ja restoranid näeksid ehitusperioodil märkimisväärset müügi kasvu.

7 Palgatasemed lähtuvad äriregistri 2017. aasta andmetest hoonete ehituse, rajatiste ehituse ja eriehituse sektorites, kust eemaldati mõned teemavälised allsektorid. Palgataseme leidmiseks kaasati ainult need ettevõtted, mille raporteeritud tööjõukulu ja töötajate arv viitasid vähemalt miinimumpalga maksmisele.

8 https://www.struktuurifondid.ee/et/makro_naitajad

9 OECD leibkonna säästude andmed

Majanduslikud mõjud elektri tootmise faasis

Oletatava TEJ käivitamise ja võrku ühendamisega peaks hakkama avalduma projekti peamised majanduslikud mõjud – stabiilne ja emissioonivaba 300 MW elektrivarustus, mille müük peaks täielikult katma laenu intressimaksed ning samal ajal langeks ka aastane elektri import 2,5 TWh võrra. Tabelis 2 võrreldakse kahte stsenaariumi, mis põhinevad hinnangulisel tootmiskulul (40 €/MWh) ja võimalikul elektri börsihinnal: 53 € ja 60 €/MWh.

Tabel 2. Aastased rahavood 2,5 TWh elektri müügist 40 €/MWh tootmiskulu puhul kahes elektri hulginna stsenaariumis pärast aastat 2033, miljonit eurot aastas.

2,5 TWh elektri tootmisega kaasnevad aastased rahavood 40 €/MWh tootmishinna puhul	Konservatiivne (53€/MWh)	Optimistlik (60€/MWh)
Elektri müügi tulu / impordi vältimine	132,5	150
Jäätmekäitlus fondi rahastus (2 €/MWh)	5	5
Lammutus fondi rahastus (1 €/MWh)	2,5	2,5
Omaniku kasum	32,5	50
Aastase kasumi suhe pangalaenu (tootmise alguses)	6%	9%

Kuigi need stsenaariumid ei arvesta kõiksuguseid ebamäärasusi, mis võivad projekti ja selle majanduslikke mõjusid ohustada, on näha, et sellise investeeringu suuruse ja tootmishinna puhul peaks olema kasumlik ka vaid ühe reaktormooduliga TEJ. Kuna moodulreaktorite üheks olulisemaks majanduslikuks eeliseks peetakse nende modulaarsust, võib eeldada, et potentsiaalne teine moodul võimaldaks suurendada tulusid väiksema alginvesteeringuga toodetava MWh kohta. Modulaarsuskordajat (kuivõrd soodsamad oleksid teine ja kolmas moodul) on aga praegu raske hinnata. Kahe mooduliga TEJ leevendaks ka iga-aastase 12-päevase kütusevahetuse ja hooldusega kaasnevat varustuskindluse lünka – sellel ajal kui üks reaktor oleks seisatud, jääks tarbijatele siiski 300 MWe stabiilset tuumaenergia varustust.

Käesolevas töös ei ole arvestatud võimaliku kaugkütte tootmisega, kuigi 300 MWe võimsusel peaks aastas tekkima ligikaudu 4,7 TWh jääksoojust (Fermi Energia). Tallinna aastane soojuse tarbimine on võrdluseks ligikaudu 2,8 TWh (www.stat.ee). Kaugkütte võimalust analüüsib Fermi Energia 2020. aastal uurimispartneritega.

TEJ-ga kaasnevatest makromajanduslikest mõjudest ettekujutuse saamiseks püüti leida võimalikult sarnaseid juhtumeid minevikust. Sobivuse peamiseks kriteeriumiteks olid majanduse sarnasus Eesti majandusele ning TEJ elektrivõrku lülitamine pärast 1990. aastate algust. Dokumendianalüüsil tuvastati kandidaatidena Rumeenia (Cernavoda TEJ, 1997 ja 2007), Slovakkia (Mochovce TEJ, 1998 ja 2000), Tšehhi (Temelin TEJ, 2003) ja Ukraina (Zaporozhye 6 TEJ, 1996). On selge, et moodne pretsedenditu VMR ei mõjuks 2030. aastatel Eesti majandusele päris sama moodi nagu suured TEJ-d on mõjunud endistele sotsialismimaadele viimastel kümnenditel, kuid selline lähenemine võib siiski aidata mõista tuumaenergiat Eestile sarnases majanduskontekstis.

Valitud riikide jaoks koguti viimaste kümnendite kohta 13 võrreldavat makromajanduslikku indikaatorit (vt lisa) ning majanduste üldistamiseks rakendati peakomponentanalüüsi¹⁰. Esimene peakomponent selgitas kõigi riikide puhul umbes 50% makromajanduslike näitajate varieeruvusest ning teine peakomponent 20%. Selleks, et hinnata valitud riikide majanduste sarnasust Eesti majandusele, kasutati eelmisel sammul arvutatud peakomponente kanooniliseks korrelatsioonanalüüsiks¹¹. Analüüsides Eesti majanduse sarnasust teistele esimese peakomponenti põhjal, ilmnes kõige tugevam seos Slovakkia puhul ($r = 0,93$, $p < 0,05$). Rumeenia puhul osutus kanooniline korrelatsioon oluliseks 10% olulisusenivoo puhul, aga korrelatsioon oli negatiivne (justkui viitab hoopis Eesti ja Rumeenia majanduste vastandumisele). Ka teise peakomponenti puhul oli Slovakkial ainus statistiliselt oluline seos ($r = 0,80$, $p < 0,05$). Kuna esimene ja teine peakomponent ei ole omavahel korrelatsioonseoses, aga mõlema puhul ilmneb siiski kanoonilises korrelatsioonanalüüsis Slovakkia sarnasus Eestile, järeldati, et Slovakkia on parim kandidaat tuumaenergia majandusmõju prognoosimiseks Eestile. Võrreldavust toetab veel see, et aastatel 1997-2002 kasvas Slovakkia elektritoodang tuumaenergia osakaal 41%-lt 71%-ni (Eurostat) ehk 30%, mis oleks sarnase proportsiooniga tuumaenergia osakaalu kasv, kui lisada Eesti tootmisvõimekusse üks BWRX-300.

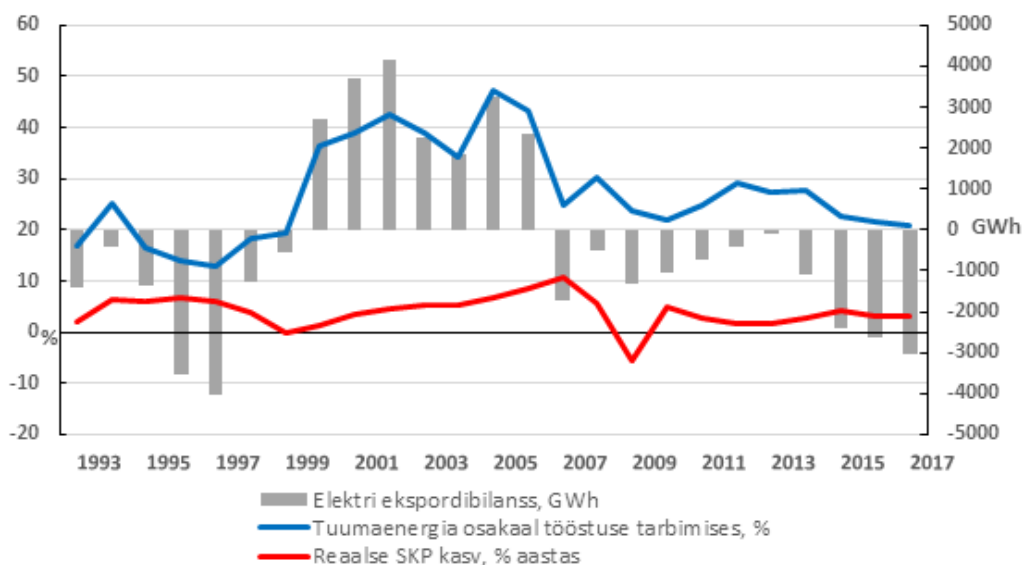
Järgnevalt püüti leida ökonomeetrilisi seoseid Slovakkia elektri tootmis- ja tarbimisdünaamika ning majanduskasvu vahel. Käsitleti kahte suhtarvu – tööstuse elektrienergia tarbimise suhe kogu sisemaisesse elektritoodangusse¹² ning Slovakkia TEJ-de toodetud elektri osakaal kogu elektritoodangus. Nende suhtarvude korrumtamisel saadi tunnus, mida võib teatud eeldustega¹³ käsitleda sisemaise tuumaenergia osakaaluna **tööstuse elektritarbimises**. Kirjeldatud tunnusega püüti tabada majandusmõju avaldumise mehhanismi, kus 1998. ja 2000. aastal käivitatud reaktorid võimaldaksid tööstusele suuremat varustuskindlust ja ehk ka madalamat elektri hinda, mis võiksid tõsta tööstustoodangut ja seeläbi reaalselt SKP-d (joonis 4).

10 PCA leiab algsete tunnuste lineaarsed kombinatsioonid, mis kirjeldaksid võimalikult hästi ära andmetes sisalduva informatsiooni, kusjuures esimene peakomponent seletab ära võimalikult suure osa andmete variatiivsusest ning iga järgmine peakomponent on eelnevaga ortogonaalne.

11 CCA on riskovariatsiooni maatriksil põhinev mitmene korrelatsioonanalüüs kahe vektori (siin kohal Eesti ja võrdlusriigi majandusnäitajate peakomponendid vaadeldaval perioodil) vahelise seose hindamiseks. Algoritm püüab leida kahe tunnuse lineaarset kombinatsiooni, mis annaks suurima korrelatsiooni – kasulik latentsete tunnuste vahelise seose hindamiseks.

12 Kogu sisemine elektritoodang = toodang + import - eksport

13 Eeldatakse, et tööstus tarbib sama struktuuriga energiasegu, mis ülejäänud riik, kuigi tegelikult võis ka tööstus suuremal määral tuumaenergiat tarbida.



Joonis 4. Hinnanguline tuumaenergia osakaal Slovakkia tööstuse elektritarbimises, reaalse SKP (SKP püsivhindades) kasv ning elektrienergia ekspordibilanss. Mochovce 1 (440 MWe) ühendati võrku 1998. oktoobris ning Mochovce 2 (440 MWe) 2000. aasta aprillis. (Allikas: Eurostat)

Võimaliku seose uurimiseks rakendati aegridadele lihtne lineaarne regressioon vähimruutude meetodil (valem 1), kus sõltuvaks tunnuseks määrati reaalse SKP kasv ning sõltumatuteks tunnusteks tuumaenergia osakaal tööstuse tarbimises koos selle tunnuse kahe viitajaga.

$$Y_g = \alpha + \beta_1 C_n + \beta_2 C_{n-1} + \beta_3 C_{n-2} + \xi$$

Valem 1. Slovakkia aegridadele rakendatav lineaarne regressioon, kus Y_g tähistab reaalse SKP kasvu, C tuumaenergia osakaalu tööstuse tarbimises ja n vaadeldavat aastat. α tähistab vabaliiget, β regressioonikordajaid ja ξ konkreetse aasta viga/jääki.

Mudelit rakendati perioodile 1993–2017 ning majanduskriisi moonutava mõju eemaldamiseks ka lühemale perioodile (1993–2007). Suuremas valimis ei tuvastatud statistiliselt olulist seost majanduskasvu ja tööstuse tuumaenergia tarbimise ega ka esimese viitaja tunnuse vahel. Küll aga ilmnes arvestatav seos SKP kasvuga teise viitaja tunnuse puhul ($\beta_3 = 17,79$ statistiliselt oluline tasemel $p < 0,1$, mudel seletab 25% reaalse SKP kasvu muutusest). Mudelit võib tõlgendada järgmiselt: üheprotsendiline kasv tuumaenergia osakaalus tööstustarbimises toob kahe aasta pärast kaasa reaalse SKP kasvumäära 0,178 protsendipunktilise tõusu. Väiksemas valimis leiti sisuliselt sama tulemus ($\beta_3 = 17,47$ statistiliselt oluline tasemel $p < 0,1$), kuid palju suurema R-ruuduga – rakendades mudelit majanduskriisi eelsele perioodile, seletab tuumaenergia kasutuse tõus tööstuses 54% reaalse SKP kasvu muutusest. Regressioonanalüüsi täpsemad kokkuvõtted on esitatud lisas.

Kuigi Slovakkia puhul tuvastati tööstuses tarbitava tuumaenergia majandust kasvavat mõju, tuleb võimaliku Eesti tulevikustsenaariumi kohta järeldusi teha ettevaatlikult. Eestil ja Slovakkial on väga erinevad energiased: Eesti on suuresti põlevkivipõhine, aga Slovakkias on suur osa tuumaenergial (juba enne Mochovce TEJ), lisaks hüdro- ja fossiilküstusepõhine energia

(vt lisa). Slovakkia majanduses on palju suurem roll ka energiamahukal rasketööstusel (eriti autotööstus). Slovakkias moodustas tööstuse tarbimine 2015. aastal 42% energia lõpptarbimisest, mis oli ligikaudu kaks korda rohkem kui Eestis¹⁴. Seega ei pruugi Eesti puhul tuumaenergia mõju majanduskasvule avalduda sama tugevalt läbi tööstustoodangu, aga võib avalduda Slovakkias enam teistes elektrinõudlikes sektorites (nt info- ja kommunikatsiooni tehnoloogiatega seonduvad tegevusalad, mille osakaal majanduses võib 2030. aastateks veel enam tõusta ja mis võivad kasvavate andmemahutuste ja arvutusvõimekuse tõttu nõuda üha enam elektrit).

Kohalikud majandusmõjud tootmise faasis

Töötav TEJ võib endaga kaasa tuua suuri muutusi jaama ümbritsevate alade majanduse suurusel ja struktuuril. Kuigi konkreetse asukoha üle ei saa spekuloida, võib eeldada, et see ehitaks pigem hõredama asustusega piirkonda. Majutust ning teatavaid kaupu ja teenuseid vajaksid jaama lähiümbrusest kolmes vahetuses töötavad reaktorioperaatorid ja hädaabi/valvemeeskonnad. Lisaks võivad otsustada töökohale lähemale kolida ka tippspetsialistid, kes töötavad eeldatavasti pigem klassikalise kontoritöö graafiku alusel. Peale põhivajaduste rahuldamiseks vajamineva, tõstaks TEJ tegevus nõudlust ka muude kaupade ja teenuste järele, mis omakorda tõstaks hõredalt asustatud piirkonna atraktiivsust ettevõtlusele. Kui TEJ tõttu koliks piirkonda 30 töötajat, kes teeniksid 3000-eurost brutopalka, võiksid nad aastas kulutada ligikaudu 0,75 miljonit eurot. Arvestatav osa sellest peaks saama kohalike ettevõtete käibeks. TEJ juurde tuleks ka väljaõppekeskus, mille tegevus elavdaks kohalikku majandust veelgi. Tuumaenergia kasutuselevõtu eelduseks olev haridusalane tegevus ja tagajärjeks olev teadustöö avaldaksid ilmselt teatud majanduslikku mõju ka Tallinnale ja Tartule (nt uute õppejõudude, tudengite ja teadlaste loodav lisandväärtus ja tarbimine, aga laiemalt ka nende innovatsiooni- ja ettevõtluspotsentsiaal).

Kuna BWRX-300 reaktor peab igal aasta läbima kütusevahetuse, kontrolli- ja hooldusprotseduurid, avalduks kohalikele majandusele tõenäoliselt ka olulisi hooajalisi mõjusid. Igal aastal seisataks reaktor 12 päevaks, mil toimuks kütuse vahetus, intensiivne kontroll, hooldus ja uurimistöö. See tegevus tooks iga-aastaselt kaheks nädalaks TEJ lähedusse hinnanguliselt 100 inimest – General Electricu inspeksiooni- ja hooldusmeeskond ning omanike saadetud tippspetsialistid. Märkimisväärne on Soome Olkiluoto külastuskeskuse 15 000 aastase külastaja näitel tuumajaama potentsiaal külastussihtkohana¹⁵. Suuresti välisriikides palka teeniv tööjõud tarbiks seega kahel nädalal Eesti tooteid ja teenuseid, kusjuures osa sellest tarbimisest toimuks TEJ lähiümbruses.

Üks suuremaid kohalikke ja ka makromajanduslikke mõjusid võib tuleneda elektrimahukatele majandusharudele avanevatest võimalustest. Nimelt lubab praegune elektrituruseadus (§ 61) elektrijaamast 6 km raadiuses asuvatele tarbijatele ehitada oma otseliin. See võimaldaks tarbida elektrit ilma standardset võrgutasu maksmata, mis omakorda annaks TEJ läheduses asuvatele elektrimahukatele ettevõtetele tugeva konkurentsieelise kolmandiku¹⁶ võrra madalama elektri hinna kujul. Olenevalt ligimeelitatavatest suurtarbijatest ja nende tööjõuvajadustest võiks tuumaenergiaga sünergilised tööstused tuua piirkonda veelgi enam investeringuid ja kõrge lisandväärtusega töökohti. Pidades silmas Eesti arengusuundi, võib suurte tarbijatena ette kujutada kvantarvuteid, pilvandmetöötlust, küberkaitset ja suurt hulka digitaliseeritud teenuseid

¹⁴ <https://www.odyssee-mure.eu/publications/efficiency-by-sector/industry/share-final-consumption.html>

¹⁵ <https://www.tvö.fi/news/2148>

¹⁶ <https://www.elektrilevi.ee/vorguteenuse-hind-ehk-vorgutasu>

(nt arvutuslikult keerukas genoomipõhine personaalmeditsiin), mis eeldaksid suure elektritarbimisega andmekeskusi.

Fermi Energia kaalub ka kohalikule kogukonnale hüvitise maksmist, et kompenseerida võimalikke ebamugavusi ja edendada ka TEJ töötajate elukeskkonda. Makstes näiteks 15 senti igalt toodetud megavatt-tunnilt, tooks üks reaktor otse omaavalitsuse kassasse 375000 eurot aastas.

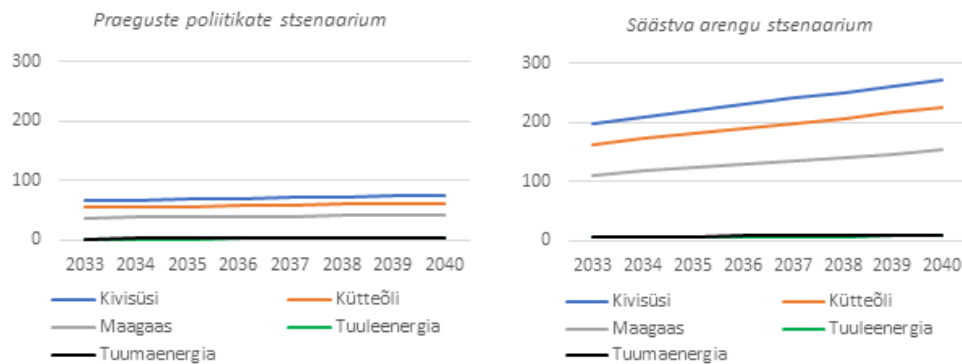
Alternatiivsete tehnoloogiate emissioonid keskkonnapoliitilises kontekstis

Lõpuks käsitletakse ka päevakorralisi ja ettenähtavaid keskkonnapoliitilisi arenguid. Kuna kliimamuutus saab üha ilmsemaks ja vahetumaks, pannakse aina rohkem rõhku KHG heitkoguste vähendamisele. 2018. aastal uuendati Euroopa Liidu heitkogustega kauplemise süsteemi neljanda etapi (2021–2030) raamistikku¹⁷. Lootuses saavutada seatud kliimaeesmärke, tõsteti nõutava iga-aastase heitkoguste vähendamise tempot 1,74%-lt 2,2%-le aastas. Reformiga tugevdati ka turustabiilsusreservi ja loodi uued rahastusmehhanismid, toetamaks tööstuse ja elektrisektori heitmete vähendamist. Sellises kontekstis on elektrijaamade majandusliku mõju kujunemisel suur roll elektri tootmistehnoloogia KGH heite intensiivsusel (tabel 3). Joonisel 5 on esitatud 2,5 teravatt-tunnise aastase elektritoodanguga kaasnevate emissioonide hinnad erinevate tootmistehnoloogiate puhul kahes Rahvusvahelise Energiaagentuuri tulevikustsenaariumis (IEA, 2018). Nagu näha, võib emissioonivaba elektritootmise tehnoloogia valik kaasa tuua olulist kokkuhoidu isegi juhul, kui kliimamuutusega võitlemiseks ei seata heitmetele rangemaid piiranguid. Kui 2033. aastal toota sama palju elektrit maagaasist nagu võimaldaks BWRX-300, oleks aastaste heitkoguste hind praeguste poliitikate stsenaariumis peaaegu 40 miljonit eurot ning tõsise rohepöörde stsenaariumis lausa 110 miljonit.

Tabel 3. Erinevate elektritootmise tehnoloogiate/kütuste KHG heitmed gigavatt-tunni kohta ja BWRX-300 aastase elektri tootmise mahus, tonni CO₂ väärsed (allikas: World Nuclear Association, 2011).

Elektritootmise tehnoloogia/ kütus (sekundaarallikate arv heite intensiivsuse hinnanguks)	Keskmine KHG heitmete maht tootmisüksuse eluea jooksul, t CO ₂ väärsed/GWh	KHG heitmed 2,5 TWh elektri tootmisest, t CO ₂ väärsed
Kivisüsi (10)	888	2220000
Kütteõli (5)	733	1832500
Maagaas (12)	499	1247500
Tuuleenergia (11)	26	65000
Tuumaenergia (14)	29	72500

17 https://ec.europa.eu/clima/policies/ets/revision_en



Joonis 5. Erinevate elektritootmise tehnoloogiate/kütuste aastaste KHG heitmete hinnad 2,5 TWh elektrenergia tootmisest kahes stsenaariumis: praeguste poliitika (kliimapolitiikad 2018. aasta seisuga) ja säästva arengu stsenaarium (ÜRO säästva arengu eesmärkide saavutamise), miljonit eurot (Allikad: Heitmete hinnaproгноosid World Energy Outlook 2018 (IEA, 2018) stsenaariumitest ja heiteintensiivsus WNA (2011) metaanalüüsist).

KOKKUVÕTE

Esmane analüüs viitab, et ühe BWRX-300 reaktormooduliga TEJ projekt võiks tuua Eesti majandusse märkimisväärsed kapitalivoogusid (üle 300 miljoni euro jagu Eestist hangitavaid kaupu, teenuseid ja tööd), millega kaasneks majanduse elavnemine teatud sektorites ja arvestatavad maksutulud juba enne elektri tootmist (100 miljonit eurot otsesest makse). Välisinvesteeringute mahuks oleks ligikaudu pool miljardit eurot (45% omakapitalist ning 60% laenukapitalist). Käsitletud elektriturust stsenaariumite puhul võimaldaks tootmine vältida aastas 132–150 miljoni euro väärtuses elektri importi ning tooks omanikele esimestel aastatel 32–50 miljoni euro jagu kasumit ning pärast kogu laenu tagasimaksmist sama elektri hinna juures lausa 60–78 miljonit eurot aastas. Olenevalt keskkonnapoliitikatest, naaberriikide elektri tootmisvõimekusest ja -tehnoloogiatest ning üldisest muutusest elektri tarbimises, võib osutuda elektrenergia 2030. aastatel ka kallimaks kui käsitletud optimistlikus stsenaariumis. Üpris julgelt võib ette näha aga seda, et elektri tootmisega kaasnevad KHG heitmed muutuvad edaspidi kallimaks, seega põlevkivielektri tasuvus langeb tõenäoliselt veelgi. Tuumaenergia võimaldab toota elektrit sarnasel heiteintensiivsusel nagu tuulegeneraatorid, aga stabiilselt. Kiiret hankimist ja ehitust eeldavas staatilises kulude ja tulude mudelis ilmneb ka kirjanduses palju välja toodud viivituste oht TEJ investeeringute tasuvusele. Seega tuleb positiivse majandusmõju potentsiaali käsitleda koos kõiksuguste teguritega, mis võivad pikendada perioodi, mis jääb laenu võtmise ja elektri müügi alguse vahele. Slovakkia varasemad kogemused näitavad, et tuumaenergia võib anda märkimisväärsed eeliseid suure tarbimisega tööstusele, soodustades seeläbi majanduskasvu. Mõju konkreetsetele ettevõtetele võib Eesti puhul olla veel enam võimaldatud, kui TEJ lähedusse koonduvad suurtarbijad saaksid elektrit osta ilma võrguhooldustasudeta. Kuna võimaliku teise ja kolmanda reaktormooduli kapitalikulu ei ole teada, on raske hinnata täiendavate moodulite paigaldamise lisamõjusid. Arvestades aga, et märkimisväärne osa infrastruktuurist oleks välja töötatud juba ühemoodulise TEJ ehitamisel ning selle käigus oleks välja kujunenud ka stabiilne ja kogenud tööjõud, võib eeldada, et moodulite lisamine võimaldaks suuremat majandusmõju väiksema ja kiirema investeeringuga. Peale modulaarsusest tuleneva säästu võiks täiendavad moodulid võimaldada Eestile ka positiivset elektrenergia ekspordibilanssi.

- Barenghi, S. & Boarin, Sara & Ricotti, M.E.. (2012). *Investment in different sized SMRs: Economic evaluation of stochastic scenarios by INCAS code*. International Congress on Advances in Nuclear Power Plants 2012, ICAPP 2012, 4, 2783-2792.
- Bauer, E. ja Tappe, J. (2018). *Oil shale in Estonia: Fossil fuel policy in a pioneering country*. Konrad-Adenauer-Stiftung e.V. 2018.
- Carelli, M., Mycoff, Clark., Garrone, P., Locatelli, G., Mancini, M., Ricotti, M.E., Trianni, A., Trucco, P. (2008). *Competitiveness of Small-Medium, New Generation Reactors: A Comparative Study on Capital and O&M Costs*. International Conference on Nuclear Engineering, Proceedings, ICONE. 4. 10.1115/ICONE16-48931.
- Carlsson, J., Shropshire, D., Heck, A., Fütterer, M. (2012). *Economic viability of small nuclear reactors in future European cogeneration markets*. Energy Policy, 43, 396-406. 10.1016/j.enpol.2012.01.020.
- Eurostat (2019). *Eurostat energy database*. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/database> Kasutatud novembris 2019.
- Harvey, L. D. (2010). *Energy and the new reality 2: carbon-free energy supply*. Routledge.
- International Energy Agency (2018). *World Energy Outlook 2018*. <https://www.iea.org/weo2018/> Kasutatud 26. november 2019.
- Kask, K., Veemaa, J., Puolokainen, T., Varblane, U., Vörk, A., Unt, T., Lees, K., Keerberg, C. (2018). *Ebitussektori tootlikkuse, lisandväärtuse ja majandusmõju analüüs*. Tartu Ülikooli sotsiaalteaduslike rakendus-uuringute keskus RAKE.
- Koomey, J., & Hultman, N. E. (2007). *A reactor-level analysis of busbar costs for US nuclear plants, 1970–2005*. Energy Policy, 35(11), 5630-5642.
- Locatelli, G., Bingham, C., & Mancini, M. (2014). *Small modular reactors: A comprehensive overview of their economics and strategic aspects*. Progress in Nuclear Energy, 73, 75–85. 10.1016/j.pnucene.2014.01.010
- Lokhov, A., Cameron, R., & Sozoniuk, V. (2013). *OECD/NEA Study on the economics and market of small reactors*. Nuclear Engineering and Technology, 45(6), 701-706.
- Mignacca, B & Locatelli, G. (2019). *Economics and finance of Small Modular Reactors: A systematic review and research agenda*. Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- Nazlioglu, S & Lebe, F & Kayhan, S. (2011). *Nuclear energy consumption and economic growth in OECD countries: Cross-sectionally dependent heterogeneous panel causality analysis*. Energy Policy, 39, 6615-6621. 10.1016/j.enpol.2011.08.007.
- Nuclear Energy Agency (2011). *Current Status, Technical Feasibility and Economics of Small Nuclear Reactors*; OECD: Paris, France, 2011.
- OECD (2017). *OECD Environmental Performance Reviews: Estonia 2017*, OECD Environmental Performance Reviews, OECD Publishing, Paris, 10.1787/9789264268241-en.
- Petti, D., Buongiorno, P. J., Corradini, M., & Parsons, J. (2018). *The future of nuclear energy in a carbon-constrained world. An interdisciplinary MIT study*. Massachusetts Institute of Technology Energy Initiative (MITEI).
- Saidi, K & Mbarek, M.B. (2016), *Nuclear energy, renewable energy, CO2 emissions, and economic growth for nine developed countries: Evidence from panel Granger causality tests*. Progress in Nuclear Energy, 88, 364-374.
- Shropshire, D. (2011). *Economic viability of small to medium-sized reactors deployed in future European energy markets*. Progress in Nuclear Energy, 53, 299-307. 10.1016/j.pnucene.2010.12.004.
- Suolonen, V. (2019). *Competence development for SMR program*. Ettekande slaidid 29. oktoober 2019 Tallinn. VTT Technical Research Centre for Finland LTd.
- Wolde-Rufael, Y & Menyah, K. (2010). *Nuclear energy consumption and economic growth in nine developed countries*. Energy Economics, 32, 550-556. 10.1016/j.eneco.2010.01.004.
- World Bank (2019). *World Bank Open Data*. <https://data.worldbank.org/> Kasutatud novembris 2019.
- World Nuclear Association (2011). *Comparison of Lifecycle Greenhouse Gas Emissions of Various Electricity Generation Sources*.

Peakomponentanalüüsi kaasatud makromajaduse indikaatorid (Maailemapank):

Gross savings as % of GDP; GDP per capita growth rate annual %; GDP per capita in current US \$; Inflation based on GDP deflator annual %; Services value added % of GDP; Industry including construction value added % of GDP; Manufacturing value added % of GDP; Agriculture forestry and fishing value added % of GDP; Trade % of GDP; Gross fixed capital formation % of GDP; Final consumption expenditure % of GDP; Foreign direct investment net inflows % of GDP; Current account balance % of GDP

Tabel 4. Regressioonanalüüs rakendatuna perioodile 1993-2017

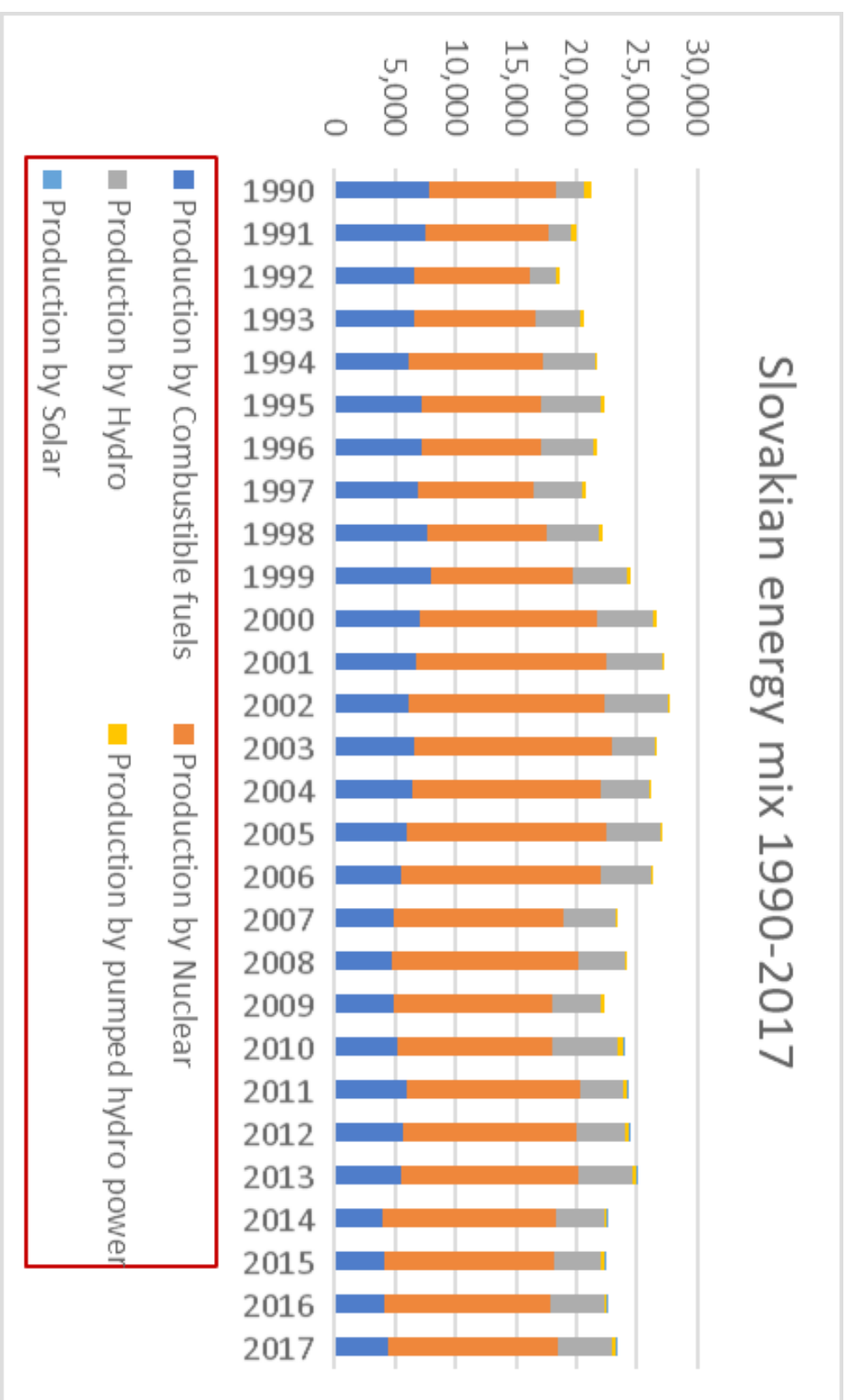
Source	SS	df	MS	Number of obs	=	25
Model	58.883671	3	19.6278903	F(3, 21)	=	2.32
Residual	177.792667	21	8.46631746	Prob > F	=	0.1048
				R-squared	=	0.2488
				Adj R-squared	=	0.1415
Total	236.676338	24	9.86151407	Root MSE	=	2.9097

GDP_growth	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
npp_consumption	-5.072433	9.169821	-0.55	0.586	-24.14212	13.99725
npp_lag1	.169478	11.35592	0.01	0.988	-23.44646	23.78541
npp_lag2	17.78542	8.952175	1.99	0.060	-.8316461	36.40249
_cons	.6087149	1.963308	0.31	0.760	-3.474207	4.691637

Tabel 5. Regressioonanalüüs rakendatuna perioodile 1993-2007.

Source	SS	df	MS	Number of obs	=	15
Model	59.8735184	3	19.9578395	F(3, 11)	=	4.36
Residual	50.3652304	11	4.57865731	Prob > F	=	0.0297
				R-squared	=	0.5431
				Adj R-squared	=	0.4185
Total	110.238749	14	7.87419634	Root MSE	=	2.1398

GDP_growth	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
npp_consumption	-12.23227	7.221536	-1.69	0.118	-28.12676	3.662224
npp_lag1	5.579622	10.42566	0.54	0.603	-17.3671	28.52634
npp_lag2	17.47611	8.817256	1.98	0.073	-1.930536	36.88276
_cons	2.441765	1.566186	1.56	0.147	-1.005388	5.888918



Joonis 6. Slovakkia energiasegu (Allikas: Eurostat)

2. OSA

VÄIKSE MOODULREAKTORI TEHNILISED ASPEKTID JA VALIKUD

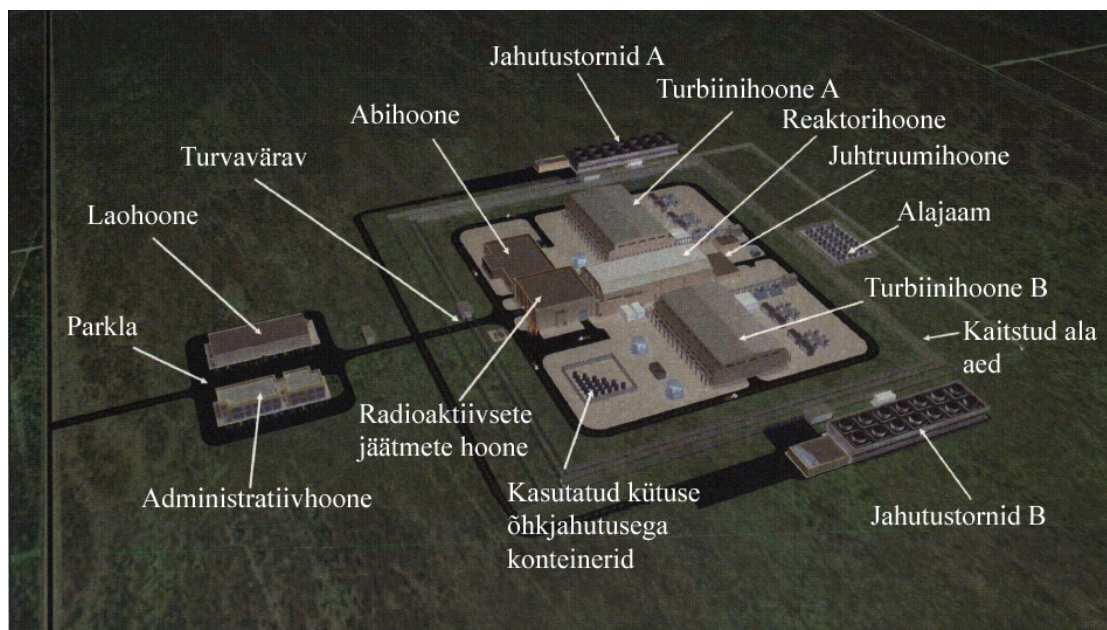
2.1 ÜLEVAADE VÄIKESTEST LITSENTSEERITAVATEST MOODULREAKTORITEST

Peatükis käsitletakse nelja erineva väikemoodulreaktori (NuScale, Terrestrial IMSR-400, Molten Energy SSR-W300 ja GE Hitachi BWRX-300) põhilisi tehnilisi omadusi, ohutust tagavaid süsteeme- ja süsteemide vahelisi erisusi. Nelja erineva tehnoloogia ja arendaja kirjeldus annab ülevaate valikust hetkel litsenseerimisel olevatest väikemoodulreaktoritest. Peatüki lõpus võrreldakse tehnoloogiate tehnilisi ja ökonoomilisi näitajaid.

NuScale Power LLC poolt arendatav surveveemoodulreaktor NuScale Power Module™

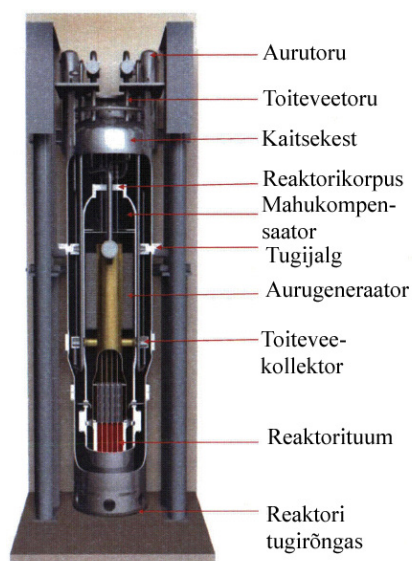
Reaktorit on arendatud 2000-ndate algusest USAs. Reaktori arendust toetab USA Department of Energy üle kahesaja miljoni USA dollariga. 2017 aastal algas litsenseerimisprotsess USA tuumaregulaatori U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC) juures. NuScale reaktoritega jaama on tellinud Utah Associated Municipal Power System ning see on kavas ehitada Idaho National Laboratory territooriumile Idaho Fallsi. Jaam loodetakse saada valmis 2020-ndate teises pooles.

Esialgne litsenseeritav elektri jaam koosneb kaheteistkümnest 200 MW soojusliku võimsusega moodulist elektrilise brutovõimsusega 60 MW, mis teeb jaama elektriliseks koguvõimsuseks 720 MW bruto ja 685 MW neto. Jaama võimsusteguriks plaanitakse üle 95 %. Jaamal on kaks auruturbiinide hoonet (Joonis 1) ning igal reaktoril on oma turbiin, mis on kokkupandud tehases teisel datava raami peale ja transporditakse jaama ühes tükis. Kõike reaktoreid ja kogu jaama muud aparatuuri juhitakse ühest juhtimisruumist. Jaam mahub ära 14 hektarile. Esimehe jaam kasutab kondensaatorite jahutamiseks sundjahutusega jahutustorne. Tulevikus saab komplekteerida jaama võimsuseks täpselt nii palju kui tellija soovib.

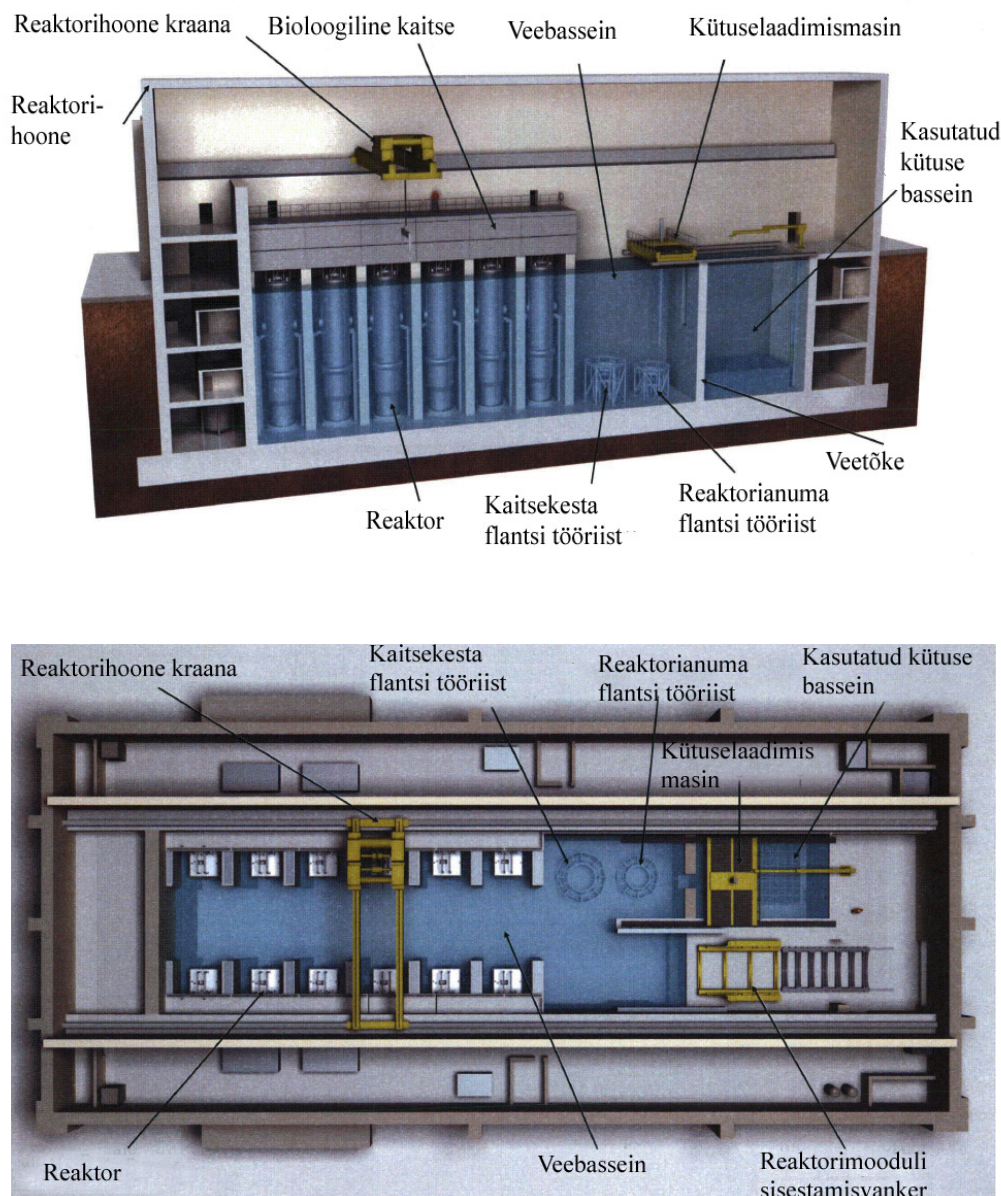


Joonis 1. NuScale tuumajaama ehitised

Reaktorites (Joonis 2) on kasutusel klassikaline surveveereaktori tehnoloogia. Eripäraks on, et kasutatakse pumpade asemel loomulikku tsirkulatsiooni reaktoris jahutusvee tsirkuleerimiseks läbi reaktorituumi ja aurugeneraatorite. Lisaks, aurugeneraatorid ja mahukompensaator asuvad reaktorikorpuse sees. Reaktorimooduli kõrgus on 19,8 m ja läbimõõt 2,7 m. Reaktori surveanum asub omakorda terasest kaitsekestas. Kaitsekesta ja reaktori vahel hoitakse vaakumit, et vähendada soojuskadusid reaktorist, sest kõik 12 reaktorit on asetatud suurde maasisesesse betoonist terasega vooderdatud veega täidetud basseini (Joonis 3). Üks reaktor koos kaitsekestaga kaalub ligikaudu 700 tonni. Reaktor koos kaitsekestaga on 23m kõrge ja läbimõõt on 4,6m. Rõhk reaktoris 12,7 MPa.



Joonis 2. Nuscale reaktori läbilõige



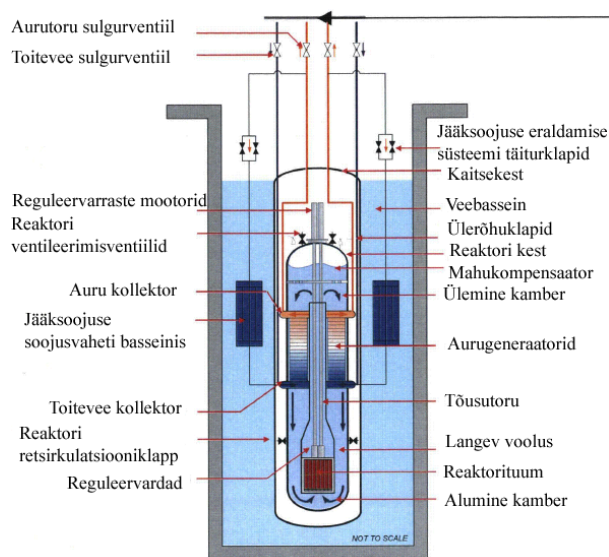
Joonis 3. NuScale tuumajaama reaktorihoone läbilõiked.

Kogu jaam on modulaarne ning jaama ehitamiseks kasutatakse olemasolevaid tehnoloogiasid ja detaile niipalju kui võimalik. Reaktorid ehitatakse valmis tehases ja transporditakse kohale kolmes osas kas autodega, rongidega või vett mööda.

Kütuseks on standardne kergveereaktori kütus, mille rikastatus jääb alla 5%. Kütusekoostudes on 17x17 varrast ning koostu kõrgus on 2 m. Reaktoris on 37 koostu. Reaktoris olev kütuse kogus on 1/20 tavalises surveveereaktoris olevast kütusekogusest. Kütusest vahetatakse korraga välja korraga 1/3 ja reaktori moodul seisatakse kütuse vahetamiseks iga 24 kuu tagant. Kütuse vahetamiseks seisatakse üks moodul korraga ning ülejäänud 11 reaktorit saavad edasi töötada. Kütuse vahetamiseks tõstetakse reaktori tuum basseinis oma asukohast spetsiaalsesse kohta, kus vahetatakse kütust. Kütuse vahetamine võtab aega 10 päeva. Seega, vahetatakse iga kahe kuu tagant jaamas mõnes reaktoris kütust.

Reaktorid on projekteeritud oma konstruktsioonist tulenevalt turvalised, see tähendab, et avariilukorras ei vaja nad inimeste sekkumist ega elektrivarustust, puudub vajadus tagava-

radiiselgeneraatorite ja akude järele. Seda kinnitas ka NRC jaanuaris 2018. Reaktori avriijahutussüsteem on joonisel 4. Avariilukorras, peale reaktori seiskumist sulguvad auru ja toitevee torustikud ning reaktoris ringlev aur suundub reaktorikorpuse välisseinal asuvatesse soojusvahetitesse. Soojusvaheti pind on kontaktis basseinis asuva veega ning soojus antakse üle basseini- niveele. Basseinis on üle 30000 m³ vett. Peale reaktori seiskumist on eralduva soojuse võimsus üle 10 MW, kolme päeva jooksul langeb see alla 1 MW, sel hetkel hakkab vesi basseinis keema. Vett jagub basseinis 30-ks päevaks ja peale seda piisab juba õhust, et reaktorid jahtununa hoida. LOCA (loss of coolant accident) ehk jahutuskao õnnetuse korral avanevad reaktori korpuse ja kaitsekesta vahelised klapid, ning reaktoris keev vesi suundub kesta ja korpuse vahele ning jahutatakse efektiivselt maha basseinis oleva veega. Puudub vajadus kõrgrõhuga sissepritse jaoks, et tuuma jahutada. Puuduvad igasugused jahutuspuumad.



Joonis 4. Reaktori avariijahutussüsteem

Jaamal on väiksem avariilukorra planeerimise tsoon (Emergency Planning Zone - EPR), kui suurel surveveereaktoril. NuScale jaamal on EPR veidi suurem kui jaama territoorium ehk 16 ha. Suurtel surveveereaktoritel on selle raadiuseks keskmiselt 16 km. Selles tsoonis on avariilukorra sattudes ette planeeritud evakuaatsiooni läbiviimine, varjumine ja joodi kasutamine. See on tingitud sellest, et reaktorid on väikesed, lisatud on turvabarjääre (lisaks tavalise surveveereaktori barjääridele on lisandunud suur vee kogus ja reaktorihoone), on madalam reaktorituumasulamise tõenäosus (CDF) $5 \cdot 10^{-9}$ reaktori tööaasta kohta ehk 5 juhtumit miljardi reaktoritööaasta kohta (olemasolevatel reaktoritel 1 juhtum 10000 kuni 100000 aasta kohta ja III+ generatsiooni reaktoritel 1 juhtum 100000 kuni 1000000 aasta kohta) ning juhtumi kulgemine on aeglasem. Valmistaja andmetel on kõige uuem CDF hinnang ühe reaktori kohta $1 \cdot 10^{-10}$ reaktori tööaasta kohta. Jaam on piisavalt turvaline üle elamiseks Fukushima suuruse maavärina, orkaanid, tornaadod ja üleujutuse. Reaktorihoone suudab üle elada kokkupõrke lennukiga vastavalt NRC reeglitele.

Üle 70% 2015. aastal juhtunud tuumaelektrijaamade plaanivälistest seiskamistest jäaks NuScale jaamal olemata tänu jaama konstruktsioonile.

Jaam on suuteline töötama väikeses võrgus. Välise võrgu kadumise korral suudab üks reaktor toota kogu vajaliku elektri, et tagada jaama kogu vajalik omatarve turvaliseks eksisteerimiseks.

Jaam suudab ilma kütust lisamata varustada väikeses võrgus asuvat kriitilise elektrivajadusega 100MW elektrit tarbivat asutust 12 aastat.

Seda tuumajaama saab käivitada külmast olekust ilma võrguühendusest kasutades väikest jaamasest tagavarageneraatorit. Võrguühenduse kadumisel saab jaam edasi töötada ilma ühtegi reaktorit sulgemata suunates auru otse kondensaatoritesse, mis suudavad kondenseerida kõigi reaktorite toodetava auru isegi 100% võimsuse juures, ning jätkata võrku tootmist kohe peale võrgu taastumist. Jaama ehitusmaksumuseks hinnatakse \$3 miljardit USD, mis teeb ühe brutokilovati maksumuseks \$4167. 2022 aastal maksaks NuScale hinnangul sellises N-nda 12 mooduliga jaamas toodetud elekter 2015. aasta rahas 86 USD/MWh. Esimeses jaamas toodetud elekter 95 USD/MWh. NRC reeglite kohaselt peaks jaamas töötama 360 inimest. Tänu tihedal kütuse vahetamisele on otstarbekas hoida jaama palgal kütuse vahetamisega tegelevaid töötajaid ja seda teenust mitte sisse ostma.

Kanada firma Terrestrial Energy Inc. poolt arendatav sulasoolareaktor „Integral Molten Salt Reactor“ IMSR-400

Reaktori litsenseerimisprotsess on käimas Kanadas (algus detsember 2017) ja esimene jaam peaks valmima 2030-nda aasta paiku Ontarios asuva Chalk River Laboratories territooriumile. Firma teeb koostööd tuumajaama operaatoritega nagu Bruce Power, Duke Energy, Engie, NB Power, Nextere Energy, Ontario Power Generation, PSEG, Southern Nuclear ja TVA.

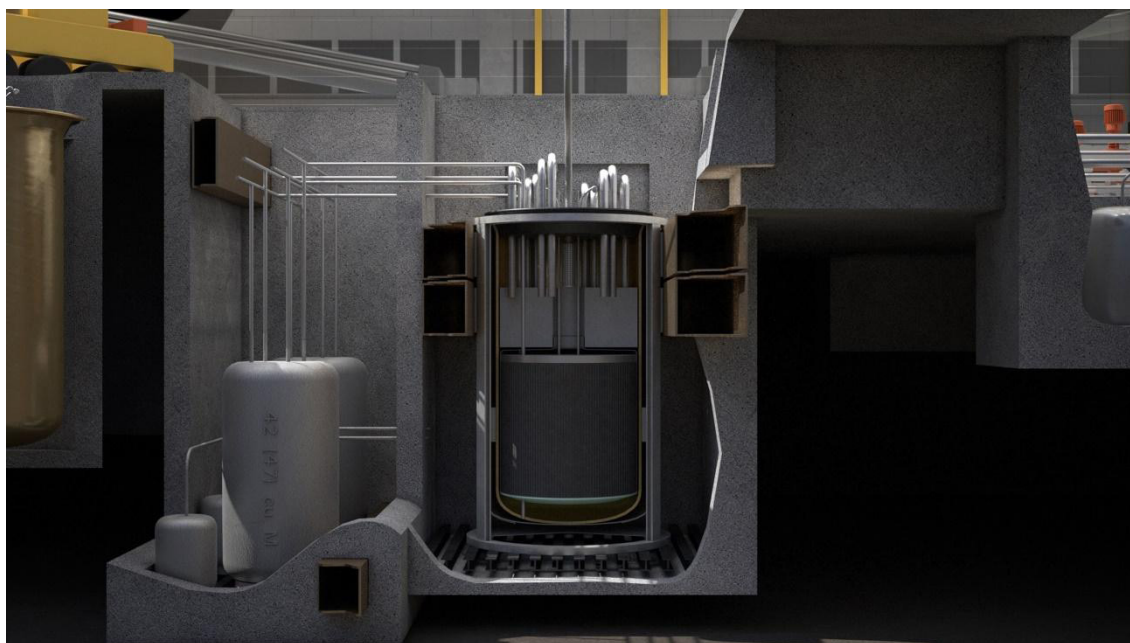
Kavandatava moodulreaktori soojuslik võimsus on 400 MW ja elektriline netovõimsus 185 kuni 192 MW. Reaktorit reklaamitakse elektri tootmiseks, koos akumultatsiooni võimalusega ning lisaks veel soojuse allikana tööstuse jaoks. Kasutatav tehnoloogia põhineb tugevalt Oak Ridge National Laboratory's 1980-ndatel aastatel välja töötatud DMSR reaktoril. Ühe töötava reaktoriga jaam mahub ära 6,8 hektarile.



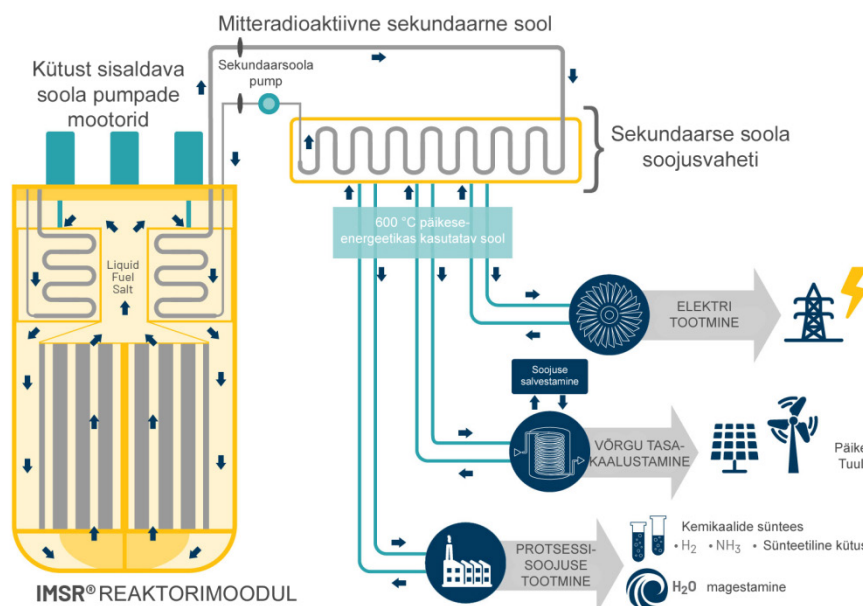
Joonis 1 Terrestrial IMSR reaktoriga elektrijaama läbilõige

Tegemist on soojuslikel neutronitel töötava põletava reaktoriga ehk tegemist ei ole briideriga. Kütuseks on madala rikastusega (alla 5% U-235), mis on soolas UF_4 kujul. Lisaks on kasutatava soola koostises LiF , NaF ja/või BeF_2 , mis suurendavad soola soojusmahtuvust ja madaldavad sulamistemperatuuri. Sool on ka primaarseks jahutusvedelikuks. Vastavalt sellele, kuidas kütus välja põleb, tuleb lisada soola uut kütust. Reaktori eluea jooksul ei pea sealt töötamise ajal soola välja võtma, sest lisatava UF_4 kogused on piisavalt väikesed, et lisatud sool ära mahutada. Reaktori ülaosas on selle jaoks gaasiga täidetud maht olemas. Kuskil 50 % lisatakse 7 aasta jooksul mahuliselt UF_4 juurde. Reaktor sobib ka plutooniumi ja kergveereaktorites ning peale mõningast töötlemist ka raskeveereaktorites kasutatud kütuse kasutamiseks. Reaktor ei sule kütusetsükli, aga on võimeline põletama ära kõik väikeaktiniidid, mis põhjustavad kasutatud kütuse pikaajalise radioaktiivsuse. Selleks tuleb välja võtta osa uraani kasutatud kütusest ning lisada lõhustuvaid isotoope, kas väherikastatud uraani (U-235 4,95%) või kasutatud kütuses olevate väikeaktiniide ja plutooniumi kujul soola enne selle sisestamist uude reaktorimoodulisse. Eraldatud uraani, mis on väheradioaktiivne, saab ilma eritingimusteta hoida tuleviku briiderreaktorite kütuseks. Enamus radioaktiivsetest lõhustumisproduktidest, nagu I-131 ja Cs-137, jäävad soola keemiliselt seotuna. Väike on plutooniumi ja teiste aktiniidide akumulatsioon soolas.

Aeglustiks on reaktoril grafiit. Grafiidi sees on vertikaalsed torujad kanalid, läbi mille voolab kütust sisaldav sool ülesse. Grafiidi sees muutub soolas olev kütus kriitiliseks ja käivitub ahelreaktsioon, mille käigus sool soojeneb. Peale grafidist väljumist katkeb ahelreaktsioon ning maksimumis veidi üle 700 °C soojenenud sool suunatakse reaktorikorpuses asuvasse soojusvahetisse, kus soojus antakse üle sekundaarsele soolale, mis lahkub tuumasaarelt. Soola hoitakse liikumas pumpade abil. Peale soojusvahetit liigub sool reaktorianuma ääres anuma põhjani ning alustab uut ringi tõustes läbi anuma keskel asuva aeglusti üles. Reaktor töötab atmosfäärirõhul.



Joonis 2. Terrestrial IMSR reaktorimooduli läbilõige



Joonis 3. Terrestrial IMSR reaktoriga elektrijaama põhimõtteline skeem koos genereeritava soojuse kasutusvõimalustega

Turvalisuse suurendamiseks antakse sekundaarse soola soojus edasi tertsiaalsele soolale, mis läheb siis kas akumulaatoripaaki või aurugeneraatorisse, milles genereeritakse aur turbiini jaoks. Tertsiaalse soola temperatuur on 600°C. Kuna turbiinseade ei osale jaama turvalisuse tagamisel ja tänu kõrgele siseneva auru temperatuurile saab elektritootmises kasutada olemasolevaid soojuselektrijaama turbiine, mis on odavad ja pakuvad kõrget kasutegurit.

Reaktori eluea pikkust piirab grafiitaeglusti eluiga. Suure võimsustiheduse korral, nagu IMSR-il, on eluiga lühem kui jaama muude komponentide eluiga. Grafiidi vahetamine reaktori sees on väga keeruline ja seoses sellega on ette nähtud, et kogu reaktor koos aeglusti, pumpade, pumpade mootorite, seiskamisvarraste ja soojusvahetitega vahetatakse välja peale 7 aastat töötamist. Tuumasaarel on kaks maasisest betoonist pesa reaktorite jaoks. Peale seitsme aasta reaktori töötamist reaktor seisatakse. Selleks ajaks on teise pesa paigaldatud uus reaktor, mis hakkab peale seda tööle tootmaks auru olemasoleva turbiini jaoks. Pärast mõningat seismist, kui eralduva lagunemissoojuse soojuslik võimsus on vähenenud, pumbatakse kasutatud kütus spetsiaalsesse anumatesse, kust see viiakse peale mingit aega edasi ümbertöötlemistehasesse. Vahetult enne selle reaktori eluea täitumist võetakse eelmine reaktor oma pesast ning transporditakse reaktorihoones asuvasse spetsiaalselt kasutatud reaktori hoidmiseks mõeldud pesa. Tühja pesa paigaldatakse uus reaktor ning käivitatakse kui kõrval asuvas pesas olev reaktor lõpetab oma töötamise.

Reaktor valmistatakse tehases ja transporditakse ühes tükis kohale. Reaktori transpordimass on 170 tonni. Peale paigaldamist lisatakse reaktorisse sool koos kütusega. Reaktorit ei pea korraldagi oma seitsme aastase eluea jooksul lahti tegema ega midagi välja võtma ega ka hooldama. Reaktor asub maaaluses betoonist pesas, mis on kaetud paksust terasest raske kaanega.

Reaktor on ehitatud olemuslikult turvaliseks ning selle võib päevapealt seisata ja on peale seda turvaline ilma inimese sekkumiseta ja lisaenergia kasutamiset. Reaktor on ümbritsetud terase ja betooniga ning kaitstud väliste faktorite, nagu maavärin, pommipahvatus ja lennuki kukkumine, eest.

Vähendamaks radioaktiivsete isotoopide lekkevõimalust ei toimu reaktori avariijahutamine soola väljalaskmisega reaktorist selleks ette nähtud anumatesse nagu see oli lahendatud Oak Ridge National Laboratories 1960-ndatel töötanud sulasoolareaktoril. Reaktori jahutus on tagatud isegi siis, kui reaktoris olevate soojusvahetite kaudu soojuse eraldamine ei toimi. Reaktori anum asub terasest kesta sees. Anuma ja kesta vahel asub sool, millel on kõrge sulamistemperatuur. Normaalse soojuse eraldusprotsessi katkedes tõuseb reaktoris oleva soola temperatuur, mis hakkab soojendama reaktori ümber olevat tahket soola kihti, mis hakkab sulama. Teiselpool kesta on lämmastikuga gaasisärg. Sulanud sool hakkab kesta ringlema ja kannab reaktorist tulnud soojuse edasi gaasisärgis olevale gaasile. Gaasisärgis soojenev lämmastik tõuseb katuse sees asuvasse radiaatorisse, kus soojus vabakonvektsiooni teel antakse välisõhule, ja suunatakse siis tagasi jahtunult reaktori juurde. Gaasisärgi purunemisel siseneb sellesse õhk ning sel juhul jahutatakse reaktorit õhuga. Soojus koos õhuga läheb sel juhul otse atmosfääri ja jahutus paraneb veelgi. Reaktori temperatuuri tõusmise korral sundjahutuse kadumisel ja varraste mitte sisenemisel on ahelreaktsiooni seiskamiseks kasutusel ka neutronmürgiga mahutid, mis sulavad kõrgel temperatuuril lastes neutronmürgi reaktorisse. Lisaks on reaktoril olemas ka tagavara toiteallikad, mis tagavad jahutussüsteemi töö välise toite katkemisel. Need toiteallikad võivad olla tavalised diislid, millede jaoks ei ole vaja tuumajaamas kasutamise sertifikaati. Seiskamisvardad sisenevad reaktorisse automaatselt reaktori sisese soola ringluse katkedes kui ka voolukatkestuse korral.

Reaktor saab töötada täisvõimsusel edasi, kui üks ringluspump seiskub ning on võimeline töötama vähendatud võimsusega, kui ükskõik millised kaks pumpa seiskuvad.

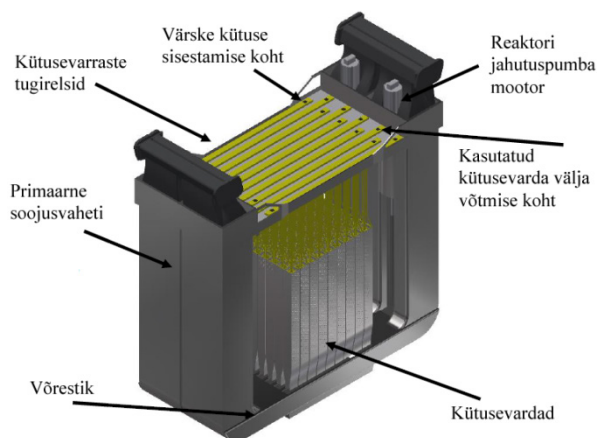
Seoses sellega, et kütus ja jahutusvedelik on üks ja sama ei saa toimuda jahutusvedeliku lekkedaku ehk LOCA õnnetust. Tänu soola omadustele avariolukorras, kui ei suudeta seiskamisvardaid sisestada tõuseb reaktori temperatuur veidi kõrgemale, kus see stabiliseerub, ning ahelreaktsioon seiskub.

Elektrijaama ehitus kestab kuskil 4 aastat. Jaama eluiga 60 aastat. Elektri maksumuseks tuleb arvutuslikult vähem kui 50 USD/MWh.

Suurbritannia firma Moltex Energy Ltd. poolt arendatav sulasoolareaktor „Stable Salt Reactor“ SSR-300

Reaktori litsenseerimisprotsess on käimas Kanadas (algus detsember 2017) ning New Brunswick Poweri tellimisel on kavas ehitada reaktor Kanadasse, Point Lepreau'sse ja see peaks valmima 2030-nda aasta paiku.

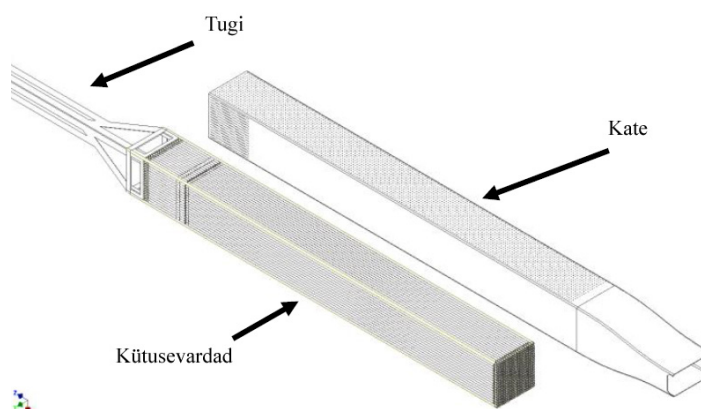
Võrreldes teiste sulasoolakütust kasutanud ja kavandatavate reaktoritega on sellel reaktoril oluline konstruktsiooniline erinevus – tuumkütust sisaldavat soola ei pumbata süsteemis ringi vaid see asub varraste sees (sellest tuleneb ka nimes asuv „Stable“). Tegu on moodulreaktoriga, aga mitte tavalises mõistes, kus ühe moodulitest koosneva reaktori võimsust ei saa muuta, vaid mitmeid sarnaseid reaktori sektiioone elektrilise võimsusega 150 MW saab asetada teineteise kõrvale moodustades ühe tervikliku reaktori ning maksimaalse 8 sektiiooni korral oleks elektriliseks võimsuseks 1200MW. Moodulid (Joonis. 1), mis sisaldavad kütusevarraste hoidjaid, pumpasid, primaarseid soojusvahetiteid, seiskamisvardaid, mõõteriistu, voolukanaleid ja kütusevarraste liigutamissüsteeme jm., ehitatakse valmis tehases ning transporditakse ehitusele, kus pannakse neid kõrvuti nii palju, kui vaja. Otsmised moodulid on poole võimsusega.



Joonis 1. SSR reaktori moodul.

Käesoleval ajal on litsenseerimisel SSR-300W, mis on väikseim võimalik süsteem, mille soojuslik võimsus on 750MW ja elektriline võimsus 300MW. “W” tüübi nimetuses tähendab “waste burner” ehk reaktori kütuseks on vesijahutusega reaktoris kasutatud kütus, mis on muundatud uraani, plutooniumi, väikeaktiniidide ja lantaniidide trikloriidide ehk soolade kujule. Muutes kütusevarraste ja koostude ehitust on tulevikus võimalik kasutada kütusena ka väherikastatud uraani või tooriumit.

Tuumakütus asub soola kujul kütusevardas. Kütusekoost (Joonis 2) sisaldab 18x18 kütusevarrast. Koostud on ümbritsetud kattega nagu keevveereaktoris. Kütusevardad on valmistatud HT9 terasest ja galvaniseeritud tsirkooniumiga. HT9 terast on palju kasutatud tuumareaktories ning tema omadused ja käitumine tuumareaktoris on hästi teada. Kütusevarras on 1,9 m kõrge, 10 mm diameetriga ja 0,3 mm seinapaksusega. Kütusekoostu aktiivosa kõrgus on 1,6 m ja kütusekoostu kogukõrgus on 3,7 m.



Joonis 2. Kütusekoostud

Erinevalt kütusepelleteid sisaldavatest varrastest, kus võib varda eluea lõpus olla töötava reaktori korral rõhk varrastes mitusada atmosfääri, on soola rõhk kogu aeg ümbritseva keskkonna rõhul. Tekkivad kõrge radioaktiivsusega lõhustusproduktid jood-131 ja tseesium-137, mis tahke kütusega varrastes on gaasilises olekus, reageerivad soolaga ning tekkivad mittegaasilised ühen-

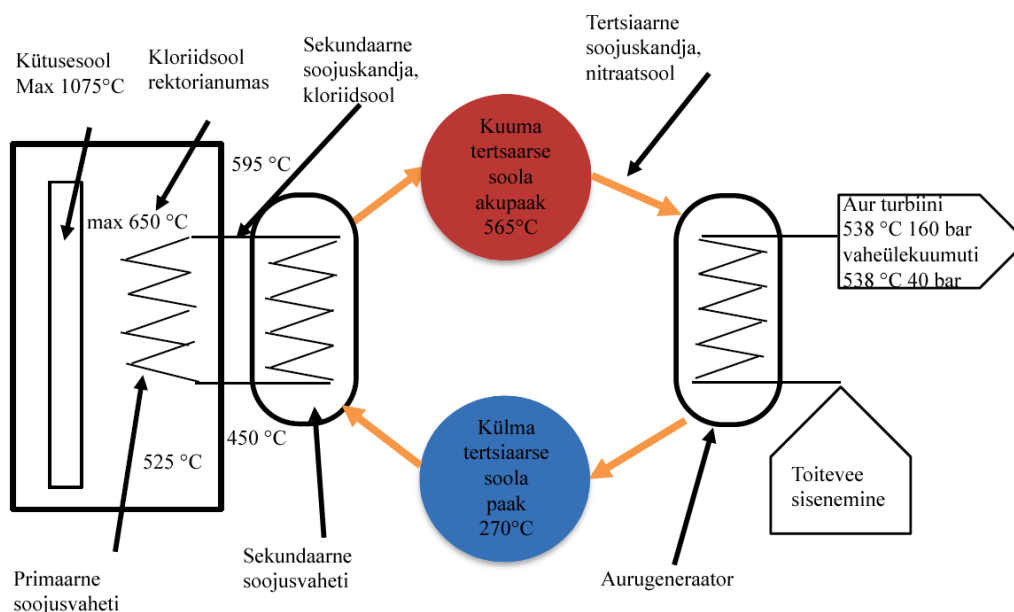
did NaI ja CsCl, mis jäävad soola. Nende isotoopide sidumisvõime soola poolt halveneb alles siis, kui sool läheb keema, mille tekkeks ei eksisteeri reaktoris võimalikke mehhanisme. Tekkivad gaasilised lõhustusproduktid, mida sool ei suuda siduda, on põhiliselt vääriskaasid heelium, ksenoon, krüptoon ja neon, väljuvad kütusevardast reaktori kohale, kus need kogutakse kokku ning peale lühiajalist hoiustamist radioaktiivsuse kadumiseni väljutatakse ümbritsevasse keskkonda. Kokku kogutakse ka Cd, $ZrCl_4$, ZrF ja triitiumi aurud, mis filtreeritakse, pestakse ja kondenseeritakse maha. Need gaasilised komponendid on ainsad, mis võivad potentsiaalse õnnetuse korral lenduda, aga tänu nende pidevale eraldumisele kütusest ja kokku kogumisele on suure õnnetuse korral nende eralduvad kogused väikesed.

Kütusevarraste vahetamiseks ei pea seiskama reaktorit, vaid neid saab vahetada sarnaselt CANDU reaktoritega reaktori töötamise ajal. Kütuse koostud lisatakse ühest reaktori servast ning võetakse välja teisest servast liigutades vardaid ravis järk-järgult edasi. Ühes ravis lisatakse kütust ning liigutatakse varrast edasi reaktori täisvõimsusel töötamisel korra poole aasta tagant. Elektrilise võimsusega 300 MW reaktoris on 20 rivi ja igas ravis kümme kütusekoostu ehk kokku 200 koostu. Tänu pidevale vahetamisele on reaktori reaktiivsus kogu aeg ühtlane, mis omakorda suurendab ohutust. Varras viibib reaktoris 5 aastat. Varras võetakse välja ja selles sisalduv sool läheb ümbertöötlemisele, sest sisaldab veel suures koguses tuumkütust, mida saab värskes vardas kasutada.

Reaktori jaoks kütuse tootmiseks on võimalik reaktori juurde ehitada oma väike kütusetehas, mis võtab kergveereaktoris kasutatud kütusekoostust vardad ning varrastest pelletid ja suunab need elektrolüüsisse, kus võetakse välja enamuse lõhustumisjääke nagu tseesium, strontsium ja jood. Edasi pannakse järele jäänud uraan, plutoonium, väikesed aktiniidid ja lantanoidid naatrium- ja raudkloriidi sisse, kus need asendavad soolaihendites oleva raua.

Kütusevarda keskel on maksimaalseks võimalikuks kütusesoola temperatuuriks 1075 °C. Primaarses jahutuskontuuris olev sool siseneb primaarsesse soojusvahetisse 650 °C juures ja väljub 525 °C juures. Kütusevarda temperatuur on tänu anumapoolsele heale soojusülekandele pea-aegu võrdne soola temperatuuriga reaktori anumas.

Kütusevardad asuvad suures sulasoolaga täidetud anumas. Anumas asuv sool ei sisalda radioaktiivseid elemente, tänu millele on oluliselt madalamad nõuded reaktori ehituseks kasutatavatele materjalidele ning kasutada saab juba olemasolevaid reaktori ehituseks sertifitseeritud materjale. Ei ole vaja tegeleda pidevalt soolkütuse keemilise koostise jälgimise ja parandamisega. Langeb ära ka radioaktiivse soola pumpamise korral tekkivad probleemid ja vajaminevate turvareeglite väljaarendamine ning kasutada võib juba olemasolevaid standardseid pumpasid. Reaktor vastab IAEA turvareeglitele. Sektsiooni äärtes on soojusvahetid (igas sektsioonis 4), milles kütusevarraste jahutamisel soojenenud sool jahutatakse maha sekundaarse soolsoojuskandjaga kuluga 4925 kg/s, mis lahkub peale seda tuumasaarelt. Reaktoris olevat soola pumpatakse läbi soojusvaheti iga soojusvaheti juures oleva pumbaga, mille võimsus on <50 kW tekitades surve <100 kPa, summaarne soola kulu reaktoris täisvõimsusel 5700 kg/s. Jaama soojusskeem on joonisel 3.



Joonis 3. Jaama soojusskeem

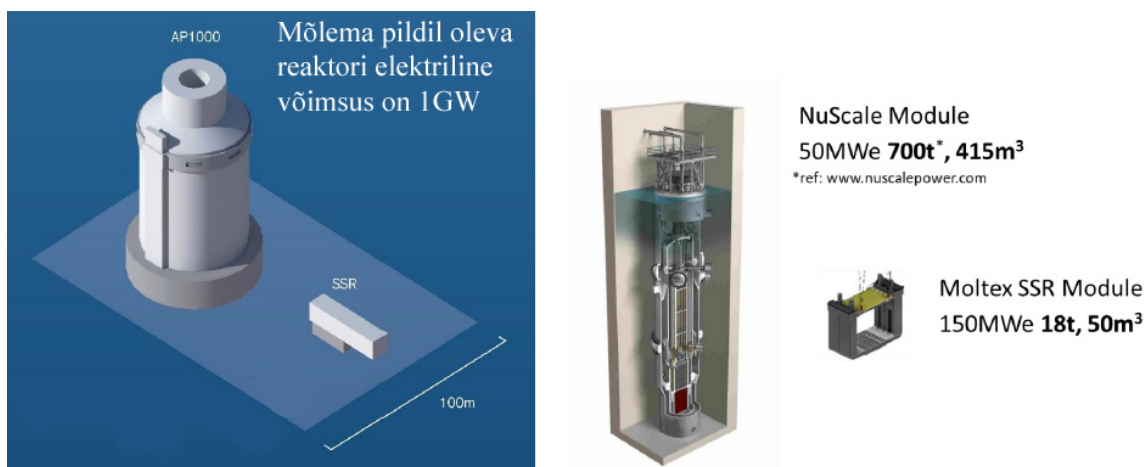
Sool on hea jahuti, sest omab suurt soojusmahtuvust ehk jahutamiseks ei lähe vaja suuri vooluhulki. Sool ei neela peaaegu üldse neutroneid ning ei lagune kiirguse mõjul. Sulasool on väga korrosiivne, kuid Moltexil on rida patente, kuidas sellega toime tulla ning korrosiooni vähendamiseks galvaniseeritakse kütusevardad tsirkooniumiga ja jälgitakse, et soolas oleks kogu aeg taandav keskkond. Reaktori korpusel materjalid on kaitstud neutronvoo eest tänu anumas olevas soolas sisalduvale väikesele kogusele hafniumile, mis neelab neutronid enne, kui need jõuavad korpuseni. Soola koostist peab jälgima ning eraldama kiirguse toimet soolas tekkinud uued isotoobid ning vastavalt vajadusele aeg-ajalt lisada hafniumtetrafluoriidi. 60 aastase reaktori eluea jooksul uut soola ei ole vaja lisada

Sekundaarse soolsoojuskandjas akumulunud soojus antakse üle tertsiaarsele nitraatsoolast soojuskandjale kuluga 3125 kg/s, mis tagab selle, et tuumasaar on täielikult lahutatud auru kontuurist ning see omakorda suurendab veelgi turvalisust. Nitraatsoolad on kasutusel akumulatsiooniks soojust kontsentreerivates päikeelektrijaamades ning see tehnoloogia on seega praktikas ära katsetatud. Tertsiaalses kontuuris voolav sool temperatuuriga 550 °C suunatakse kas otse aurugeneraatorisse või akupaakidesse, kus saab seda soojust hiljem kasutada elektri tootmiseks. Jaam sobib tänu soolas soojuse akumulatsiooniga tipujaamaks, aga sel juhul on vaja lisaturbiine tipu ajal elektri tootmiseks. Akupaakide mahtuvus ja tipuvõimsus tuleb leida majandusarvutusega.

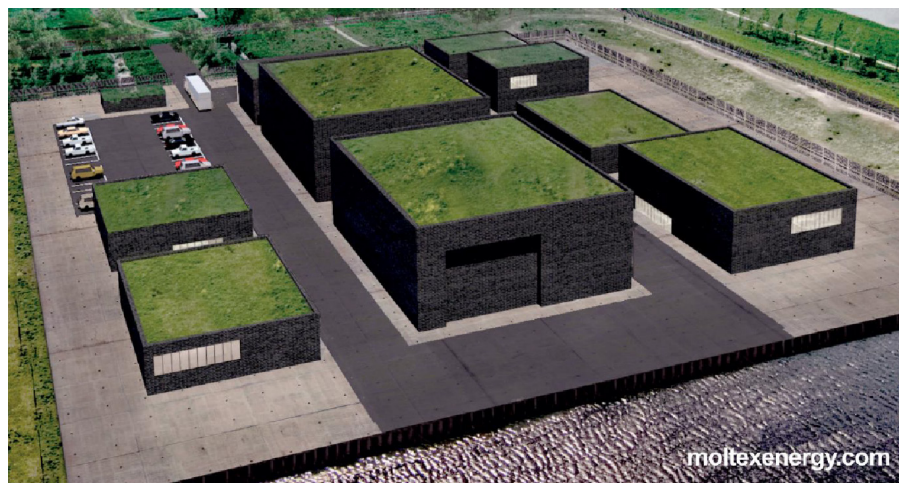
Aur väljub aurugeneraatorist parameetritega 538 °C ja 160 bar ning vaheülekuumendusejärgselt on auru parameetrid 538 °C ja 40 bar. Ökonomaiser, aurusti, ülekuumendi ja vaheülekuumendi asuvad eraldi korpustes ning igal turbiinil on eraldi aurugeneraatorid. Saab kasutada tavalisi soojuselektrijaama turbiine, mis maksavad kordades vähem vesijahutusega reaktoritega elektrijaamade turbiinidest. Aurugeneraatori toitepump töötab oma auruturbiini jõul. Jaama omatarve kaetakse eraldi auruturbiiniga elektrigeneraatoriga, mis lahutab jaama seadmed välisest elektrivõrgust. Esialgses versioonis on kondensaator projekteeritud töötama õhkjahutusega.

Reaktor on isereguleeruv. Reaktori temperatuuri tõustes väheneb reaktori võimsus füüsikaseaduste tõttu iseenesestlikult ning temperatuuri langedes võimsus kasvab. See on ka ainus moodus reaktori võimsuse reguleerimiseks. Sektsioonide vahel kahekaupa asetsevad labakujulisi booriühendit sisaldavaid reguleervardaid kasutatakse ainult reaktori seiskamiseks. Reaktor on alati seiskunud olekus, kui temperatuur reaktoris on 800 °C või suurem. Avariolukorras, kui kaob elekter ning soola ei pumbata enam ega vardad ei sisene, tõuseb temperatuur reaktorianumas 13-14 tunniga maksimumini <900 °C ja langeb siis 800°C juurde kuskil 35 tunniga ning jääb selle juurde püsima. Reaktori jahutus toimub sel ajal vabakonvektsiooniga väljast võetud õhu abil, mis uhub reaktorianuma seina väliskülge ning juhitakse siis välja atmosfääri. Reaktor on peale sellist intsidenti täiesti kasutuskõlbulik ja sellise juhtumi toimumise tõenäosus on samas suurusjärgus kergveereaktori tuuma sulamisega, ainult SSR-i korral ei eraldu ümbritsevasse keskkonda üldse radioaktiivset saastet. Reaktori normaalsel seiskamisel koos varraste sisestamisega ilma jaamasisesse elektrikatkestuseta on nõue omada minimaalselt soola akupaake mahtuvusega 35 MWh, et akumuloida soojust, mis eraldub kohe peale seiskamist. Peale selle soojuse ülekandmist toimub edaspidi soojuse ülekandmine anuma soolalt vabakonvektsiooniga sekundaarsele soolsoojuskandjale ning sealt tertsiaarsele, aga neid soojuskandjaid tuleb juba pumbata.

Reaktor on kompaktne ning 1000 MW reaktor mahub hoonesse mõõtmetega 30x17x8 m (Joonis 4) ning on oluliselt väiksem võrreldes kergveereaktoritega. Võrreldes kergveereaktoritega tuleb tuumasaar oluliselt väiksem. 300 MW reaktori mõõtmed on 6x5,3x4,2 m. Kogu 300MW jaam ilma lisaturbiinide ja akupaakideta mahub ära maalapile mõõtmetega 150x150 m (Joonis 5).



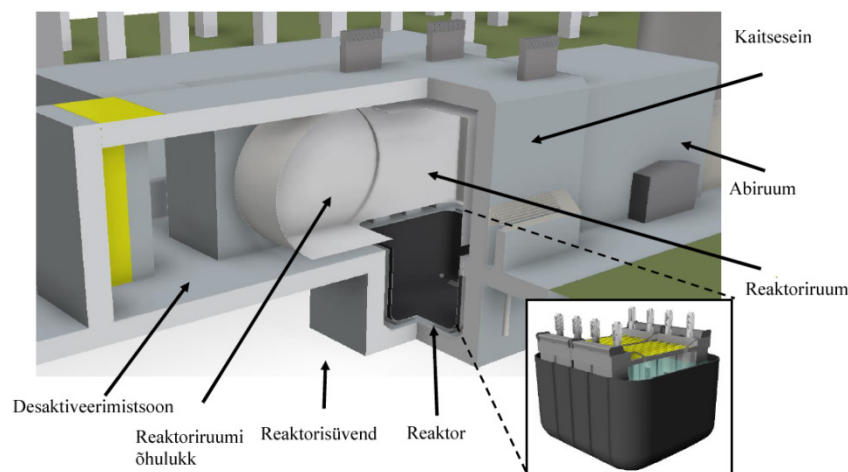
Joonis 4. Erinevate reaktorite suuruse võrdlus.



Joonis 5. Moltex Energy nägemus nende tuumajaamast

Kogu tuumasaarel on kõik materjalid atmosfääri rõhul. Kasutatavad soolad on vedelad vahemikus 400 °C kuni 1500 °C, seega ei ole suurt rõhku vaja. Reaktor ei vaja enda ümber suurt mahtu, sest puuduvad rõhu all olevad mahud, millele on avariiolukorras vaja paisumisruumi. Eeliseks on, et kõrge rõhuga aurugeneraatorid asuvad väljaspool reaktoriruumi, mis suurendab ohutust, sest auruõnnetustel ei ole mõju reaktorile ja ilma rangete erinõueteta ehitatud aurugeneraatorid teevad jaama odavamaks.

Terasest reaktorianum asub terasega vooderdatud betoonist süvendis. Anuma kohal asuv ruum on õhulukuga hermeetiliselt suletud ning on täidetud argooniga. Reaktorit ümbritseva hoone seinad on paksusega 1 m. (Joonis 6)



Joonis 6. Tuumasaar

Jaama maksumuse uuring telliti sõltumatult firmalt Atkins Ltd, mis nüüd kuulub SNC Lavalinile. N-inda reaktori korral oleks elektrilise võimsuse 1 GW korral reaktori maksumus 1330 GBP/kW (2015 aasta GBP). 300 MW võimsuse korral oleks esimese omasuguse reaktori maksumus 3336 GBP/kW ja järgmised ehitatavad reaktorid oleks juba oluliselt odavamad.

Arvutusse läksid sisse kõrged Suurbritannia tööjõukulud ning ei arvestatud sellega, et tegu on modulaarse konstruktsiooniga. Ligikaudu pool maksumusest on tuumasaare maksumus, mille tegeliku suuruse saab teada alles peale esimese reaktori valmis ehitamist, aga ülejäänud summa on muude rajatiste maksumus, milledes kasutatav tehnoloogia on laialdaselt kasutuses ning seega on hinnatud oluliselt täpsemalt. Tipujaama korral lisandub hinnale kolmandik akupaa-kide ja lisaturbiinide ehitamiseks.

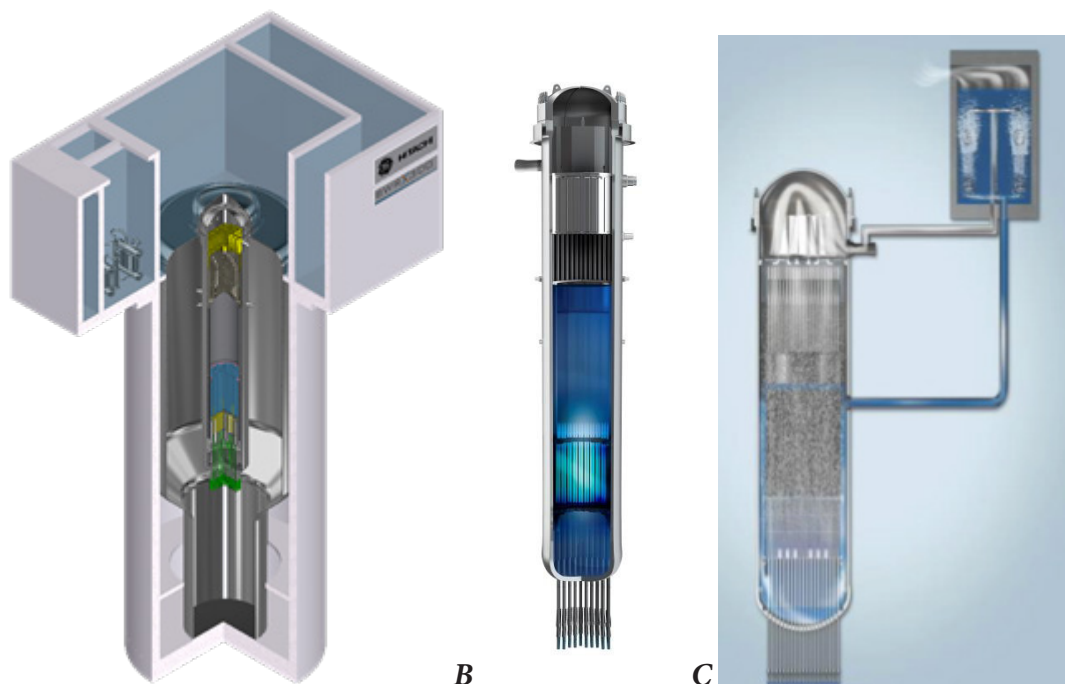
Elektrihinna maksumuseks tuleks hinnanguliselt 45-50 GBP/MWh. Käitamiskulude aluseks on võetud kulud kaasaja Suurbritannia PWR tuumajaamas. Tegelikud kulutused peaks tulema väiksemad, sest SSR-is on oluliselt vähem igasuguseid süsteeme, mida hooldada, ja kasutatud kütust kasutades maksavad kütuse omanikud sellele peale ning sel juhul läheb hind odavamaks hinnanguliselt kuskil 6,5 GBP/MWh võrra.

Jaapani-USA ühisfirma GE Hitachi Nuclear Energy poolt arendatav keevaveereaktor BWRX-300

Tegemist on ligikaudu 300 MW_e elektrilise võimsusega moodulreaktoriga (Joonis 1), mille di-sain põhineb sama firma 1520 MW_e võimsusega ESBWR (Economic Simplified Boiling Water Reactor) reaktoril, mis läbis USA NRC litsenseerimisprotsessi 2014 aastal. ESBWR reaktor omakorda põhineb juba töötavatel ABWR (Advanced Boiling Water Reactor) reaktoritel. See reaktor on GE keevaveereaktorite 10. arenduspõlvkond. Litsents loodetakse NRC-lt kätte saa-da kiiremini, sest sarnasusi ESBWR-iga on palju ning litsenseerimisprotsess ei tohiks seetõttu palju aega võtta. Kohese tellija tõsise huvi korral oleks firma arvates võimalik esimene selli-se reaktoriga elektrijaam käivitada aastaks 2029. USA Department of Energy toetab reaktori arendamist 1,9 miljoni USD-ga. GE Hitachi arendab seda reaktorit koos Exelon Generationi, Bechteli, MIT ja Dominion Energy-ga.

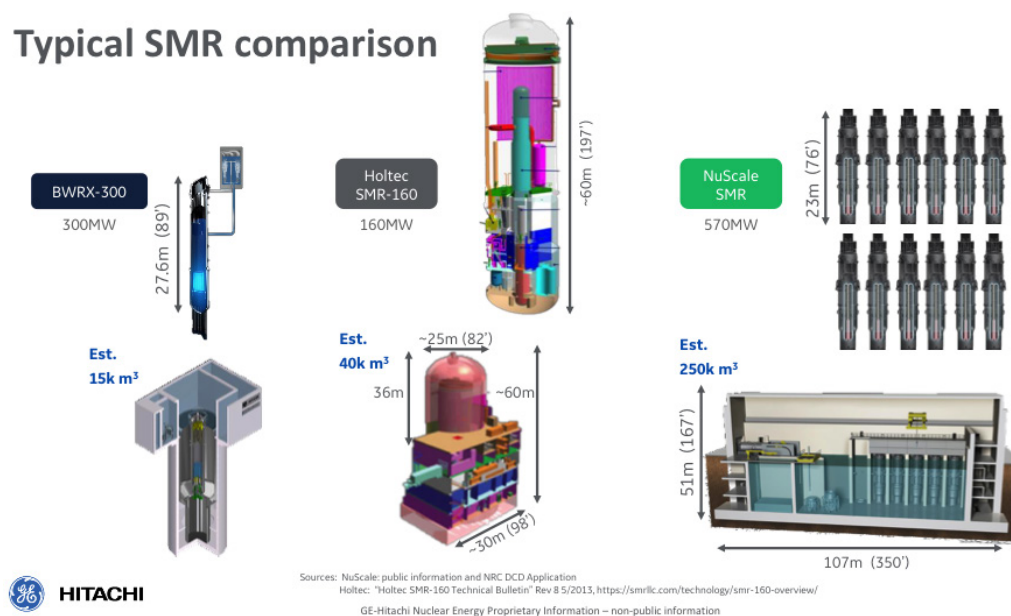
Jaama konstrueerimiseks ja ehitamiseks kasutatav tehnoloogia on ennast tõestanud juba val-mis ehitatud tuumajaamades ja muudes tehnilistes ehitustes. Suurim tehniline läbimurre on selles, et on suudetud konstruktsiooniga vältida suure jahutusvee kao õnnetuse (LOCA) toi-mumise võimalikkust. Tänu sellele on võimalik ehitada oluliselt kompaktsemreaktorihoo-ne ning rakendada passiivseid ohutusmeetodeid aktiivsete asemel. Võrreldes oma suure venna ESBWR-iga on vaja 1 MW võimsuse kohta poole vähem ehitusmahtu ja turvalisusega seotud betooni (15500 m³ vs. 160000 m³). Võrreldes teiste arendatavate väikeste moodulreaktoritega on BWRX-300 suurus oluliselt väiksem (joonis 2). Kahe reaktoriga ja jahutustornidega elekt-rijaama kavandatav pealtvaade on joonisel 3 ning selline jaam mahub maalapile mõõtmetega 253x282m.

Reaktoril puuduvad ringluspumbad ja on loodud isoleeritud lagunemissoojuse eraldamise süs-teem, mis suudab reaktorit jahutada ilma inimeste sekkumiseta ja välise energiata passiivselt üle seitsme päeva. Peale seda peab lagunemissoojuse isolaatorkondensaatorisse lisama vett, mida saab teha ilma reaktorihoonesse sisenemata kasutades ükskõik millist pumpa (kaasaskantav, tu-letõrjeautol).

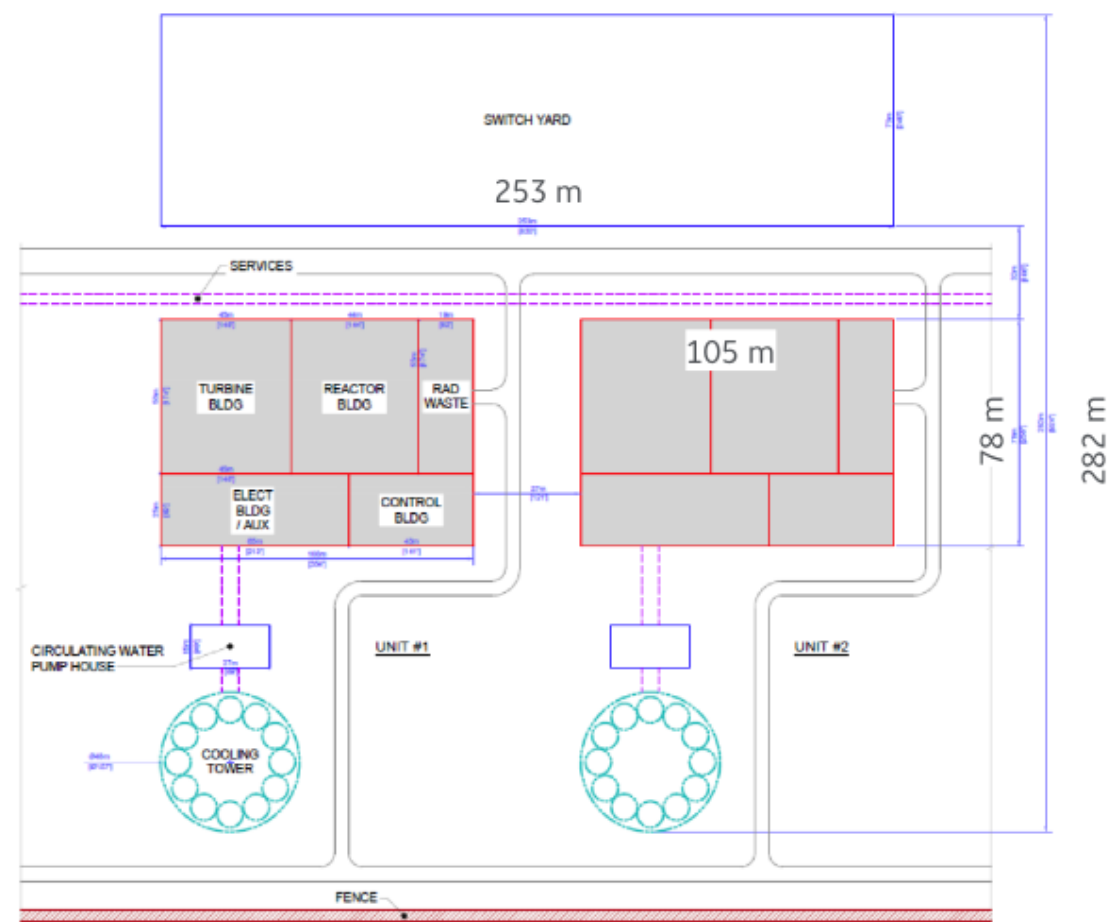


Joonis 1. A – BWRX-300 reaktor reaktorihoones, B – BWRX-300 reaktor C – reaktori jahutamine avarii korral läbi isolaatorikondensaatori.

Typical SMR comparison



Joonis 2. moodulreaktorite mõõtmete võrdlus.

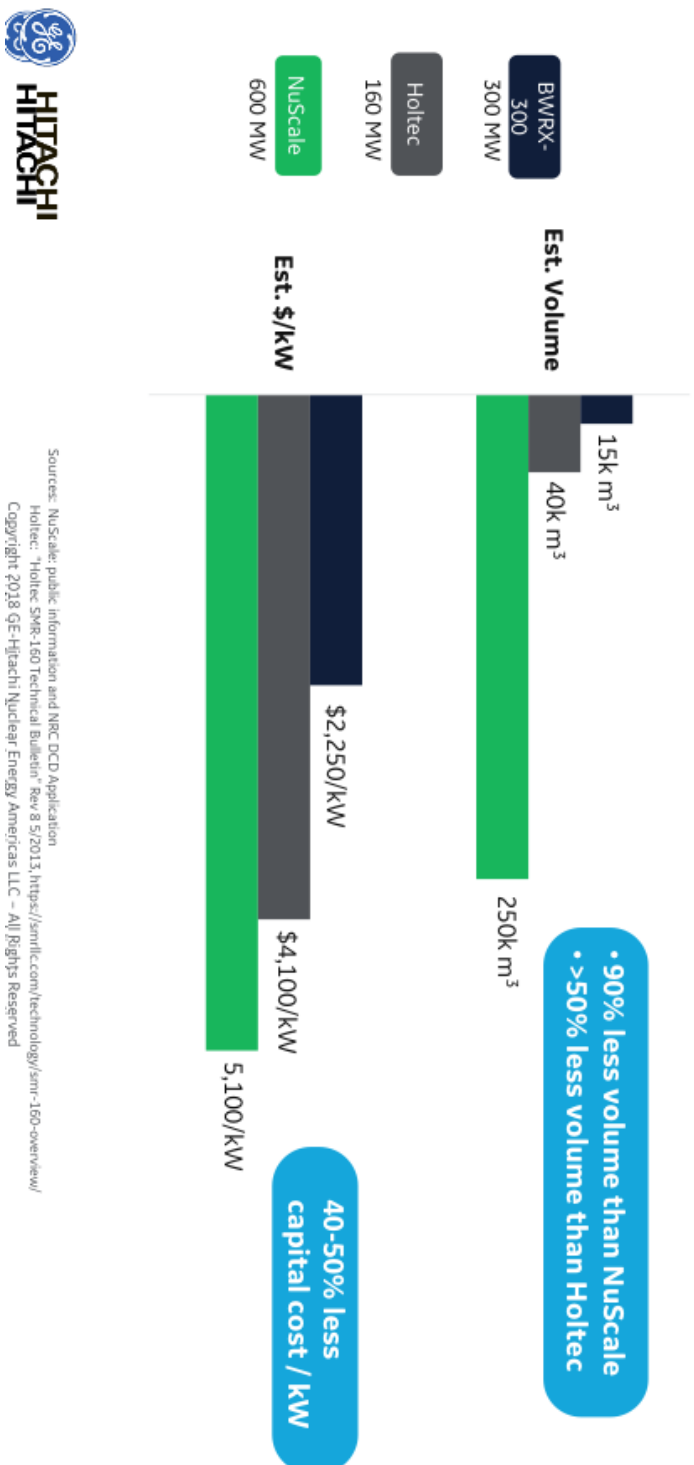


Joonis 3. Kahe BWRX-300 reaktoriga jaama võimalik skeem.

Reaktor ja muud kasutatavad seadmed on standardsed ning neid saab kulude kokkuhoiuks valmistada ükskõik millises tehases üle maailma ning transportida valmis moodulitena ehitusplatsile, kus saab neid lihtsalt kokku monteerida. Ehitustehnoloogiad on ära katsetatud ning ennast õigustanud Jaapanis juba töötavate ABWR reaktorite ehitamisel.

BWRX-300 reaktor on hinnanguliselt ainult 10% suure kaasaegse tuumaelektrijaama suuruselt ja ehituskeerukusest. Reaktori ehitamiseks kulub hinnanguliselt 60% vähem kapitali, kui muude kaasaegsete kergeveereaktorite ehitamiseks, mis on saavutaud suuruse ja süsteemide keerukuse vähendamisega. Tänu vähema arvu süsteemide olemasolule, mida on vaja hooldada, vähenevad hoolduskulud ning vajaliku personali hulk. Jaama maksumuseks loodetakse saada 2250 USD/kW kanti N-inda ehitatud reaktori korral ja toodetava elektri omahinnaks 35 USD/MWh. Hinnanguline võrdlus erinevate moodulreaktorite maksumuse kohta on toodud joonisel 4. Kogu elutsükli maksumus ehk siis elektri hind suudaks konkureerida maagaasi põletavas kombineeritud tootetud elektri hinnaga.

BWRX-300 compared to typical PWR SMRs



Joonis 4. Moodulreaktoritega jaamade hinnangulised maksumused.

Reaktori valmistaja	Moltex Energy Ltd	Terrestrial Energy Inc.	NuScale	GE Hitachi
Nimetus	SSR-300W	IMSR-400	Power Modules	BWRX-300
Tüüp	Sulasoola-reaktor	Sulasoola-reaktor	Survevee-reaktor	Keevavee-reaktor
Generatsioon	IV	IV	III+	III+
Kütus	Soolas	Soolas	UO ₂ pelletid vardas	UO ₂ pelletid vardas
Soojuslik võimsus	750 MW	400 MW	12x200=2400 MW	
Elektriline võimsus neto	300 MW	185-192 MW	684 MW	
Elektriline võimsus bruto		194-202 MW	12x60=720MW	300MW
Kasutegur, neto	40%	46 – 48%	28,5%	34%***
Esimese reaktori valmistamisaeg	2030	2030	2026	2029
kW maksumus*	2566 GBP		4167 USD	2250 USD
Elektri MWh omahind*	45-50 GBP	50 USD	86 USD	35 USD
CDF	-**	-**	1x10 ^{-10***}	1,7x10 ^{-8****}
Passiivne ohutus	+	+	+	+ 7päeva
Kütuse lisamine	reaktori töötamise ajal	reaktori töötamise ajal	üks reaktor seisatakse korraga	24 kuud
Soojuse akumulereermise võimalus	+	+	-	-
Rõhk reaktoris	~atmosfääri rõhk	~atmosfääri rõhk	12,7 MPa	8,62 MPa****
Auru rõhk turbiini ees	160 bar	190 bar		7,17 MPa****
Auru temperatuur turbiini ees	538 °C	585 °C		287,7 °C****
Jaama pindala	150*150 m	6,8 ha	14 ha	
Ehitamise kestus		4 a	32 kuud	
Jaama eluiga	60 a	60 a	60 a	60 a
Võimsustegur	>91%	>90%	>95%	>92%***

* erinevate aastate (2015-2019) hinnangud

**CDF(avariide tõenäosus reaktor/aasta) ei ole leitav

*** ühe reaktori kohta

**** ESBWR väärtused, millel põhineb disain

2.2 VÄIKESTE MOODULREAKTORITE OHUTUSPARAMETRID

Peatükk annab ülevaate tuumareaktorite ohutuse üldistest põhimõtetest keskendudes moodulreaktoritele ja nende ohutuslikule eripärale. Tuumareaktorite ohuolukorras seiskamiseks kasutatakse erinevaid meetodeid. Moodulreaktorite uuenduslikud lahendused lubavad alandada õnnetuste riski vähendades opereerimiseks vajalike süsteemide arvu ja mõnel juhul ka vajadust aktiivsete ohutussüsteemide järele. Väikeste moodulreaktorite ohutuse tagavad tuuma väiksus ja sellest tulenev madal jääksoojuse hulk tänu millele on võimalik reaktoreid jahutada passiivseid süsteeme kasutades.

Tuumaanergeetika turvalisus sõltub sarnaselt teistele võrreldavatele tööstusharudele intelligentsest plaaneerimisest, nõuetekohasest projekteerimisest koos konservatiivsete varutegurite ja tagavarasüsteemidega, kõrgkvaliteetsetest komponentidest ning hästi arendatud turvakultuurist opereerimisel.

Olemuslik turvalisus (*inherent safety*) ja konstruktsioonist tulenev turvalisus (*safety-by-design*) on tuumajaamade projekteerimisel ja ehitamisel kaks väga tähtsat terminit. Olemuslik turvalisus tähendab seda, et reaktoril on mingi omadus, mis välistab teatud tüüpi õnnetuse, samas kui konstruktsioonist tulenev turvalisus tähendab seda, et reaktorile on lisatud mingi teadlikult konstrueeritud lahendus, mis tekitab sarnase efekti. Esimese näiteks on sulasoolreaktoritel soola olemine atmosfääri rõhul, mis välistab reaktori plahvatuse ning teise näiteks on reaktori asetamine suurde basseini (NuScale), mis välistab selle, et reaktoril kaob jahutus ja tekib vajadus rõhu all olevaid gaase ja auru reaktorist välja lasta. Neid kahte turvalisuse liiki üritatakse kaasaja reaktorite projekteerimisel ja ehitamisel tekitada.

Tuumajaama ohuolukorras väljalülitamine ja lagunemissoojuse eraldamine reaktorist toimub kõikides jaamades spetsiaalselt selle jaoks projekteeritud ja ehitatud ohutussüsteemidega. Esimene asi on seisata ahelreaktsioon seiskamisvarraste sisestamisega ja lisaks võimalusel ka neutronmürkide lisamisega reaktori jahutuskeskkonda. Tugeva reaktiivsuse negatiivse temperatuuriteguriga reaktorid vähendavad oma võimsust või seiskuvad ise peale seda, kui temperatuur reaktoris on piisavalt tõusnud. Sulasoola reaktorid omavad tugevat negatiivset temperatuuritegurit ning kui soola temperatuur on tõusnud üle 800°C seiskub ahelreaktsioon. Kohe peale seiskamist jätkab reaktor soojuse genereerimist ca 7% suuruse võimsusega reaktori soojuslikust võimsusest radioaktiivsete isotoopide lagunemise tõttu. See võimsus hakkab ajas langema, aga jahutusvajadus jääb reaktorile seniks, kuni piisav kogus radioaktiivsetest isotoopidest on lagunenud. See tähendab, et olenevalt reaktori konstruktsioonist tuleb jahutb see isegi aastasadu, kui reaktoris on kütus sees.

Iga tuumajaama ehitamisel projekteeritakse süsteemid, mis tagaksid reaktori turvalise seiskamise ja seisvas olekus hoidmise tavalisest tööolukorrast erinevates olukordades ja õnnetuste korral. Tulenevalt nende süsteemide opereerimise moodustest on tuumajaama ohutussüsteemid kahte liiki: passiivsed ja aktiivsed ohutussüsteemid. Ajalooliselt on põhiliselt ja väga laialdaselt kasutatud aktiivseid ohutussüsteeme, kuid kolmanda põlvkonna reaktorite projekteerimisel on juba laialdaselt kasutatud passiivseid ohutussüsteeme ning neljanda põlvkonna reaktorite juures kavandatakse enamik reaktoreid juba ainult passiivsete ohutussüsteemidega.

Aktiivsed ohutussüsteemid nõuavad käivitamiseks ja funktsioneerimiseks välist toiteallikat, jõudu, käivitavat tegevust või signaali. Sellisteks seadmeteks on lagunemissoojuse eemaldamise süsteemid, mille käivitamiseks on vaja mootoritega avatavaid ventiile ja pumpi jahutusvee

pumpamiseks. Selliste süsteemide töötamine eeldab väliste toiteallikate olemasolu. Isegi mitme sõltumatu süsteemi olemasolu ei taga, et suure õnnetuse korral töötaks kas või üks süsteem, nagu seda näitas Fukushima õnnetus.

Passiivsete ohutussüsteemide tööle hakkamiseks ja töötamiseks on vaja ainult füüsikaseaduste toimimist ning seega on need oluliselt vähem ohustatud välistest mõjuritest. Raske on ehitada täielikult passiivsete ohutussüsteemidega tuumajaama ning näiteks USAs loetakse passiivsete süsteemide hulka ka akudelt või suruõhuga töötavad ventiilid, mis käivitavad süsteemi, mis iseenesestlikult töötab passiivselt. Passiivsed turvasüsteemideks loetakse ka näiteks reaktori korpust ning reaktorihoonet. Aktiivsed turvasüsteemid on pumbad, ventiilid, generaatorid ja igasugused muud mehhanismid ja elektroonika.

Osadel reaktoritel olevad passiivsed ohutussüsteemid töötavad tuumajaama eluea lõpuni. Näiteks NuScale, Terrestrial ja Moltexi reaktorite jahutamine toimub passiivselt nii kaua kui vaja, sest piisab ka õhust, et reaktori temperatuuri madalal hoida. Enamusel moodsatel vesijahutusega reaktoritel nagu Westinghouse AP-1000 on passiivne jahutus tagatud ainult 72 tunniks ning väikesel moodulreaktoril GE Hitachi BWRX-il üle 7 päeva ning siis peavad inimesed sekkuma lisades süsteemi vett, mis tagab piisava jahutuse.

Samas võivad passiivsed ohutussüsteemid vedada alt, näiteks puruneb kaitsekest, mis oleks pidanud hoidma rõhu all tuumamaterjali endas. Eriti tähtis ongi, et sellise olukorda vältimiseks peaksid süsteemid olema olemuslikult turvalised ehk eelmise näite varal võiks olla selle kaitsekesta taga reaktor, kus ei ole rõhu all materjali (näiteks sulasoola reaktor), mis kesta purunemisel hakkaks välja lekkima.

Passiivsed ohutussüsteemid lagunemissoojuse eraldamiseks töötavad kõik kasutades looduslikku fenomeni, milleks on üldjuhul vabakonvektsioon. Kui jahedam gaas (õhk) või vedelik (vesi) on kontaktis kuuma pinnaga, siis nende temperatuur tõuseb ning tihedus väheneb. Hõredam keskkond tõuseb üles ning asemele voolab allpoolt jahedamat ja tihedamat keskkonda. Selle käigus viiakse minema vabanevat soojust. Osadel reaktoritel on lisaks lihtsale õhu või vee vabakonvektsioonile lisatud ka veel vee aurustamine. Veel on suur aurustumissoojus ning tänu sellele kantakse minema suurem kogus soojust, kui see oleks ainult vee või õhuga jahutamise korral. Moodsatel sulasoolareaktoritel kasutatakse lagunemissoojuse transpordiks õhku, kuid surveveereaktorite ja keevaveereaktorite korral on kasutusel vee aurustamine (NuScale, GE Hitachi BWRX). Vee aurumist kasutades on probleemiks see, et mingil hetkel saab vesi otsa. Suurte reaktorite nagu AP-1000, EPR aga ka väikeste moodulreaktorite nagu GE Hitachi BWRX korral tähendab see seda, et peale mingit ajavahemikku tuleb hakata vett lisama, et tagada jahutus. Väikestel moodulreaktoritel nagu NuScale on aga vett piisavalt palju ning peale selle täielikku aurumist piisab juba õhust, et tagada reaktori piisav jahutamine, sest eralduva lagunemissoojuse võimsus on selleks ajaks juba piisavalt langenud.

Kõik kaasaegsed reaktorid asuvad hoonetes (varustatud terasest ja betoonist kaitsekuplitega), mis suudavad vastu pidada isegi lennukiga kokkupõrkele. Kaasaegsed väikesed moodulreaktorid ehitatakse suures osas maa alla, mis vähendab oluliselt võimalikke väliseid kahjustusi.

Uute moodulreaktorite (sõltumata kasutatavast tehnoloogiast) ohutusele aitab kaasa see, et nende võimsus on suurtest reaktoritest väiksem, seega ka tuumkütuse kogused on väiksemad. Seoses sellega eraldub neist reaktori seiskumisel vähem lagunemissoojust, kui suurtel reaktoritel. Väiksem on ka tõsise õnnetuse korral potentsiaalne kogus tuumasaastet, mis võib reaktorist välja pääseda. Moodulreaktorite kasutamise korral on väiksem avariolukorra planeerimise tsoon (Emergency Planning Zone EPR), kui suurel surveveereaktoril, jäädes enamusel juhtu-

del jaama territooriumi suuruseks või siis veidikese suuremaks. Selles tsoonis on avariilukorra sattudes ette planeeritud evakuaatsiooni läbiviimine, varjumine ja joodi kasutamine. Samas on moodulreaktoreid sageli ühes kohas koos rohkem ning summaarne tuumkütuse kogus läheneb suurte reaktorite omale. Eeliseks on aga see, et see kütus on mitmete reaktorite ja korpuste vahel jaotatud ning mitme reaktori samaaegse purunemise tõenäosus on väiksem.

Moodulreaktorites on ohutus kasvanud ka tänu sellele, et vähendatud on igasuguste torustike ja pumpade hulka, tänu millele on vähenenud jahutus kao (LOCA – Loss of Coolant Accident) õnnetuse ulatus ja tõenäosus. NuScale puhul puuduvad reaktori ringluspumbad, väheneb pumpamise häiretest tingitud õnnetuste tõenäosus, aurusti ja rõhuregulaator on reaktori sees, väheneb torustike kogus ja seega ka lekete tekkimise võimalused. GE Hitachi BWRXil on aurugeneraatorid ehitatud reaktori korpusesse.

Moodulreaktorid on väikesed, mis teeb need ohutumaks maavärrinate korral, sest mass, mis tõugetega liigub on väiksem ja seega ka inertsjõud, mis võivad reaktorit ja selle süsteeme lõhkuda, väiksemad. Reaktorite ja muude seadmete väiksemate mõõtmete korral väheneb ka ohutuse tagamiseks vajalik seinapaksus ning neid on lihtsam valmistada ning materjali defektid ei oma nii suurt tähtsust.

Modulaarsus annab eelise põhiliselt valmistamismaksumuses, sest komponendid on rohkem standardiseeritud ning neid saab valmistada vastavates tehastes. Paraneb valmistamise kvaliteet ja kvaliteedikontrolli on lihtsam läbi viia, mis omakorda suurendab turvalisust.

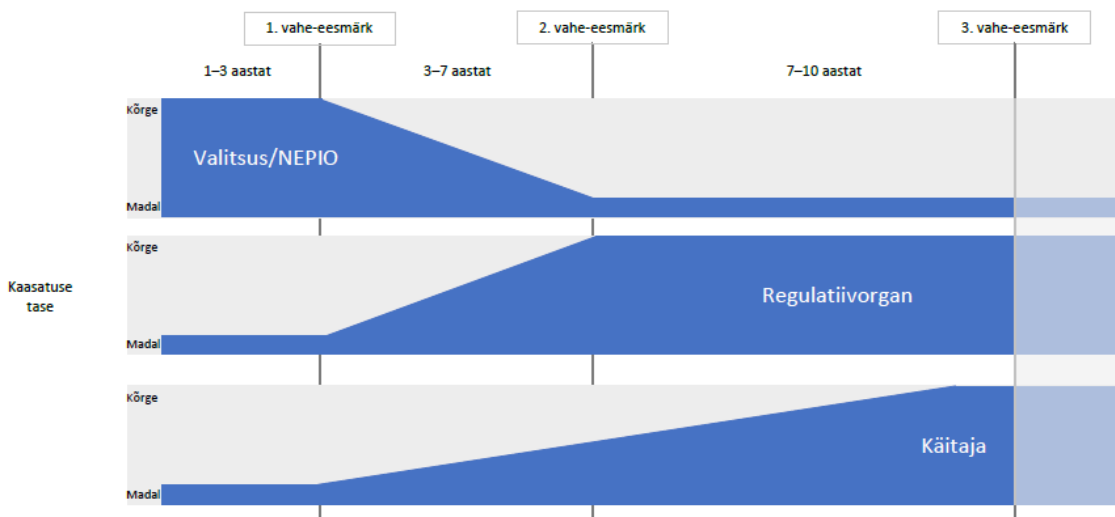
Tuumareaktori ohutuse hindamiseks on kasutusel parameeter nimega Core Damage Frequency (CDF), mida võiks eesti keelde tõlkida reaktori kahjustumise sagedus. See on tõenäosuslik parameeter, mis hindab kui sagedasti võib toimuda reaktori tuuma kahjustumist ehk kütusevarraste sulamist reaktoris. Kütuse sulamine on tõsine olukord reaktoris, sest see võib takistada reaktori jahutamist ning ahelreaktsiooni seiskamist. Hetkel maailmas töötavatel reaktoritel (generatsioon II) on CDF hinnatud vahemikku $5 \cdot 10^{-5}$... $2 \cdot 10^{-5}$. Parimatel moodsatel suurtel generatsioon III+ reaktoritel on see alla 10^{-7} . Ajaloolistel andmetel põhinedes oli vahemikus 1954 kuni 2011 töötanud reaktoritel CDF $7,6 \cdot 10^{-4}$. Sel vahemikul kogunes 582 energeetiliselt reaktoril ligikaudu 14400 reaktori tööaastat ning tuuma sulamisi oli 11, mis teeb ühe sulamise iga 1309 aasta tagant.

Seda suurust on senimaani hinnatud reaktoritele, milles kütus on tahkel kujul. Uue põlvkonna reaktorites nagu sulasoolareaktorid on selle parameetri arvutamine vana metoodikaga võimatu, sest kütus on neis reaktorites sulanud kujul. Samas võib mingi suure loodusõnnetuse (meteoriiidi maandumine) ja inimtegevusliku rünnaku (pommitamine suure võimsusega pommidega) tõttu toimuda reaktori purunemine isegi siis, kui reaktor asub maa alla ja paksude raudbetoonseinte vahel. Paljude arendatavate väikeste moodulreaktorite CDF ei ole määratud. Valikus olevatest neljast reaktorist on see määratud ainult NuScale (10^{-10}) ning võib arvata et BWRX-il tuleks see veidi väiksem kui tema suurel vennal ESBWR-il ($1,7 \cdot 10^{-8}$).

Vastutuse jaotumine väikeste moodulreaktorite programmis

IAEA dokumendid /8/, /10/ ja /11/ keskenduvad kolmele põhiorganisatsioonile ja kirjeldavad tüüpilist vastutuse jaotumist NEPIO, omaniku/käitaja ja regulatiivorgani vahel.

Igal organisatsioonil on oma spetsiifiline roll. Programmi käigus muutuvad organisatsioonide kaasatuse tasemed, rollid ja vastutused. Joonisel 2 on esitatud vahe-eesmärkide saavutamise tegevuskava kontekstis NEPIO, omaniku/käitaja ja regulatiivorgani iseloomulikud kaasatuse tasemed protsessi erinevates faasides. Rollide ja vastutuste jaotus NEPIO ja omaniku/käitaja vahel võib igal konkreetsel juhul riigiti erineda. Näiteks on võimalik, et edaspidi omaniku/käitajana jätkav eraettevõtte loouakse juba päris alguses. Sellisel juhul peab tulevane omanik/käitaja varuma algaasis rohkem ressursse, et NEPIO-l oleks rohkem vahendeid IAEA vahe-eesmärkide saavutamise tegevuskavas määratletud taristuteemade arendamiseks. Isegi siis, kui vastutuste täpne jaotus võib muutuda, on oluline, et kõik 19 taristuteemat saavad vajalikul määral käsitletud.



Joonis 2. Uue tuumaenergiariigi põhiorganisatsioonide iseloomulikud kaasatuse tasemed ja ressursside jaotus suure tuumaelektrijaama korral /12/

Enamasti on iseloomulik, et NEPIO vastutab taristu arendamise üldise koordineerimise eest ja tagab kõigi oluliste osapoolte kaasamise varajases faasis. Paljudel juhtudel juhib alustavas tuumaenergiariigis tuumaenergiaprogrammi päris selle alguses peaaegu täielikult NEPIO ning regulatiivorgan ja omanik/käitaja moodustatakse või määratakse hiljem (nt 2. faasi alguses). Sellegipoolest on 1. faasis oluline, et valitsus eraldaks NEPIO-le piisavalt vahendeid selle rollist ning riigi ja taristu seisukorrast tulenevalt.

Regulatiivorgan tuleb moodustada ja tuumaenergiat käsitlevad riigi õigusaktid tuleb jõustada hiljemalt 2. faasis. Regulatiivorgani peamine vastutus 2. faasis on riigi õigusraamistiku määratlemine. Väikeste moodulreaktorite korral, kus arengu peamine vedur on standardimine, on kõige paljutootavam/soovitatavam võimalus rahvusvahelise hea tava ja päritoluriigi normdokumentide arvestamine. Tagada tuleb riikliku regulatiivorgani läbipaistvus ja sõltumatus omanikust/käitajast. Riigi õigusaktide alusel moodustatud ja volitatud regulatiivorgan vastutab projekti järelevalve eest riigis kehtivate õigusaktide kohaselt ning pädevate ja sõltumatute õiguslike otsuste tegemise eest.

Omanik/käitaja vastutab tegeliku tuumaelektrijaama projekti ettevalmistamise eest. Omanik/käitaja vastutab tehnoloogia valimise, hangete ettevalmistamise ja pakkumuste hindamise eest (võistuspakkumise korral), lepinguläbirääkimiste ja tuumaelektrijaama projekti juhtimise eest, sh ehitamiseks ja käitamiseks vajalike litsentside taotlemise eest /13/. Omanik/käitaja peab

oma tegevuses lähtuma nn teadliku tellija põhimõttest ja arendama suutlikkust tuumaelektrijaama käituse ja ohutuse eest üldvastutuse ülevõtmiseks.

Eesti ja väikeste moodulreaktorite korral võib olukord olla veidi teistsugune, sest tööstussektoris on juba praegu olemas liikumapanev jõud (Fermi Energia OÜ), mis päris algfaasis võiks olla võimaliku tulevase omaniku/käitaja rollis.

Väikeste moodulreaktorite oluline erinevus suurtest kergveereaktoritest on, et kasutusel ei ole veel ühtki sarnast elektrijaama (vähemalt mitte Eestis hetkel arutelul osalevate võimalike kandidaatide seas) ja selliseid ei ole isegi veel ehitamisel. Seetõttu tuleb suurt rõhku panna eri riikide väikeste moodulreaktorite tehnoloogia- ja äriarengute ning litsentsimise jälgimisele ja mõistmisele. Loomulikult peab juhtiv roll selles tegevuses olema tulevasel omanikul/käitajal, isegi siis, kui neid arenguid jälgivad ka NEPIO ja regulatiivorgan.

Peale mitmesuguste energianõudlus- ja tarnestsenaariumide analüüsi ja plaanimise võib algelapil NEPIO üheks olulisemaks tegevuseks pidada inimressursside süstemaatilist arendamist riikliku tuumaenergiataristu jaoks ja tuumaenergiat käsitleva õigusraamistiku väljatöötamist.

1. faasis on üks olulisemaid ülesandeid vajalike uuringute tegemine tabelis 1 esitatud teemadel. NEPIO peab olema omaniku/käitaja ja muude sidusrühmade ressursside ja oskusteabe kasutamist koordineerivas rollis.

Üks spetsiifiline valdkond on tuumaenergiat käsitlevate riigi õigusaktide koostamise ja avaldamise ettevalmistamine. Need õigusaktid peavad hõlmama vähemalt rahvusvaheliste lepingute rakendamise meetodeid riigi õigusaktides, litsentsimise sisseseadmist, regulatiivorgani moodustamist ning litsentsitaotlejate ja -omanike tuumaohutuse, tuumajulgeoleku ja kaitsemeetmete vastutuse määramist.

Näiteks Soomes käsitlevad tuumaenergiat mitme eri taseme normdokumendid, sh tuumaenergiaseadus (990/1987) ja kiirgusseadus (859/2018), mida täiendavad tuumaenergiamäärus (161/1988) ja tuumaenergia kasutamist reguleerivad kiirgus- ja tuumaohutusameti määrused (endised valitsuse määrused).

Samuti tuleb määrata tuumakahjustustega seotud vastutus ja tuumkütuse elutsükkel, sh tuumajäätmete käitlemise strateegiad, rahastamismehhanismid ja vastutus. Need tuleb tuumaenergiat käsitlevates õigusaktides varakult ja läbipaistvalt kindlaks määrata.

Tuumaenergiaseaduse (990/1987) kohaselt tuleb Soomes tuumaenergia kasutamisel või kasutamise tulemusel tekkinud tuumajäätmed käidelda, ladustada ja lõplikult kasutuselt kõrvaldada Soomes.

Seetõttu moodustati Soomes tuumajäätmete käitlemise kulude katmiseks 1988. aastal tuumaenergiaseaduse (990/1987) alusel riiklik tuumajäätmete käitlemise fond. Selle fondi eesmärk on tuumajäätmete tulevaseks käitlemiseks vajaliku raha kogumine, hoiustamine ja usaldusväärne investeerimine. Fond annab ühiskonnale finantstagatise tuumajäätmete käitlemise korraldamiseks mistahes olukorras. Fondi ei rahastata riigieelarvest ning see tegutseb majandus- ja tööministeeriumi haldusalas. Fondi kapital koosneb jäätmekäitluskohustusega käitajate iga-aastastest maksetest ja fondi tuludest. Majandus- ja tööministeerium määrab summa, mis tuleb fondile igal aastal maksta, tagamaks fondi suutlikkus rahastada kõiki rakendatavaid tuumajäätmete käitlemise meetmeid.

1. ja 2. faasis tuleb omanikul/käitajal ette valmistada väikeste moodulreaktorite kasutuselevõtmisega seotud tehnilised ja rahalised aspektid. See hõlmab näiteks teadmiste kogumist tuumaohutuse, tuumajulgeoleku ja kaitsemeetmete, riiklikku energiasstrateegiasse ja energiatarnesüsteemidesse töökindlalt sobivate erinevate elektrijaamakontseptsioonide, eri tüüpi elektri-

jaamade elutsüklikulude, energiaturgude ning mitmesuguste rahastamis- ja lepingumudelite kohta. Omanikul/käitajal tuleb ka sõlmida rahastamislepingud ja elektriijaama tarnelepingud ning võtta vastutus elektriijaama käitamise eest.

Võrdluseks: Soomes moodustati 1955. aastal riiklik energiakomitee (Energiakomitea) /14/, /15/. Hiljem nimetati energiakomitee ümber tuumaenergia nõuandekomiteeks. Energiakomitee, mida võib pidada selle aja NEPIO-ks, alustas Soomes tuumaenergia kasutamise konkurentsivõimelisuse ja teostatavuse hindamist. USA-st osteti General Atomicsi Triga 2-tüüpi uurimisreaktor ja see käivitati 1962. aastal Espoos. Peamine vastutus tuumaenergia programmi edendamise eest läks 1960. aastatel üle energiaettevõtetele Imatran Voima Oy (IVO, Fortumi eelkäija) ja Teollisuuden Voima Oy (TVO). IVO algatas 1961. aastal võistupakkumise, mis pärast mitmelt lääneriikide reaktoritarnijalt pakkumuste saamist siiski tühistati. Esimesed reaktorid (Loviisa 1 ja 2) telliti Nõukogude Liidust. Seetõttu oli IVO-l riigile kuuluva ettevõttena väga oluline roll programmi varajastes faasides. Kiirgusenergia kasutamise järelevalveks moodustati 1958. aastal Soomes regulatiivorgan, mis esmalt kandis kiirgusfüüsika ameti nimetust. 1968. aastal lisandus tuumaohutuse järelevalve ülesanne, nimetuseks sai tuumaohutuse amet ning sõltumatuse tagamiseks see viidi üle sotsiaal- ja tervishoiuministeeriumi haldusalasse. 1984. aastal nimetati see kiirgus- ja tuumaohutusametiks (Säteilyturvakeskus).

Selles aruandes eeldatakse, et omanik ja käitaja on sama ettevõtte. See on kõige laiemalt levinud variant. Siiski on olemas ka mõned näited, kus tuumaelektriijaama käitaja ja omanik on erinevad juriidilised isikud. Sellisel juhul on käitaja litsentsisaaja (käitamislitsentsi hoidja) ja vastutab täielikult elektriijaama ohutuse eest. Selline korraldus on näiteks Araabia Ühendemiraatides, kus käitaja (käitamislitsentsi taotleja) NAWAH-i kaasomanikeks on Barakahi tuumaelektriijaama omanik ENEC ja Barakahi elektriijaama tarnija Korea elektrienergiaettevõtte KEPCO. Sellise korralduse võimalik eelis on, et välispartneri lai kogemustepagas on uuele tuumaenergiariigile paremini kättesaadav.

Vajaliku pädevuse ja suutlikkuse arendamine ja ajastamine

Inimressursside arendamine on üks IAEA vahe-eesmärkide saavutamise tegevuskava 19 taristuteemast. Inimressursside arendamist võib pidada uue tuumaenergiariigi (nt Eesti) üheks

kõige olulisemaks ülesandeks, sest see mõjutab märkimisväärselt riigi tuumaenergiaprogrammi kõiki olulisi osalisi. Hea ülevaade vajaliku tööjõu plaanimisest ja pädevuse arendamisest on esitatud IAEA dokumendis NG-T-3.10. /7/.

1. FAAS

Kaalutlused enne tuumaenergiaprogrammi käivitamise otsustamist

Vajalik pädevus ja selle arendamise ambitsioonide tase sõltub plaanitava tuumaenergiaprogrammi ulatusest, laadist ja omaniku/käitaja plaanitud rollist. On väga tõenäoline, et vähemalt riigi esimesed tuumaseadmed võetakse kasutusele täisvalmis tuumarajatise lepinguga. Isegi sellisel juhul peab omanik/käitaja olema valmis nn teadliku tellija rolli täitmiseks. Muud riiklikud sidusrühmad peavad selle toetamiseks täitma asjakohaseid tugirolle ja tagama vajaliku riikliku taristu.

Eri sidusrühmade pädevuse ja tööjõu plaanamise käivitamiseks peavad kõikide sidusorganisatsioonide rollid, vastutused ja funktsioonid olema selgelt kindlaks määratud. Seejärel saab kindlaks määrata tööjõu plaanimisega seotud põhitegevused ja iga tegevuse eest vastutava organisatsiooni ning hinnata iga tegevuse jaoks vajalikku pädevust. Alguses tuleb eelkõige määratleda NEPIO tüüp ja roll ning tegevuste jaotus NEPIO ja omaniku/käitaja vahel. Võib eeldada, et 1. faasis on NEPIO tõenäoliselt paljude tegevuste eest peamiselt vastutav organisatsioon. 2. faasis nihkub vastutus järjest rohkem omanikule/käitajale ja regulatiivorganile.

1. faasis tuleb valitsusel arendada sobivat pädevust ja suutlikkust tuumaenergia kasutuselevõtmiseks vajalike jõupingutuste ja kohustuste mõistmiseks, et teha asjatundlik otsus tuumaenergiaprogrammi taristu arendamiseks. NEPIO on seejuures võtmeorganisatsioon. Võib eeldada, et ajal, mil eraldiseisev eraettevõtte valmistab ette esimese tuumaelektrijaama projekti, tuleb NEPIO-l tegutseda komitee või väikese organisatsioonina, mis koordineerib mitmesuguste (valitsuse) töörühmade ja sidusorganisatsioonide tegevust, kuid millel enda tegevuseks ei ole vaja märkimisväärselt tööjõudu. See on sarnane näiteks Soomes kasutatud mudeliga, kus NEPIO roll oli tuumaenergia nõuandekomiteel.

1. faasis on ressursivajadus üsna piiratud ja suunatud plaanamiseks vajalikele erispetsialistidele. Eesti jaoks tähendab see tõenäoliselt välismaal õppimis- või töötamiskogemusega spetsialistide kasutamist ja ka rahvusvaheliste spetsialistide palkamist. Tuumaenergia-asjatundlikkuse süstemaatiline arendamine inimesi välismaale kogemusi omandama saates peab olema rakendatud hiljemalt 1. faasis.

2. FAAS

Ettevalmistustöö lepingute sõlmimiseks ja ehituseks pärast põhimõttelist otsust

Tuleb tagada regulatiivorgani piisavad teadmised tuumaelektrijaama tehnoloogia mõistmiseks. Regulatiivorganis või teise variandina eraldiseisvas tehnilises tugiorganisatsioonis tuleb arendada tuumaelektrijaamadega seotud spetsiifilisi süvateadmisi (nt reaktorifüüsika, reaktorite termohüdraulika, töökindlustehnika ja tuumaenergia-spetsiifiline materjaliteadus). Samuti on võimalik, et regulatiivorgan moodustab võrgustiku mitmesugustest sellistest tehnilistest tugiorganisatsioonidest, kellel on juba suutlikkus ja pädevus spetsiifilistes tehnilistes valdkondades.

Valitsus peab järgima pikaajalist energiasstrateegia plaani ja rahvusvahelisi lepinguid ning vastavalt sellele kaasajastama õigusakte. See kehtib nii 3. faasi kui ka sellele järgneva elektrijaama

käitamise kohta. Selleks peab olema tagatud õigusaktide muutmise pädevus ja suutlikkus. See võib olla NEPIO, mõne muu alalise valitsusasutuse või valitsusasutuse juures tegutseva nõukogu ülesanne. NEPIO roll peab 2. faasis olema väiksem kui 1. faasis.

Kaaluda tuleb ka muude valitsusasutuste (nt päästeamet, kaitsevägi, politsei, tervishoiusüsteem) kaasamist ja nende pädevuse arendamist (nt valmisolek ohuolukorraks, füüsiline kaitse, tegutsemine võimaliku kiirgusõnnetuse korral). Peale selle peavad keskkonnalubade väljastamise eest vastutavad valitsusasutused teatud ulatuses omama teadmisi tuumaelektrijaamade keskkonnamõjust (vähemalt maakasutuse ja jahutusvee võimalik mõju). Võimalik kiirgusmõju on tavaliselt tuuma- või kiirgusohutusega tegeleva regulatiivorgani vastutusalas, kellel on valdkonnast põhjalikumad teadmised.

Omaniku/käitaja saab moodustada mitmel viisil. Omanik/käitaja on tuumaohutuse eest vastutav juriidiline isik, kellel peab selleks olema piisav suutlikkus ja pädevus. Omaniku/käitaja asjakohase suutlikkuse ja pädevuse arendamist tuleb alustada hiljemalt 2. faasis.

Omanikul/käitajal tuleb ehitusfaasiks valmistuda nii, et ta saab võtta üldvastutuse tuumaohutuse, tuumajulgeoleku ja kaitsemeetmete eest. Omaniku/käitaja suutlikkust tuleb arendada peamiselt samades tehnilistes valdkondades, mida eespool on nimetatud regulatiivorgani kohta. Kuigi omanikul/käitajal on üldvastutus tuumaohutuse, tuumajulgeoleku ja kaitsemeetmete eest, peab omaniku suutlikkus siiski olema laialdasem ja põhjalikum kui regulatiivorganil. Mõnes tehnilises küsimuses saab omanik/käitaja toetuda võimalikule reaktoritarnijale. Tuleb tähele panna, et vaja on vaid mõnda spetsialisti, kellel on süvateadmised näiteks reaktorifüüsika või tuumkütuse valdkonnas. Enamik spetsialiste on tõenäoliselt baashariduselt tavalised insenerid (nt elektrijaamade insener, protsessitehnoloog, elektriinsener, automaatikainsener), kelle erialateadmisi on mõnel määral täiendatud tuumaenergia-spetsiifilise väljaõppega.

Peale selle tuleb omanikul/käitajal valmistuda projekti elluviimiseks. Selleks on vaja projekti halduse (tööplaan, riskid, raha), kvaliteedijuhtimise (sh kvaliteedikontroll ja -tagamine), hanketoimingute (isegi siis, kui on tegemist täisvalmis elektrijaama peatöövõtulepinguga, on selles tavaliselt osa ka omanikul) ning ehitus- ja paigaldusjärelvalve suutlikkust.

3. FAAS

Tegevused esimese tuumaelektrijaama kasutuselevõtmiseks

3. faasis tuleb regulatiivorganil teha ettevalmistusi normdokumentide täiendamiseks, õiguslikuks järelevalveks ja ülevaatusteks käituse ajal. Seoses väikeste moodulreaktorite konstruktsiooni litsentsimisega Eestis võiks regulatiivorgan kaaluda protsesside ja normdokumentide kehtestamist sellisel viisil, mille korral võetakse nii palju kui võimalik arvesse konkreetse väikese moodulreaktori konstruktsiooni litsentsimist selle päritoluriigis. Sellisel juhul väheneks väikeste moodulreaktorite konstruktsiooni vastavuse tõendamiseks vajalike Eesti-spetsiifiliste normdokumentide ja protseduuride hulk. Siiski eeldatakse, et regulatiivorgan teeb ehituse ajal ülevaatusi koos sõltumatute kontrolliorganisatsioonidega või kinnitab kasutuselevõetava väikese moodulreaktori vastavust heakskiidetud projektile vähemalt verifitseerimis- ja valideerimisdokumentide alusel.

Koostööd saab teha eelkõige päritoluriigi regulatiivorgani või muu asjakohase tehnoloogia kogemusega regulatiivorganiga. Regulatiivorgani suutlikkuse ja pädevuse arendamisel võib näiteks rohkem keskenduda elektrijaama käitusele ja hooldusele. Hiljemalt 3. faasis tuleb arenda-

da ka elektriijaama kasutuselt kõrvaldamise ning tuumkütuse ja tuumajäätmete käitlemise suutlikkust. Omaniku/käitaja chitus- ja käitussuutlikkust käsitletakse põhjalikumalt ptk 9.1 ja 9.3.

Sidusrühmade kaasamine väikeste moodulreaktorite programmi

Viiteallika /11/ kohaselt on sidusrühmadeks üldsus, seadusandjad, valitsusasutused ja otsustajad, tuumaenergiaprogrammi edenemisel omanik/käitaja, regulatiivorgan, võimalikud tarnijad, töötajad, võimalike asukohtade lähedal asuvad kogukonnad, naaberriigid ja valitsusvälised organisatsioonid.

Ehkki paljud organisatsioonid ja üksikisikud tunnustavad tuumaenergiat kliimamuutuste vastu võitlemise ja energiatootmise CO₂-heite vähendamise olulise elemendina, on see üldsuse ja poliitikute jaoks endiselt vaidlusteemaks. Seetõttu on ülioluline teavitada eelkõige otsustajaid, kohalikke kogukondi, üldsust ja ka valitsusväliseid organisatsioone tulevikuplaanidest ja programmi edenemisest. Sel eesmärgil:

- tuleb püsivalt kättesaadavaks teha projektiga seotud asjakohane teave ja seda levitada
- tuleb tagada konkreetsete sidusrühmade ametlikud osalusviisid ning nende kommentaaride ja arvamuste ärakuulamine asjakohaste otsuste ettevalmistamisel.

Teabe kättesaadavaks tegemiseks on näiteks Soomes kasutatud internetti ja sotsiaalmeediat, tuumaelektriijaama asukoha lähedal asuvasse kodudesse saadetud brošüüre ja teabevoldikuid, arutelusid riigi ja kohaliku kogukonna tasemel otsustajatega ning aktiivset osalemist kohalikel üritustel.

Ametlikud osalusviisid on näiteks ametlikud kuulamised ning seisukohtade ja kommentaaride küsimine keskkonnamõju hindamise, põhimõttelise otsuse tegemise (nt Soome) ja tuumarajatise litsentsi taotlemise protsessis. Näiteks Soomes küsitakse mitmesuguste sidusrühmade seisukohti ja kommentaare keskkonnamõju hindamise aruande ja põhimõttelise otsuse, ehitamis- või käitamislitsentsi taotlemise kohta. Sellised sidusrühmad on asjakohased ministeeriumid või valitsusasutused, ametiühingud, valitsusvälised organisatsioonid, kohalikud kogukonnad ja muud asjaomased kohalikud haldusüksused ning tuumaenergia kasutamise regulatiivorgan ja enamasti kõik, kes soovivad esitada kommentaare või seisukohti.

Eeldatavasti pakuvad üldsusele peale tuumaelektriijaama ehitusprojekti suurt huvi ka tuumajäätmete käitlemisplaanid, mis võivad olla üliolulised ühiskondliku heakskiidu saamiseks. Tuleb rõhutada, et üks põhjus, miks Soomes on tuumaenergiale küllaltki suur toetus, on tuumajäätmete (sh kasutatud tuumkütuse) kindlate käitlemisplaanide olemasolu. Seetõttu on oluline, et kohe programmi alguses pööratakse tähelepanu tuumajäätmete käitlemisplaanidele.

Juhime tähelepanu, et peale asukohariigi sidusrühmade tuleb arvesse võtta ka mitmeid rahvusvahelisi sidusrühmi. Mõned näited on esitatud allpool.

- Espoo konventsioonis (*“Piiriülese keskkonnamõju hindamise konventsioon”*) /16/ nõutakse teatud tegevusaladel keskkonnamõju hindamist plaanimise varajases faasis. Peale selle nõutakse, et kõikide selliste suurte planeeritavate projektide korral, mis tõenäoliselt avaldavad olulist kahjulikku piiriülest keskkonnamõju, tuleb naaberriike teavitada ja nendega konsulteerida. Näiteks Loviisa tuumaelektriijaama keskkonnamõju hindamisel teavitas Soome kõiki naaberriike ja kõiki Läänemeri riike ja konsulteeris nendega.

- Euratomi asutamislepingu artikkel 41 kohustab käitajaid Euratomi liikmesriikides teavitama Euroopa Komisjoni uutest tuumaenergiainvesteeringutest ja olemasolevate projektide olulistest muudatustest.
- Euratomi asutamislepingu artikkel 37 kohustab Euroopa Komisjonile esitama radioaktiivsete jäätmete kõrvaldamise kõikide plaanide üldandmed.

Eeldatavasti ei erine väikeste moodulreaktorite programmi sidusrühmadega suhtlemise nõuded olulisel määral suure tuumaelektrijaama projekti asjaomastest nõuetest.

Rahvusvaheline tuumaenergiakoostöö

Rahvusvaheline koostöö on alustava tuumaenergiariigi pädevuse arendamise oluline osa. Vaja on nii rahvusvaheliste organisatsioonide kui ka kahepoolsete lepingutega seotud kogenud partnerite toetust.

IAEA toetab alustavaid tuumaenergiariike mitmel viisil. Eelkõige on IAEA välja töötanud vahe-eesmärkide saavutamise tegevuskaval põhineva kõikehõlmava juhiste komplekti. Need juhised on internetis avalikult saadaval /9/. Vahe-eesmärkide saavutamise tegevuskava, mitmesugused juhenddokumendid ja asjakohased koolitusmaterjalid tagavad uuele tuumaenergiariigile tuumaenergiaprogrammi plaanimiseks kindla platvormi. Vahe-eesmärkide saavutamise tegevuskava on algselt välja töötatud suuri tuumaelektrijaamu silmas pidades. Tegevuskava suuremat osa saab kasutada ka väikeste moodulreaktorite programmis. Uued tuumaenergiariigid saavad IAEA-lt taotleda ka tuumataristu terviklikku ülevaatus, mille korral rahvusvahelised spetsialistid teevad kindlaks, kas programm põhineb toimival riiklikul poliitikal ja strateegial, usaldusväärsel haldusel, kohasel õigusraamistikul ja kvalifitseeritud tööjõul. Tuumataristu terviklik ülevaatus on kasulik vahend, mis võib osutuda asjakohaseks 2. faasis.

IAEA on koostanud ka ohutusnormide kogu, mida pidevalt hallatakse ja ajakohastatakse ning mida saab kasutada riiklike ohutusnõuete hindamis- ja võrdlusalusena. Ohutusnormid koosnevad ohutuspõhimõtetest, -nõuetest ja -juhenditest. Ohutuspõhimõtteid ja -nõuded on ülemaailmselt tunnustatud kõrgtasemel nõuded, ohutusjuhendid moodustavad hea tava juhiste kogu.

IAEA pakub ka tuge asjakohaste rahvusvaheliste lepingute koostamisel tuumareleva leviku tõkestamise, tuumaohutuse, tuumajulgeoleku ja tuumavastutuse valdkonnas.

IAEA veab ka rahvusvahelist innovaatiliste tuumareaktorite ja tuumkütusetsüklite projekti (INPRO). See on liikmelisusel põhinev projekt, mida on rakendatud ka väikeste moodulreaktorite valdkonnas.

Regulatiivsel poolel on Lääne-Euroopa tuumaohutust reguleerivate asutuste ühendus (WENRA) teinud tööd tuumaohutuse regulatiivsete nõuete harmoneerimise nimel Euroopas. WENRA ja selle töörühmad on avaldanud ohutuse etalontasemed olemasolevate reaktorite jaoks ning ohutuseesmärgid ja mitmed seisukohad uute reaktorite jaoks. WENRA etalontasemeid ja seisukohti saab pidada riiklike õigusaktide usaldusväärseks aluseks Euroopas.

Maailma tuumaelektrijaamade käitajate organisatsioon (WANO) on tuumaelektrijaamade käitajate üks olulisemaid, kui mitte kõige olulisem koostööorganisatsioon. Alustava tuumaenergiariigi (nt Eesti) omanike/käitajate ühinemist WANO-ga tuleks kaaluda näiteks 3. faasi

alguses. Kasutuselevõtmise faasis pakub WANO omanike/käitajate toetuseks näiteks käivitamiseelset vastastikust ekspordihinnangut.

Euroopa elektriettevõtjate nõuete organisatsioon (EUR) on elektriettevõtjate rühm, kes on ühiselt välja töötanud tehnilised nõuded uute tuumaelektrijaamade jaoks. Hiljuti alustas EUR-i juures tööd väikeste moodulreaktorite töörühm. Enne tuumaelektrijaama lepingu tehniliste nõuete väljatöötamist võib osutuda otstarbekaks kaaluda EUR-iga ühinemist, et EUR-i dokumente saaks kasutada tehniliste nõuete alusena.

Maaüldine Tuumaassotsiatsioon (WNA) on liikmelisusel põhinev organisatsioon, mis on samuti oma töös käsitlenud väikeseid moodulreaktoreid ja mis on näiteks CORDEL-i töörühmas välja töötanud seisukohad väikeste moodulreaktorite litsentsimiseks. Maaüldine Tuumaülikool (WNU) on WNA sõsarorganisatsioon, mis pakub võimalikele tulevastele juhtidele tuumaenergeetika valdkonna koolitusi.

Suurte reaktorite jaoks on reaktoritarnijad/-projekteerijad tavaliselt moodustanud nn omanike rühmad, kus konkreetse konstruktsiooniga reaktorite omanikud saavad oma kogemusi jagada. Näiteks on olemas keevveereaktorite omanike rühm, surveveereaktorite omanike rühm, Framatome-reaktorite omanike rühm (FROG) ja Põhjamaade reaktoriomanike rühm. Võib eeldada, et kui väikeste moodulreaktorite korral jõutakse ehitusfaasi mitme tellija juures, moodustatakse sarnane omanike rühm ka väikese moodulreaktori konkreetse tüübi jaoks.

Asjakohane rahvusvaheline tuumaenergeetikaorganisatsioon on näiteks ka OECD Tuumaenergia Agentuur (NEA).

Uue tuumaenergiariigi korral on võimalikeks partneriteks ja vajaliku koolituse andjateks võimalikud elektrijaama tarnijad ja nende asukohariigid, aga ka mitmesugused ülikoolid ja uurimisorganisatsioonid. Näiteks USA tuumaregulatsioonikomisjonil (NRC) on 45 riiki hõlmav rahvusvaheline abiprogramm, kus võimaldatakse koolitust ohutuse, uute reaktorite, asukoha valiku, füüsilise kaitse ja muu valdkonnas.

2.3 VÕRDLEV ANALÜÜS VÄIKESTEST MOODULREAKTORITEST

Fermi Energia OÜ asutati suvel 2018. Ettevõtte visioon on 2035. aastaks Eestis uue põlvkonna tuumaenergeetika juurutamine, riigi energiasõltumatuse taastamine ning varustuskindluse tagamine puhta, ohutu, taskukohase ja süsiniku vabalt toodetud elektriga.

TRACTEBEL on Fermi Energialt saanud volituse turu-uuringu tegemiseks ja väikeste moodulreaktorite (VMR) turu kohta hinnangu andmiseks. Selleturu-uuringupõhine eesmärk on tehniliselt ja äriotsustustel sobivate kandidaatide väljaselgitamine VMR-projektide tulevaseks arenduseks Eesti elektrivarustuse ja kliimaeesmärkide täitmise tagamisel pärast 2030. aastat.

Seetõttu on selle aruande eesmärgid:

- a. Ülevaate andmine olemasolevatest tehnoloogiatest ja nende arengutasemest.
- b. Väga mitme kesiste uuenduslike konstruktsioonipõhimõtete hindamise meetodika ja kriteeriumite määratlemine ning kõige sobivamate välja selgitamine (vt ptk4).

- c. Määratletud valiku metoodika rakendamine kaheastmelises protsessiseesmärgiga keskendada Fermi Energia arenduspingutused sobivaimatele konstruktsioonidele (vt ptk 4 ja liisaA).
- d. Tulemustest kokkuvõtte esitamine Eesti sidusrühmadele ja avalikkusele.

JÄRELDUSED

Paljud väikeste moodulreaktorite konstruktsioonivariandid pakuvad väljavaate pöördeliste tehnoloogiate rakendamiseks Eesti energiamaastikul. Aruandes määratletud valikumetoodiga määrati kindlaks ühe tervikliku surveveereaktori, ühe keevveereaktori ja ühe sulasoolareaktori sobivus. Ülevaade nende põhiomadustest on koondatud järgmisse tabelisse.

	NPM, Nuscale	BWRX-300, GE Hitachi	SSR-W, Moltex Energy	IMSR, Terrestrial Energy
Aeg turuletoomiseni	Esimene omataoline rajatis: 2026	Esimene omataoline rajatis: 2020. aastate lõpp	Esimene omataoline rajatis: 2030. aastate algus	Esimene omataoline rajatis: 2030. aastate algus
Olemuslik ohutus	Väga hea - Autonoomne jahtumine 30 päeva käitaja sekkumiseta. - Ohuolukorra plaani piirkonna suurus on piiratud.	Väga hea - Autonoomne jahtumine üle 7 päeva käitaja sekkumiseta. - Ohuolukorra plaani piirkonna suurus on piiratud.	Suurepärane - Pikaajaline autonoomne jahtumisekäitaja sekkumiseta. - Ei esine südamiku sulamisest tingitud õnnetusi. - Lenduvate lõhustumissaaduste keemiline peetumine. - Ohuolukorra plaani piirkond jääb tuumara-jatissesisse.	Suurepärane - Pikaajaline autonoomne jahtumisekäitaja sekkumiseta. - Ei esine südami-kusulamisest tingitud õnnetusi. - Lenduvate lõhustumissaaduste keemiline peetumine. - Ohuolukorra plaani piirkond jääb tuumara-jatissesisse.
Sobivus turunõuetega	Koormuse täiustatud järgimine ja madala temperatuuriga protsessisoojus.	Koormuse ööpäeva-tsüklilise järgimine ja madala temperatuuriga protsessisoojus.	Koormuse tasakaalustamine soojussalvestusega ja kõrge temperatuuriga protsessisoojus.	Koormuse tasakaalustamine soojussalvestusega ja kõrge temperatuuriga protsessisoojus.
Majanduslik konkurentsivõime	Hea (kapitalikulu 4000–5000 USD/kW)	Suurepärane (kapitalikulu 3000–4000 USD/kW)	Suurepärane (kapitalikulu ~3000 USD/kW)	Suurepärane (kapitalikulu ~3000USD/ kW, võib-olla suurem tegevuskulu)
Kestlikkus	Võrreldav praeguste kergveereaktoritega.	Võrreldav praeguste kergveereaktoritega.	Jäätmepeleti.	Võrreldav praeguste kergveereaktoritega + korduva taastootlemise võimalus.
Tarnekindlus	Hästi sisetöötatud tehnoloogia. Kogenud tarnijad.	Hästi sisetöötatud tehnoloogia. Kogenud tarnijad.	Vähene tehnoloogiline valmidus. Keeruline kütuse-tarneahel. Kogenud uurimis- ja arendus-partnerid.	Vähene tehnoloogiline valmidus. Kogenud uurimis- ja arenduspartnerid.

Need tehnoloogiad pakuvad Eesti energiatulevikuks kaks valikut, mis üksteist ei välista:

- küpsem veepõhine tehnoloogia (nt Nuscale ja BWRX-300) on Eestijaoks tõenäoline variant 2030. aastaperspektiivis
- värskem sulasoolatehnoloogia pakub 2030. aastate keskpaigaks isegi paremaid väljavaateid (nt täiustatud kütusetsüklid, koormuse tasakaalustamise ja soojuse salvestamise võimalus, protsessisoojust kasutavad rakendused).

TAUSTAINFO

Viimasel kümnendil on tuumavaldkond kokku puutunud olemuslike takistustega: suurtel tuumaprojektidel on toimunud mitu ebaõnnestumist, mida iseloomustavad viivitused ehitamisel ja sellest tingitud ülekulu; Fukushima Daishii õnnetuse järel on suurenenud avalikkuse kahtlused tuumaenergia ohutuses; on vähenenud tuumaprojektide rahastamisvalmidus, sest investeringud on erakapitali jaoks liiga suured, esimese tulu saamiseni läheb kaua ja tuumatööstusel napib avalikku toetust. Samal ajal kujundavad tuleviku energiamaastikku paljud üleilmsed turusuundumused: kliimamuutuste ohjeldamiseks surutakse läbi energia tootmise süsiniku heite vähendamist, energiasüsteemid liiguvad üha enam hajusenergia suunas ja arenguriigid on silmitsi üha kasvava energiavajadusega.

Viimaste aastate järjest suurenev huvi väikeste moodulreaktorite vastu (vaatamata sellele, et nende põhimõtted olid välja töötatud nüüdisaegse tuumavaldkonna varastel kümnenditel) on osalt tingitud sellest, et nende konstruktsioon pakub mõistlikke lahendusi eelnimetatud probleemidele.

The questions	The context	The SMR answers
Recreate trust in nuclear safety? 	Post-Fukushima concerns 	Passive & inherent safety  Extended grace period  Limited EPZ 
Foster nuclear investments? 	Construction issues  Financial burden 	Standardized modules  Reduced project size 
Concern of nuclear waste? 	Political & public opinion 	Reduction of nuclear waste through fast-spectrum SMRs 
Role in zero-carbon transition? 	Intermittent renewables  Climate change 	Flexibility  Non-electric applications 

Joonis 1. VMR-ide lähenemisviis on nüüdisaegsete energiapõhimõtete kohane

Eesti on suure energiaülemineku lävel, mis hõlmab kohapeal toodetava põlevkivi osakaalu olulist vähenemist riigi tulevases energia bilansis. Oma konstruktsioonipõhimõtete tõttu võivad VMR-id selles üleminekus olulist osa mängida. Esitame allpool on mõned põhjused, miks see nii on.

Kättesaadava hinnaga tuumaenergiaprojektid

Tänapäeval nimetatakse tavaliselt väikesteks moodulreaktoriteks standarditud kõrgtasemel reaktoreid, mille väljundvõimsus jääb üldiselt alla 300 MW(e). Sellised väiksemad reaktorid vähendavad suuremahuliste tuumaenergiaprojektide finantskoormust. Nende finantsrisk on väiksem, sest algsed kapitaliinvesteeringud ei ole nii suured ja ehitusfaasis on viivituste tekkimise risk väiksem. Et VMR-ide jaoks on vaja väiksemat investeerimisvõimekust, võivad need olla ahvatlevad ka rohkemate eraettevõtete jaoks.

Moodulkonstruksioon ja skaleeritavus

VMR-ide põhiomadused on moodulkonstruksioon ja skaleeritavus: tootjad töötavad välja standarditud reaktorimoduleid, mida saab toota tehases koosteliinil. Need moodulid võimaldavad vähendada ehitustegevust objektil. Moodulkonstruksiooni tõttu saab VMR-lahenduse korral võimsust kiiresti lisada samal ajal, kui esimesed moodulid toovad juba tulu. Need omadused võivad eriti hästi sobida tuumaenergia kasutuselevõtmisega alustavale riigile, nagu Eesti.

Turu mitmekülsus

Tuumaenergia on tõestatud enda olulisust elektritootmise CO₂-heite vähendamisel. VMR-ide CO₂-heide on kogu elukaare jooksul võrreldav taastuenergiaallikatega, mistõttu on neil suur osa kliimamuutuse leevendamiseks vajalikul energiaallikate süsinikuheite vähendamisel.

Üldsuundumuse kohaselt on VMR-id paindlikud: enamus konstruktsioonilahendusi on koormuse järgimise ja võrgu tasakaalustamise suutlikkusega. Taastuvate energiaallikate osa kasv energiabilansis tähendab, et elektritootmine ei pruugi suuta võrgu nõudlust iga hetk rahuldada. VMR-id on konstrueeritud kohanduma tootmise katkendlikkusega. See teeb neist taastuenergiaallikate jaoks vähese süsinikuheitega ideaalpartneri.

Sama loogika kohaselt pakuvad VMR-id muude energiaallikatega võrreldes alternatiivseid võimalusi tööstuslikele energiatarbijatele (nt naftakeemiatööstusele). VMR-id suudavad toota soojustauruna, mis võimaldab protsessi soojuse kasutamist näiteks kaevandustöödel või isegi vesiniku tootmiseks.

Olemuslik ohutus

VMR-id ei ole kaugeltki ühesugused tooted – nende konstruktsioonid põhinevad erinevatel tehnoloogiatel. Viimase 15 aasta jooksul on VMR-ide jaoks välja töötatud üle 50 konstruktsioonilahenduse alates vesijahutusega reaktorite traditsioonilise konstruktsiooni erinevatest edasiarendustest kuni paljutöötavate järgmise, nn IV põlvkonna tuumareaktoriteni.¹

Tehnoloogilist erinevustest olenemata on suurema osa VMR-ide ohutuskontseptsioon samalaadne. Reaktorite praeguse põlvkonna ohutust on parandatud paljude keeruliste tehnoloogiliste omaduste ja varusüsteemide ning kõikvõimalike stsenaariumide kavandamise kaudu. VMR-ide tööpõhimõte seevastu püüab tagada olemuslikku ohutust lihtsate ja passiivsete süsteemide kaudu, mis põhinevad alati töötavatel füüsikalistel nähtustel (nt raskusjõud ja loomulik konvektsioon) mitte mehaanilistel komponentidel. Need VMR-id tagavad kriitiliste ohutusfunktsioonide rakendumise: reaktorit jahutatakse väljalülitamise järel mitu päeva käitaja sekkumise või väliste ressursside (nt elektrivarustus, täiendav veevaru) vajaduseta.

¹ Tegelikult on mõiste „väike moodulreaktor“ üle aeg-ajalt kerkinud arutelud, sest mõne konstruktsioonivariandi võimsus võib olla gigavattides. Mitmed asjaosalised on välja pakkunud mõiste „täiustatud moodulreaktor“, mis tundub sobivat mõnevõrra paremini. Selles aruandes on läbivalt kasutatud mõisteid „VMR“ ja „täiustatud tehnoloogia“, et terminoloogia ei lahkneks meedias tavaliselt kasutatavast.

Kasutuselevõtmise ajaskaala

VMR-ide prototüüpe on Venemaal ja Hiinas ehitatud 2010. aastate keskpaigast ja eeldatavasti alustavad need elektritootmist enne 2020. aastat. Euroopas ja Põhja-Ameerikas hakkavad esimesed äriotstarbel seadmed tööle 2020. aastate keskel.

Tractebeli hinnangul pakub VMR-ide praegune tehnoloogiline tase Eesti energiatulevikule kaht valikut, mis üksteist ei välista:

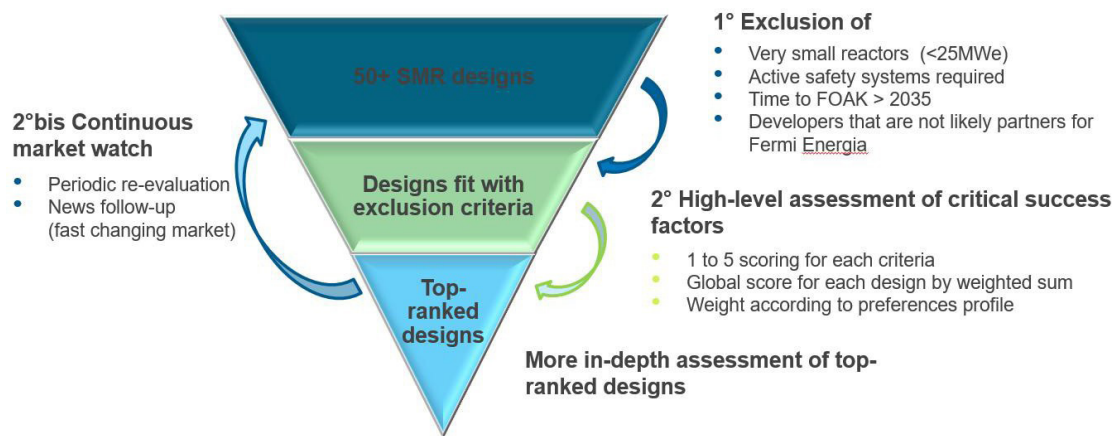
- küpsem veepõhine tehnoloogia on tõenäoline variant 2030. aastaperspektiivis
- värskemad täiustatud tehnoloogiad pakuvad 2030. aastate keskpaigaks isegi paremaid väljavaateid (nt täiustatud kütusetsüklid, koormuse tasakaalustamise ja soojuse salvestamise võimekus, protsessisoojust kasutavadrakendused).

METOODIKA

Tehniliselt ja äriliselt kõige lootustandvamate VMR-ide tuvastamiseks rakendati järgmist metoodikat.

- Hindamisel võeti aluseks kriitilist eedutegurite loend, mille eesmärk on ehitusprojekti edukaks lõpetamiseks vajalike kombineeritud nõudmiste fikseerimine.
- Rakendati kahe-etapilist valikuprotsessi, mille sihiks on hinnatavate konstruktsioonilahenduste järkjärguline välistamine ja keskendumine kõigesobivamate konstruktsiooni lahenduste analüüsimisele.
 - 1. etapp. FERMI ENERGIA nõuete kriteeriumite loendile mittevastavate konstruktsioonilahenduste väljaarvamine. Üksikasjalikkuse tase: põhiliste konstruktsioonikarakteristikutega andmebaas (vt [1],[4]).
 - 2. etapp. Sõelale jäänud konstruktsiooni lahenduste reastamine kriitiliste edutegurite kõrgtasemel hindamise alusel. Üksikasjalikkuse tase: IAEA brošüürid ja avalikusele kättesaadav teave tootjatelt (nt veebileht, esitlusmaterjalid, tootetutvustused jne).
 - Viimane etapp. Sügavam analüüs ja sobivaimate kandidaatide hinnangu täiendamine. Üksikasjalikkuse tase: projekteerimisaruanded, tuumaenergiauudiste jälgimine. Kui tootjad on andnud avalikustamisele mittekuuluvat infot, siis seda küll analüüsitakse ja kasutatakse hindamisel, aga aruandes ei avaldata. Seda pingutust tuleks pärast kõnealust teostatavusuuringut jätkata jasüvendada.

Selle protsessi eri etappe on üksikasjalikult esitatud järgmistes peatükkides. Protsessi üldskeem on näidatud joonisel 2.



Joonis 2. Valikuprotsess

Kriitilised edutegurid

Kriitiliste edutegurite loendi eesmärk on välja selekteerida tuumaenergiaprojekti õnnestumiseks piisavad ja vajalikud tehnilis-majanduslikud tingimused. Määrati kindlaks järgmised seitse kriteeriumit.

- Kuludekonkurentsivõimelisus**

VMR-i kulud peavad olema konkurentsivõimelised. Vähemalt kapitalikulu peab olema väiksem kui praegustel III põlvkonna suure võimsusega TEJ-idel. Energiatootmise tasandatud kogukulu (LCOE) võiks parimal juhul olla võrreldav kivisöel töötavate elektrijaamadega. Peale kapitalikulu või juhul, kui see ei ole teada või on kaheldav, on kulude konkurentsivõimelisuse määramisel arvestatud järgmist.

- Konstruksiooni lihtsus, mis vähendab (ohutus)süsteemide ja komponentide arvu ning seega vähendab kapitali- ja tegevuskulu.
- Väiksem keskkonna jalajälg ja seeriatootmise potentsiaal, mis tagab lühema ehitamiskestuse.
- Tegevuskulu on hinnatud peamiselt kütuse väiksema rikastamiskulu ning lihtsama käitamise ja korrashoiu alusel.

- Omakapital ja finantseerimine**

Isegi väikese esimese omataolise reaktori projekteerimine, litsentseerimine ja ehitamine on kallid. Valitud konstruktsioonilahendused peaksid kogu arendusfaasi jooksul olema tagatud piisava finantseeringuga. See võib toimuda erainvestoritelt, laenudest või valitsuselt saadud rahastamise kaudu.

- Tarnekindlus**

Tuumaenergiaprojekti üks oluline aspekt on tarneahela suutlikkus seadmete õigel ajal kohaletoimetamiseks. Seetõttu on hästi sisetöötatud tarneahela ja/või kogenud töövõtja toetusega konstruktsioonilahendused eeliseisundis nende ees, mis veel vajavad uurimis- ja arendustöid või hõlmavad uuenduslikke protsesse, mille kohta on veel vähe kogemusi.

- **Kestlikkus**

Avalikkuse heakskiidu saamiseks peab valitud tehnoloogia olema keskkonnahoidlik. Kõige kestlikumad tehnoloogiad:

- kasutavad toodetud energiaga võrreldes vähe kütust (on suure väljapõlemismääraga) või kasutavad isegi vähem kütust kui toodavad (paljundavad kütust).
- on suure soojuslik kasuteguriga (elektritootmisel) või kõrgetemperatuuriga jahutusvedelikuga (muudes rakendustes).
- kasutavad hõlpsasti käideldavat (kõrvaldatavat või taastöödeldavat) kütust
- minimeerivad pikaealiste radioaktiivsete isotoopide (väikeste aktinoidide) tekke kütusesükli.

- **Olemuslik ohutus ja turvalisus**

Suurema osa VMR-ide ohutusnäitajad on võrdsed praeguse III põlvkonna suurte elektrijaamade omadega või neist paremad. Seetõttu hinnati konstruktsioonilahendusi järgmistel alustel:

- vastupidavus õnnetusele, mida hinnatakse elektri olemasolust ja käitaja sekkumisest sõltumatu autonoomse jahtumise ning õnnetusjuhtumi kiirgustagajärgede põhjal. Seetõttu eelistatakse konstruktsioonilahendusi, mis on piiramatult passiivse jahutusega ja mille südamiku sulamine on praktiliselt välistatud või võimatu
- kaitse tuumamaterjali varguse või paljundamise eest (kohapeal ei toimu kütuse lisamist, väike rikastusaste, väikeste aktinoidide suur sisaldus jne).

On veel üks aspekt, mida valikul tuleb arvestada.

- **Sobivus turunõuetega**

VMR-e saab peale elektritootmise kasutada ka paljudes muudes rakendustes (soolatustamisel ja soojatootmisel rafineerimistehastes, keemilistes protsessides, vesiniku tootmisel jne) ja see võib kaasa aidata Eesti energiaüleminekule.

Rakendatakse kahte olulist kriteeriumit:

- saadava soojuse temperatuur (kõrgem temperatuur laiendab protsessisoojuse kasutusala)
- paindlik väljundvõimsus (koormuse järgimise ja soojussalvestuse võimekus).

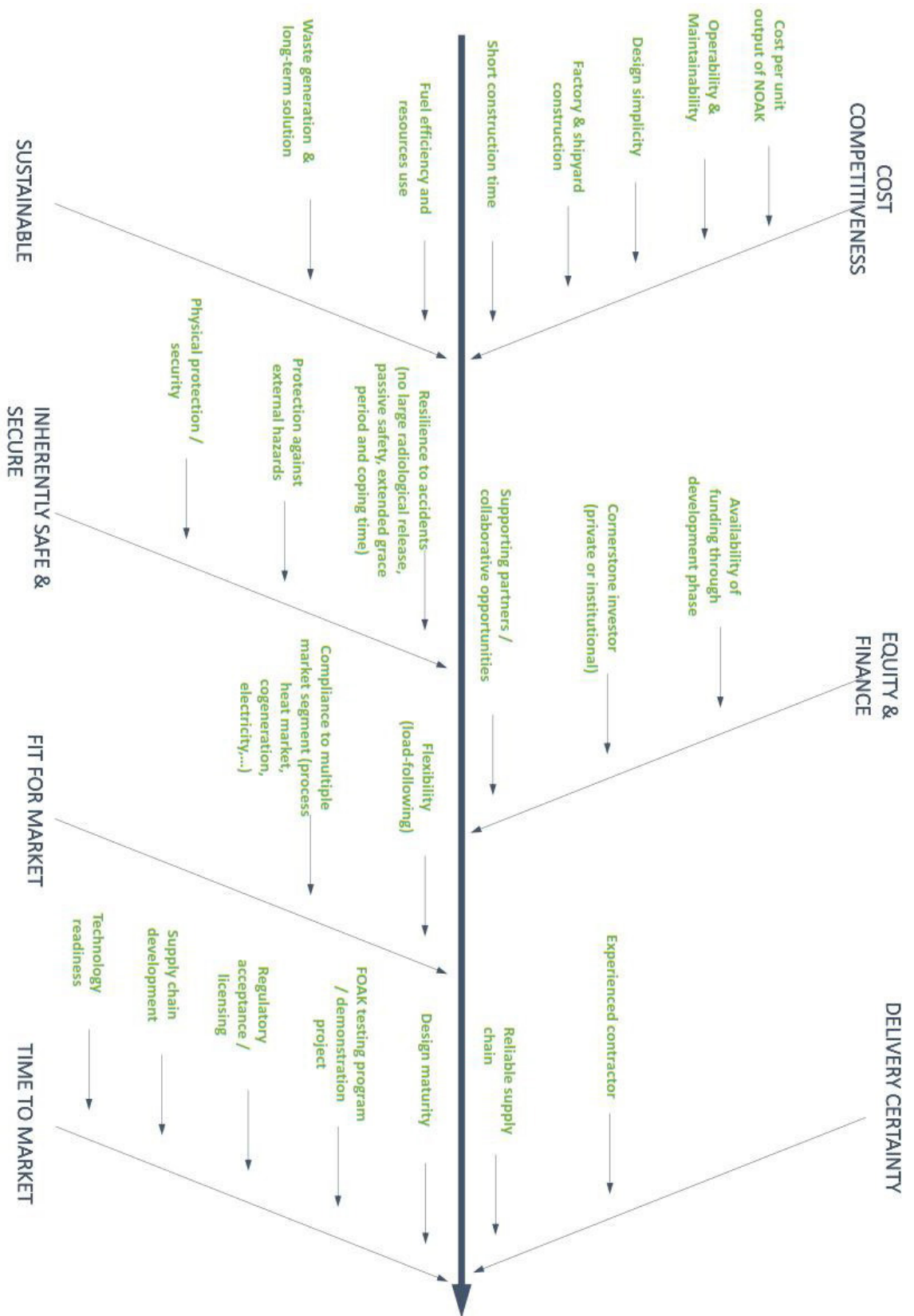
- **Aeg turule toomiseni**

Et täita oma rolli kliimamuutuste vastu võitlemisel, peaksid VMR-id õige pea olema saadaval. Mõned tootjad on varajases arendusfaasis ja nende konstruktsioonid on ikka veel idee tasemel. Teised konstruktsioonilahendused on juba kenasti edasi arenenud ja läbimas litsentseerimist ning mõnel juhul ehitatakse juba prototüüpe. Valitud konstruktsioonilahendused peaksid turule jõudma keskpikas perspektiivis: esimese omataolise seadme peaks saama ehitada enne 2030. aastat.

Turule toomiseni jäänud aega hinnati järgmiste faktorite järgi:

- konstruktsioonilahenduse küpsus
- esimese omataolise seadme katsetamisprogramm
- õiguslik heakskiit (seda on sageli esile tõstetud viivituse põhjusena mitte kergvee-reaktorite korral)
- vajaliku tarneahela koostamiseks ja arendamiseks kuluvaeg.

Joonisel 3 esitatud skeem illustreerib määratletud kriitilisi edutegureid ja näitab alamkriteeriume, mida kasutatakse iga kriitilise eduteguri hindamiseks ja hindamisjuhiste määratlemiseks (vt ptk 4.3 ja lisa B).



Välistamiskriteeriumid

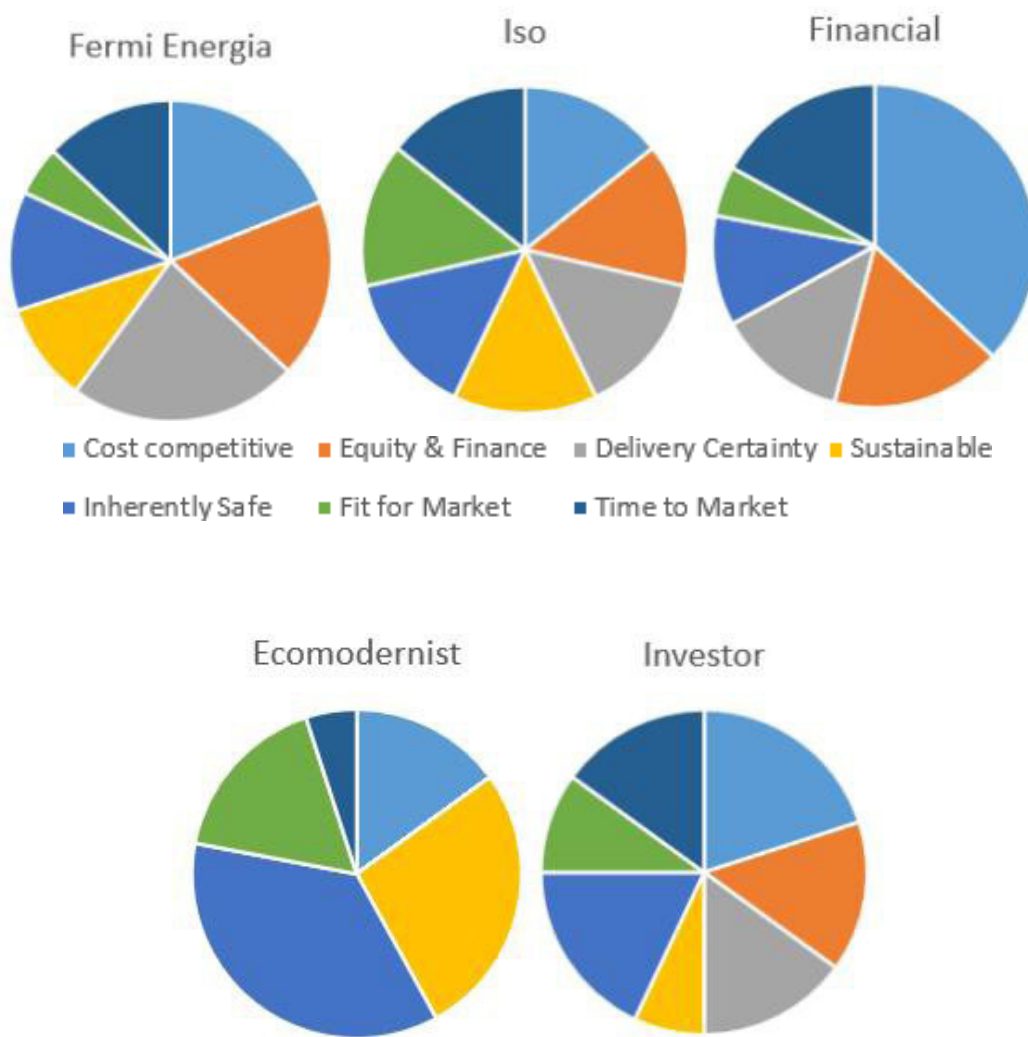
Uuenduslike konstruktsioonilahenduste valiku esimeses etapis töötati välja protsess selliste tehnoloogiate välistamiseks, mis usutavasti ei ole pöördelised ega sobi hästi Fermi Energiale. Seetõttu rakendati järgmisi välistamiskriteeriume:

- konstruktsioonilahendused, mille moodulpõhimõte ei ole piisav ja mille baasmoodulite väljund võimsus on suurem kui 500 MWe mmhõlmati üksnes väikesed ja täiustatud-moodulreaktorid
- konstruktsioonilahendused, mille väljundvõimsus on alla 25 MWe mm nišiturule suunatud konstruktsioonilahendused ei ole selle eesmärgikohased
- konstruktsioonilahendused, mille korral esimese omataolise toote tarnimine enne 2035. aastat ei ole tõenäoline ja mis seetõttu ei vasta Fermi Energia kasutuselevõtu ajakavale. Tuleb silmas pidada, et esimese omataolise konstruktsioonilahenduse äriotstarbel kasutuselevõtmise aega on pikendatud 2030. aastate algusesse, seetõttu on analüüsi hõlmatud ka täiustatud reaktorid, mis võivad kaasa aidata Eesti pikaajalise tuumaenergiastrateegia elluviimisele
- konstruktsioonilahendused, millel ei ole selliseid passiivsüsteeme, mis suudavad tagada pikema reageerimisaja ja toimetuleku vähemalt 36 tunni jooksul mm vastupidavust raske õnnetusjuhtumi korral välise energiaallika kasutamiset ja käitaja piiratud sekkumisega peetakse pöördelise tehnoloogia korralkohustuslikuks
- konstruktsioonilahendused, mille arendajad ei ole Fermi Energia jaoks usaldusväärsed või soovitud partnerid: arvatakse välja sellised tehnoloogiad, millel põhinevat esimest omataolist rajatist ei plaanita OECD maades litsentsida egaehitada.

Kõrgtasemel hindamine

Valikuprotsessi teine etapp koosneb kriitiliste edutegurite kõrgtasemel hindamisest. Igat konstruktsioonilahendust hinnatakse kaheksa kriteeriumi järgi hindegaga 1–5: hindamisjuhised on esitatud peatükis 4.3.1. Seejärel arvutatakse kaalutud summa mudeli alusel koondhinne, mille alusel saab koostada pingerea.

Kaalutud summa leidmiseks kasutatud kaalufaktorid püüavad arvesse võtta iga kriteeriumi suhtelise olulisuse sidusrühmade ettekujutuses. Tulemuste kindluse tagamiseks kasutati eri tüüpi sidusrühmade arvessevõtmiseks mitut kaalumisprofili. Kasutatud arvud saadi ajurünna-ku tulemusel: põhiprofilid on kokku võetud peatükis 4.3.2. Peale selle kaasati Excelis koostatud dünaamiline kaalumisprofiil, mida kasutati tundlikkusanalüüsiks.



Joonis 4. Kaalumisprofiilid

Hindamismetoodika

Kõrgtasemel hindamise kogu ulatuses kasutati järgmist hindamismetoodikat:

- iga konstruktsioonilahenduse kohta sai iga kõrgtaseme kriteerium hinde skaalal 1–5
- baashindena kasutati juhiste järgi leitud hinde põhikomponenti (vt lisa B)
- seejärel suurendati või vähendati seda põhikomponenti sekundaarsete kaalutluste alusel (vt ka lisa B juhiseid)
- puuduvate andmete või teabe puuduliku usaldusväärsuse korvamiseks rakendati saadud hindele positiivset või negatiivset määramatusvahemikku: neid esindavad miinimum- ja maksimumhinne, mis olemasoleva info põhjal on tunnistatud usaldusväärseks.

- **Kaalumisprofiilid**

Kriteeriumite alamhinded koondatakse kaalutud summa mudeli alusel konstruktsioonilahenduse koguhindeks. Eri tüüpi sidusrühmade arvessevõtmiseks kasutati järgmisi kaalumisprofiile.

- **Investor** – profiil, mis imiteerib nn mõistliku isikuna (*bonus pater familias*) investeerida sooviva ettevõtte kaalumisprofiili, kus oluline on tarnekindlus, omakapital ja finantseerimine ning kulude konkurentsivõimelisus, samas on olulise kaaluga ka ohutus ja kestlikkus.
- **Iso** – profiil, milles iga kriteerium on sama kaaluga.
- **Finants** – profiil, mis otsib maksimaalset kulude konkurentsivõimelisust, soliidset omakapitali ja finantseerimist ning kiiret turule toomist.
- **Ökomodernist** – profiil, mis pöörab erilist tähelepanu kliimamuutusele, olulised on kestlikkus ja ohutus.
- **Fermi Energia** – profiil, mis väljendab Fermi Energia eelistusi ja visiooni Eesti turul. Rõhk on tarnekindlusel, kulude konkurentsivõimelisusel, omakapitalil ja finantsidel ning turuletoomiseajal.

Profiilide täpsem kirjeldus on esitatud lisa A lehel „Kaalumisprofiilid“ ja kokkuvõtlikult kujutatud järgmisel joonisel.

Üksikasjalik hinnang

Teises etapis kõrgele kohale tõusnud konstruktsioonilahendusi hinnati sügavama analüüsi abil: peatükis 5.2 on esitatud nende tugevad ja nõrgad küljed, et usaldusväärse ärimudeli alusel rõhutada nende revolutsioonilist potentsiaali Eesti energiatulevikus.

Hoiatus

Tuleb silmas pidada, et VMR-ide turg on viimastel aastatel kiiresti arenenud. Selles aruandes saadud tulemused koos ülal määratletud metoodikaga annavad hetkeülevaate TRACTEBEL-ile kättesaadavast parimast infost 2019. aasta novembri seisuga. TRACTEBEL-i seisukoht on, et see hinnang tuleks enne Fermi Energia esialgset investeerimisotsust üle vaadata, täiendada ja süvaanalüüsiga kinnitada.

TULEMUSED

Välisamisprotsess

Pärast täiustatud moodulreaktoreid ja väikeseid moodulreaktoreid käsitleva avalikult kättesaadava kirjanduse ([1]–[6]) ülevaatamist tunnistati hindamise lähtealuste kohaselt potentsiaalselt sobivaks 54 konstruktsioonilahendust. Pärast peatükis 4.2 esitatud välisamiskriteeriumite rakendamist jäi loendisse 14 konstruktsioonilahendust.

Tehnoloogia	Konstruktsioonilahendus	Tootja	Riik
(Terviklikud) surveveereaktorid	Rolls Royce SMR	Rolls Royce	Ühendkuningriik
	SMR-160	Holtec International	USA
	CAREM	CNEA	Argentiina
	NuScale	NuScale Power (Fluor)	USA
	SMART	KAERI	Korea Vabariik
Keevveereaktorid	BWRX-300	GE Hitachi	USA
Kõrgetemperatuurilised gaasjahutusega reaktorid	GTHTR300	JAEA	Jaapan
	HTR-PM	INET	Hiina
	Xe-100	X-energy	USA
Sulasoolareaktorid	IMSR	Terrestrial Energy	USA
	SSR-W	Moltex Energy	Ühendkuningriik
	Thorcon	Thorcon Power	USA-Indonesias
Naatriumjahutusega kiiretel neutronitel reaktorid	ARC-100	Advanced Reactor Concepts, LLC	USA
	PRISM	GE Hitachi	USA

Allpool on esitatud ülevaade välisatud konstruktsioonilahendustest koos selgitavate kommentaaride ja näidetega (konstruktsioonilahenduste kirjeldusi ja konstruktsioonilahenduste laiendatud loendit vt [1]).

- Keskenduti elektritootmisele elektrivõrke rahuldavas mahus ja protsessisoojusele tööstusliku kasutamise mahus. See jättis sellest hinnangust välja väga väikesed moodulreaktorid, mikromoodulreaktorid ja tuumapatareid, mis on suunatud rohkem nišiturule. Näited:
 - U-Battery (tootja: Urenco)
 - Gen4Module (tootja: Gen 4Energy)
 - Sealer (tootja: Lead Cold)
 - MMRTM (tootja: Ultra Safe Nuclear Corporation)
- Täiustatud kergveereaktorid (nt AP1000 (tootja: Westinghouse), HPR1000 (tootja: CNNC) jne) ja IV põlvkonna reaktorid (nt TWR ja MCFR (tootja: Terrapower), MSFR (tootja: CNRS) jne), mis keskenduvad üksnes mudelitele, mille võimsus on gigavattides, ei läbinud samuti tehnoloogiasõela.

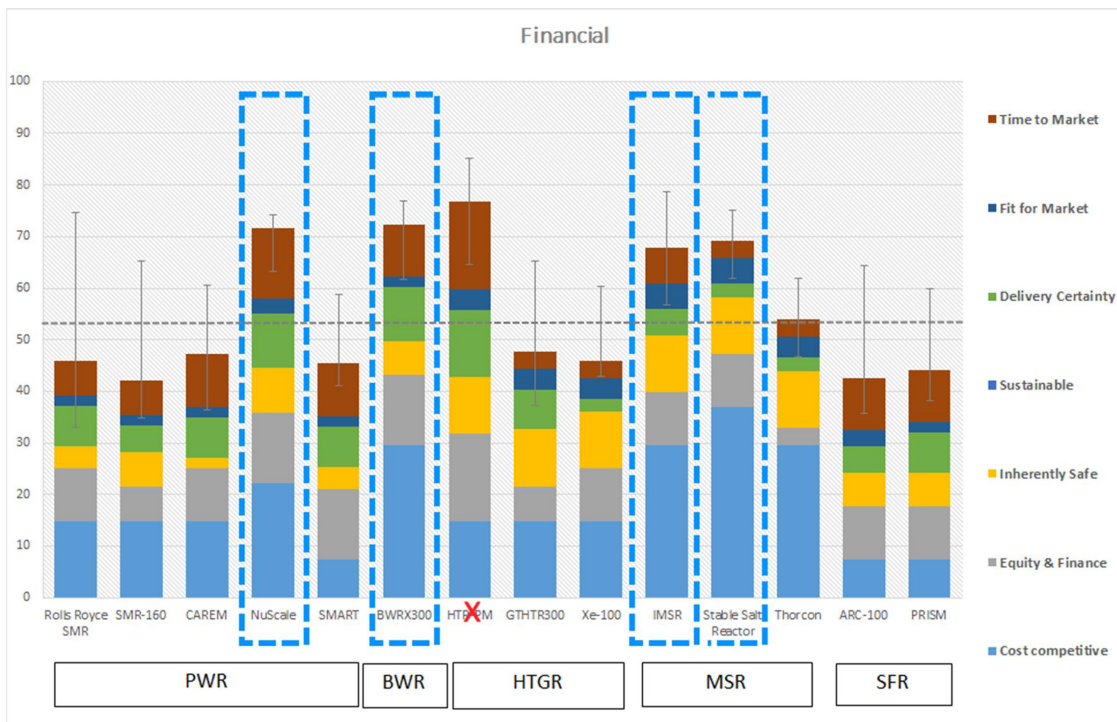
- Valikust jäid välja sellised konstruktsioonilahendused (rahastamise puudumine, arenda- ja valik), nagu:
 - mPower (tootja: BWXT)
 - PBMR-400 (tootja: PBMRSOC)
 - Flexblue (tootja: DCNS)
 - W-SMR (tootja: Westinghouse).
- Konstruktsioonilahendused, mille korral esimese omataolise tarne on kavandatud pärast 2035. aastat, nt:
 - EM² (tootja: General Atomics)
 - Fuji MSR (tootja: ITMSF)
 - MSTW (tootja: Seaborg Technologies).
- Konstruktsioonilahendused, mille kohta hindamise ajal polnud piisavalt infot:
 - NUWARD (tootja: CEA), EDF, Naval Group ja Technic Atome (koostöös Westinghouse'iga).
- Konstruktsioonilahendused, mille arendajad on FERMI ENERGIA jaoks ebatöenäolised partnerid, nt:
 - RITM-200 (tootja: OKBM Afrikantov)
 - SVBR-100 (tootja: AKME-Engineering)
 - BREST-OD-300 (tootja: NIKIET)
 - ACP100 (tootja: CNNC)
 - ACPR50s (tootja: CGNPC)
 - KLT-40s (tootja: OKBMAfrikantov)
 - *HTR-PM* (tootja: INET) on välistatud samal põhjusel. Arvestades asjaolu, et tege- mist on esimese (maismaal paikneva) VMR-iga, mis alustab tööd 2020, on konstrukt- sioonilahendus jäetud hinnangussevõrdluseks.*

Hindamine ja pingerida

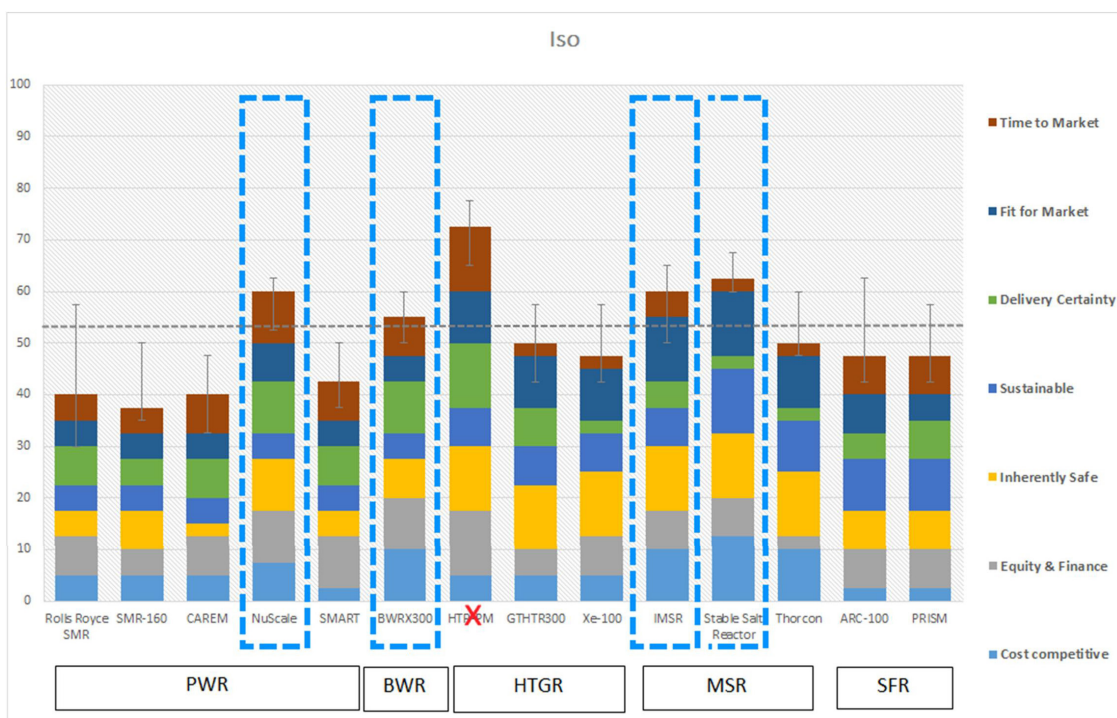
Allesjäänud 14 konstruktsioonilahendust hinnati kõrgtasemel, kasutades tootja avalikest esitlustest ja veebilehelt kättesaadavat infot, aga ka VMR-e käsitlevate IAEA brošüüride ([1], [2]) alusel. Hindamistulemusi töödeldi patenditud töövahendis Excelis (lisa A), mille lehed on struktureeritud järgmiselt.

- Pingerea analüüs on konstruktsioonilahenduste pingerida kokkuvõttev tabel, milles on arvessevõetud
 - erinevad kaalumisprofiilid
 - parimal hinnangul põhinevate hinnete pingerida
 - miinimumhinnete pingerida (negatiivse määramatuse arvestamisega)
 - maksimumhinnete pingerida (positiivse määramatuse arvestamisega).
- Tulemuse väärtus on konstruktsioonilahenduse koguhinnat ja määramatust kokkuvõttev arvvaartus konkreetse profiili tingimusi ja eelistusi arvestades.
- Kaalumisprofiilid näitavad iga profiili üksikasjalikke kaalumistegureid ja seda kasutatakse kõnealuse profiili valimiseks. Valiku tegemisel viidatakse järgmiselt:
 - 1 profiili Iso korral
 - 2 profiili Finants korral
 - 3 profiili Ökomodernist korral
 - 4 profiili Investor korral
 - 5 profiili Fermi Energia korral
 - 6 dünaamilise kaalumistundlikkuse töövahendi korral.
- Dünaamilise kaalumistundlikkuse töövahend on tööriist, mis võimaldab pingerea muutuste visualiseerimist kriitiliste edutegurite suhteliste kaalude muutmisel. Suhtelisele kaalule võib anda kasutaja soovitud mistahesväärtuse.
- Igal kriitiliste eduteguritega seotud seitsmest lehest on kokkuvõtlik tabel 14 konstruktsioonilahenduse hinnetega koos nimetatud kriitiliste edutegurite hinnete selgitusega. Sellel on esitatud ka kriitiliste edutegurite hindamiseks kasutatud juhised.

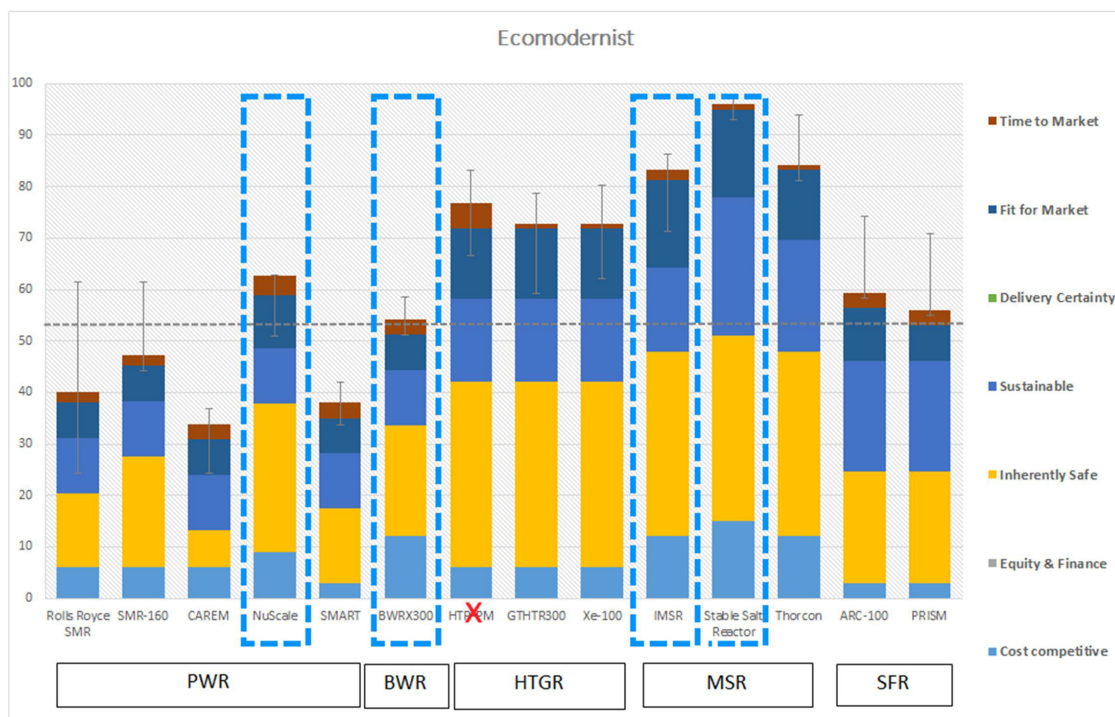
Peatükis 4.3.2 määratletud viie kaalumisprofiili tulemuste kokkuvõte on kujutatud järgmistel joonistel.



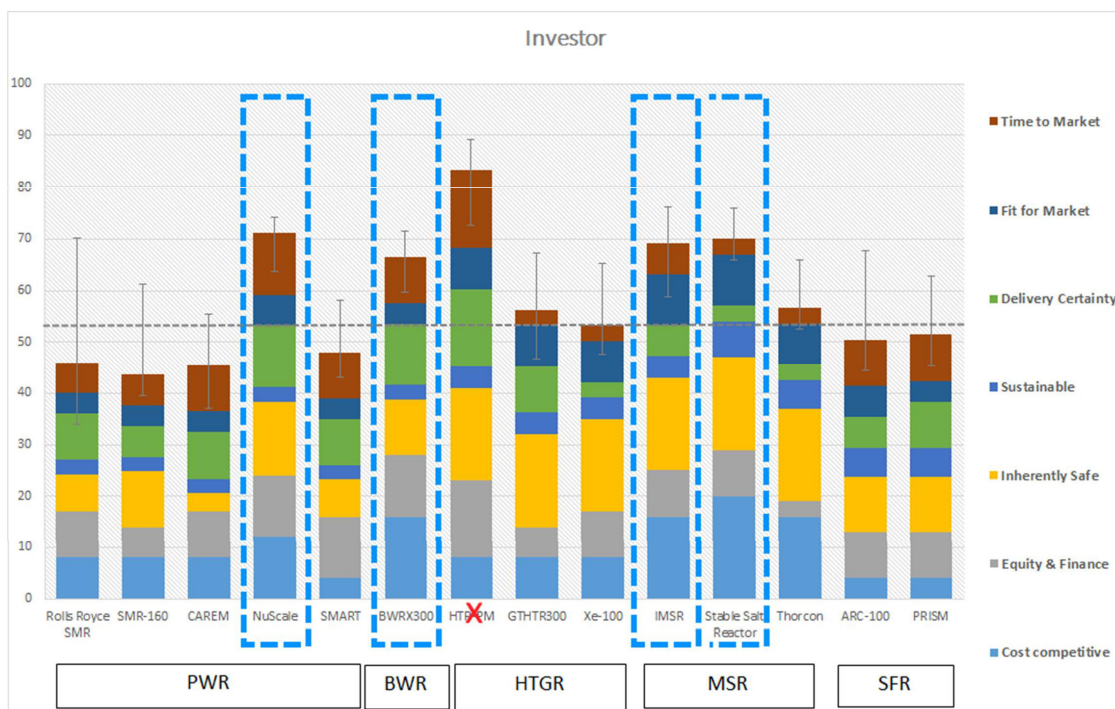
Joonis 5. Hindamistulemused ja pingerida: profiil Fermi Energia



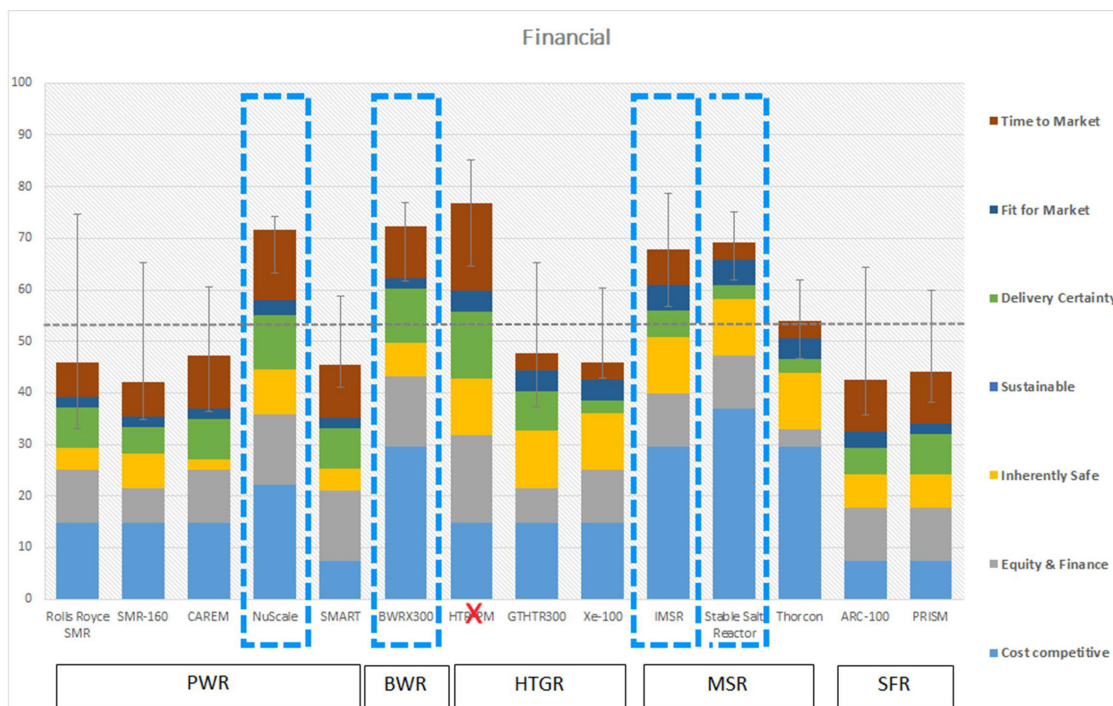
Joonis 6. Hindamistulemused ja pingerida: profiil Iso



Joonis 7. Hindamistulemused ja pingerida: profiil Ökomodernist



Joonis 8. Hindamistulemused ja pingerida: profiil Investor



Joonis 9. Hindamistulemused ja pingerida: profiil Finants

Selle hindamise tulemusena jäid viis konstruktsioonilahendust viies kaalumisprofiilis pidevalt lävendist allapoole (vt jooniseid 5–9). Üks neist (HTR-PM), on esitatud üksnes võrdluseks, sest see on Fermi Energia ebatõenäolise partnerina välistatud. Seetõttu jäid peamiste kandidaatidena alles neli konstruktsioonilahendust: kaks kergvee-VMR-i lühiperspektiivi variandina ja kaks sulasoolareaktorit pika perspektiivi variandina. Nende põhiomaduste kokkuvõte on esitatud allpool.

- **Terviklik surveveereaktor Nuscale Power Module**

- USA-st pärit konstruktsioonilahendus Nuscale (tootja: Nuscale Power) on vähemalt läänemaailmas kergvee-VMR-ide seas juhtival kohal. See on skaleeritav moodulkonstruktsioon, kus ühes reaktoribasseinis on tüüpjuhul kaksteist 60 MW moodulit.
- USA-s planeeritakse esimese omataolise konstruktsioonilahenduse äriotstarbel kasutuselevõtmist 2026. aastaks. Konstruktsioonilahendus põhineb ennast tõestanud surveveereaktorite tehnoloogial, millel on mõned uuenduslikud omadused. USA tuumaregulatsioonikomisjon on litsentseerimistaotlust üle vaatamas, konstruktsioonilahenduse sertifitseerimine on planeeritud 2020. aastaks.
- NuScale'i toetab projekteerimis-, hanke- ja ehitusettevõttena ning enamusinvestorina tugevalt Fluor koos paljude teiste kogenud tarnijate ja toetajatega.
- Reaktoril on (eriti kergveereaktori kohta) suurepärased passiivsed ohutusfunktsioonid: see peab vastu raskele õnnetusele ja ei vaja lõhustumissoojuse eemaldamiseks pika aja jooksul (üle 30 päeva) välist elektrienergiat, käitaja sekkumist ega täiendavat veevaru. Peale selle teevad paljud piiravad kihid tõenäoliselt võimalikuks, et ohuolukorraplaani piirkond piirdub jaama lähiümbrusega.

- See kontseptsioon hõlmab ka koormuse järgimist (südamiku võimsuse igapäevase varieerimisega, moodulite võimsuse reguleerimisega või auru väljalaskmisega väga kiire reguleerimise korral) ja madala temperatuuriga protsessisoojuse kasutamist.
- Nuscale püüab viia maksumuse praeguste kergveereaktorite omast väiksemaks. See saavutatakse ehitusega kaasnevate riskide vähendamise (eesmärgiks on vähem kui neli aastat alustamisest kuni mehaanilise valmisolekuni), keskkonnajalajälje vähendamise ja seeriatootmisega. Ehitamise usaldusväärne üleöömaksumus on n-inda omataolise seadme korral 4000–5000 USD/kW (tootja hinnangul <4000USD/kW).
- Kestlikkuse omadused ja puudused on sarnased praeguste surveveereaktoritega.
- **Väikekeevvee-moodulreaktor BWRX-300 (tootja: GE Hitachi)**
 - USA päritoluga konstruktsioonilahendus BWRX-300 (tootja: GE Hitachi) on USA tuumaregulatsioonikomisjoni litsentseeritud ESBWR-i edasiarendatud ja vähendatud versioon. See on üks kompaktne 300 MW moodul.
 - Puuduvad piisavad andmed esimese omataolise konstruktsioonilahenduse äriotstarbel kasutuselevõtmise aja kohta, kuid GE Hitachi kogemust ja head tehnoloogilist valmisolekut arvestades tundub usutavana järgmise kümnendi lõpp. Konstruktsioonilahendus läbib praegu litsentseerimiselset ülevaatus USA tuumaregulatsioonikomisjonis ja Kanadaohutusametis.
 - GE Hitachi on juhtiv keevveereaktorite projekteerija ja tarnija. BWRX300 on ehitatud ökonoomse lihtsustatud keevveereaktori (ESBWR) ja täiustatud keevveereaktori (ABWR) baasil ja selles kasutatakse ilmselt ainult üldtuntud tehnoloogiat. Eelnevat kogemust arvestades ei teki eriti kahtlust, et GE Hitachi suudab tagada usaldusväärse ja töökindla tarneahela.
 - BWRX300-s on kasutusel passiivsed ohutusfunktsioonid, mis tagavad lõhustumissoojuse eemaldamisvõime käitaja sekkumiseta ja elektritoiteta vähemalt seitsmepäevase pikendatud reageerimisaja vältel. Praeguste täiustatud kergveereaktoritega võrreldes on see märkimisväärne edasimineku.
 - Konstruktsiooni lahendusse on integreeritud koormuse (tüüpilise ööpäevase tsükli) järgimine ja madala temperatuuriga protsessisoojuse kasutamine (nt kaugküte).
 - BWRX-300 kõige atraktiivsem omadus on tõenäoliselt tootja deklareeritav kulude konkurentsivõimelisus (ehituse üleöömaksumus umbes 2000 USD/kW), mis saavutatakse süsteemi lihtsuse, ehitusega kaasnevate riskide vähendamise (eesmärgiks on alla 3,5 aasta alustamisest kuni mehaanilise valmisolekuni) ja keskkonnajalajälje vähendamise. Ehitamise üleöömaksumus on n-inda omataolise mooduli korral tagasiside puudumisest ja konstruktsioonilahenduse vähesest küpsusest (kontseptuaalne konstruktsioonilahendus) tingitud ettevaatlikul hinnangul 3000–4000USD/kW.
 - Kestlikkuse aspektist on BWRX-300 võrreldav praeguste kergveereaktoritega.

- **Kiire sulasoolareaktor MOLTEX Energy SSR-W**

- SSR-W on Ühendkuningriigi ettevõtte Moltex Energy kiire sulasoola-moodulreaktor. Erandina tavalistest sulasoolareaktoritest ei ole selles kütus segatud jahutusvedeliku (sulasoola) sisse, vaid kasutatakse kütuseelementides olevat vedelkütust. Esimese omataolise konstruktsioonilahenduse võimsus on 300 MW, kuid reaktori võimsust saab suurendada kombineerides umbes 150 MW võimsusega üdamikumoduleid.
- MOLTEX on esimese omataolise reaktori ehitamiseks Kanadas (Point Lepreau objektil) allkirjastanud lepingu Kanada elektriettevõttega New Brunswick Power. Moltex on Kanada tuumaohutuskomisjonis algatanud eellitsentseerimise ja on lõpule viimas esimest faasi. Ettevõttel veel eesoleva suure uurimis- ja arendustöö valgues võib äriotstarbel kasutuselevõtmist oodata 2030. aastate alguses.
- MOLTEX on oma uurimis- ja arendusprogrammi toetuseks saanud nii rahalist kui ka tehnilist abi Kanada tunnustatud asutustelt ja USA riiklikelt laboritelt. MOLTEX-it on rahastanud erainvestorid (Hispaania projekteerimisettevõtte, Kanada elektriettevõtte New Brunswick Power), avalik-õiguslikud investorid (Ühendkuningriigi äri-, energeetika- ja tööstusstrateegiaamet, USA ja Kanada energeetikaministeeriumid) ja ühisrahastajad (platvorm Shadow Foundr).
- SSR-W konstruktsiooni lahenduse eeliseks on sulasoolareaktorite väljapaistvad olemuslikud ohutusfunktsioonid st (väike rõhk, reaktsiooni negatiivne tagasiside, termiline inerts) ja seetõttu on see äärmiselt vastupidav raskele õnnetusele. Passiivsüsteemid suudavad tagada pikaajalise jahutamise väliste ressursideta ja käitaja sekkumiseta. Isegi kõige halvemal tõenäolisel juhul oleksid kiirgustagajärjed oluliselt kergemad (madal primaarrõhk, lenduvate lõhustumissaaduste keemiline peetumine, vedelkütus ei sula) ja ohuolukorraplaani piirkond jääb jaama piiresse.
- SSR-W tagab koormuse suurepärase tasakaalustamise koos soojuse salvestamisega (võimsust muudetakse tavapoolet, mitte reaktori poolet). See pakub ületamatut täiendust taastuvenergiasüsteemidele. Tertsiaarse soolakontuuri kõrge temperatuur (>550 °C) võimaldab kasutada kõrge temperatuuriga protsessisoojust.
- SSR-W pakub ka kulude head konkurentsivõimelisust. Ehitamise usaldusväärne üleöömaksumus on n-inda omataolise seadme korral umbes 3000 USD/kW või väiksem. See tuleneb madalsurvekomponentide kasutamisest, süsteemi lihtsast konstruktsioonist ja tuumarajatisest väga väikesest keskkonna jalajäljest.
- Üks SSR-W-d eristav omadus on kahtluseta asjaolu, et tegemist on jäätmepõletiga. See kiire reaktor suudab põletada taastöödeldud kütusejääke (eelkõige plutooniumit ja väikesi aktinoide). Selline täiustatud kütus teeb sellest oma klassi parima kestlikkusega reaktori. Teisest küljest tekitab kütuse tarneahela loomise lisaraskus (nt kütuse muundamisrajatis) tarneriski. Et Eestis ei ole kasutatud kütuse varu, eeldab SSR-reaktori ehitamine kas kasutatud kütusetarnelepingute sõlmimist tuumariikidega (võib eksisteerida kõigile kasulik ärimudel, mis aitab teistel Euroopa riikidel vähendada kõrgaktiivsete jäätmete kogust) või SSR-i uraanikütusega mudeli (mille konstruktsioonilahendus on vähem küpsem) kasutamist.

- **Termiline sulasoolareaktor IMSR (tootja: Terrestrial Energy)**

- Kanadast pärit konstruktsioonilahendus IMSR (tootja: Terrestrial Energy) on kõrgtemperatuuriline grafiitaeglustiga 200 MW sulasoolareaktor, mille konstruktsioonilahenduses on kiireimaks võimalikuks turuletoomiseks tehtud praktilisi valikuid.
- Tundub, et Terrestrial Energy on olnud üsna edukas esimesteks arendusfaasideks rahastuse leidmisel (praeguse konstruktsioonilahenduse, mis on põhikonstruktsioon). Reaktor IMSR on edukalt läbinud Kanada tuumaohutuskomisjoni eellitsentseerimisesimese faasi ja Terrestrial Energy on praegu teises faasis. On usutav, et esimese omataolise konstruktsioonilahenduse äriotstarbel kasutusele võtmine toimub 2030. aastapaiku.
- Terrestrial Energy on komponentide tarnimiseks ning uurimis- ja arendustöödeks sõlminud mitmeid lepinguid põhitarnijatega (sh USA riiklike laboritega). Terrestrial Energy tarnestrateegiaks on uurimis- ja arendustöö probleemide leevendamine oluliste põhikomponentide tööevähendamiseks.
- IMSR-i konstruktsioonilahendus võimaldab kasu saada ka sulasoolareaktorite välja-paistvatest olemuslikest ohutusfunktsioonidest (väike rõhk, reaktsiooni negatiivne tagasiside, termiline inerts). See on äärmiselt vastupidav raskele õnnetusele: passiivsüsteemid suudavad tagada pikaajalise jahutamise väliste ressurssideta ja käitaja sekkumiseta. Isegi kõige halvemal tõenäolisel juhul oleksid kiirgustagajärjed oluliselt kergemad (madal primaarrõhk, lenduvate lõhustumissaaduste keemiline peetumine, vedelkütuseisula) ja ohuolukorraplaani piirkond jääb jaama piiresse.
- Kõrge temperatuuriga protsessisoojuse kasutamine (nt vesiniku tootmine) ja koormuse järgimine (soojussalvestusega) on selle kontseptsiooni osad.
- IMSR pakub väga head kulude konkurentsivõimelisust. Ehitamise usaldusväärne üleöömaksumus on n-inda omataolise seadme korral 3000–4000 USD/kW. Tuleks siiski märkida, et primaarmahuti plaanilise vahetamise tõttu iga 8 aasta tagant võivad käitamiskulud olla suuremad kui praegustel reaktoritel.
- Konstruktsioonivalikuid (nt suhteliselt väikest rikastust ja väljapõlemismäära) arvestades on IMSR-i tekitatav kõrgaktiivsete jäätmete kogus ühe läbimiga tsükli korral usutavasti võrreldav surveveereaktoritega. Siiski võivad vedelkütuse omadused soodustada (mitmekordset) taastöötlemist ja parandada märkimisväärselt reaktori üldistkestlikkust.

VIITED

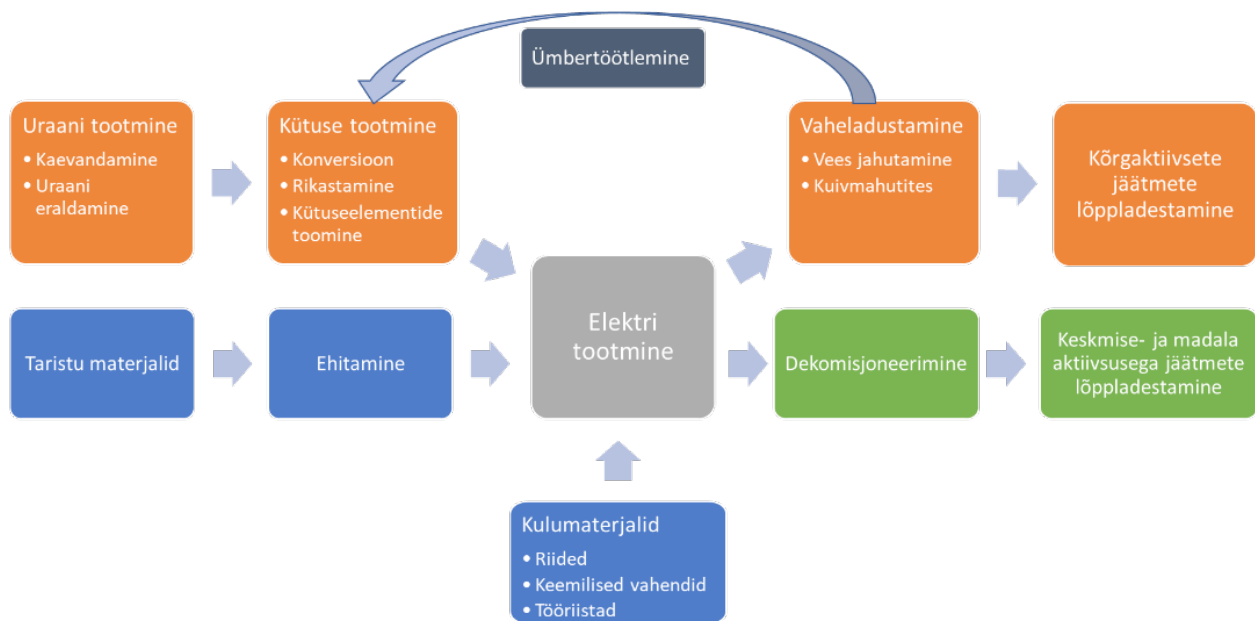
- [1] Advances In Small Modular Reactor Technology Developments – väljaanne 2018, IAEA
- [2] Advances In Small Modular Reactor Technology Developments – väljaanne 2016, IAEA
- [3] Advances In Small Modular Reactor Technology Developments – väljaanne 2014, IAEA
- [4] IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS), veebileht <https://aris.iaea.org/>
- [5] UxC SMR Research Center, veebileht: <https://www.uxc.com/smr/>
- [6] World Nuclear Association, veebileht, Small Nuclear Power Reactors – november 2018 uuendus: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>

- [7] Rolls Royce SMR, veebileht (viimati kontrollitud 28. novembril 2019): <https://www.rolls-royce.com/products-and-services/nuclear/small-modular-reactors.aspx#section-leading-the-consortium>
- [8] Holtec SMR-160, veebileht (viimati kontrollitud 28. novembril 2019): <https://smrllc.com/>
- [9] CNEACAREM, veebileht (viimati kontrollitud 28. novembril 2019): <https://www.cab.cnea.gov.ar/index.php/proyectos/carem>
<https://www.argentina.gob.ar/cnea/carem>
- [10] NuScale Power, veebileht (viimati kontrollitud 28. novembril 2019): <https://www.nuscalepower.com/>
- [11] KAERI SMART SMR, veebileht (viimati kontrollitud 28. novembril 2019): <http://smart-nuclear.com/>
- [12] GE Hitachi BWRX-300, veebileht (viimati kontrollitud 28. novembril 2019): <https://nuclear.gepower.com/build-a-plant/products/nuclear-power-plants-overview/bwr-300>
- [13] INETHTR-PMpaper, GIF-esitlus- ja veebileht (viimati kontrollitud 28. novembril 2019): <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809916301552>
https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2018-02/gif_webinar_htr-pm_dong_201801v2_final.pdf
<http://www.inet.tsinghua.edu.cn/publish/ineten/5676/index.html>
- [14] JAERIGT-HTR-300, brošüür ja IAEA andmeleht (viimati kontrollitud 28. novembril 2019): <https://www.jaea.go.jp/04/o-arai/nhc/en/assets/images/brochure/brochure.pdf>
<https://aris.iaea.org/PDF/GTHTR300C.pdf>
- [15] X-energy, veebileht (viimati kontrollitud 28. novembril 2019): <https://www.x-energy.com/>
- [16] Terrestrial Energy IMSR, veebileht (viimati kontrollitud 28. novembril 2019): <https://www.terrestrialenergy.com/>
- [17] Moltex Energy SSR, veebileht (viimati kontrollitud 28. novembril 2019): <https://www.moltexenergy.com/>
- [18] Thorcon Power, veebileht (viimati kontrollitud 28. novembril 2019): <http://thorconpower.com/>
- [19] Advanced Reactor Concept ARC-100, veebileht (viimati kontrollitud 28. novembril 2019): <https://www.arcnuclear.com/>
- [20] GE Hitachi PRISM, veebileht (viimati kontrollitud 28. novembril 2019): <https://nuclear.gepower.com/build-a-plant/products/nuclear-power-plants-overview/prism1>

2.4 KÜTUSE, TARISTU JA KULUMATERJALIDE AHELATE SISSEJUHATAV KIRJELDUS

Tuumaelektrijaamades kasutatavate materjalide liikumised võib jagada kolmeks (Joonis 1): kütusetsükkel; taristu ja seadmed; abiseadmed ja materjalid (nt. tööriided, tööriistad, jms). Neist kütusetsüklikuks nimetatakse tuumkütuse ahelat. Selle põhietappideks on kütusemaagi kaevandamine, kütuse tootmine, kasutatud tuumkütuse ümbertöötlemine uraani (U) ja plutooniumi (Pu) eraldamiseks, vaheladustamine ning radioaktiivsete jäätmete lõpladustamine. Kui ahel sisaldab ümbertöötlemist, nimetatakse tsükli suletuks, ümbertöötlemiseta ahelat aga avatud kütusetsüklikuks. Taristu ahel sisaldab taristu jaoks vajalike ehitusmaterjalide ning seadmete tarnet, jaama ehitamist, jaama käitamist, jaama sulgemist, dekomisjoneerimist ning jaama käitamisel ja dekomisjoneerimisel tekkivate madala ning keskmise radioaktiivsusega jäätmete lõpladustamist.

Käesolev peatükk käsitleb vaid kütusetsükli.



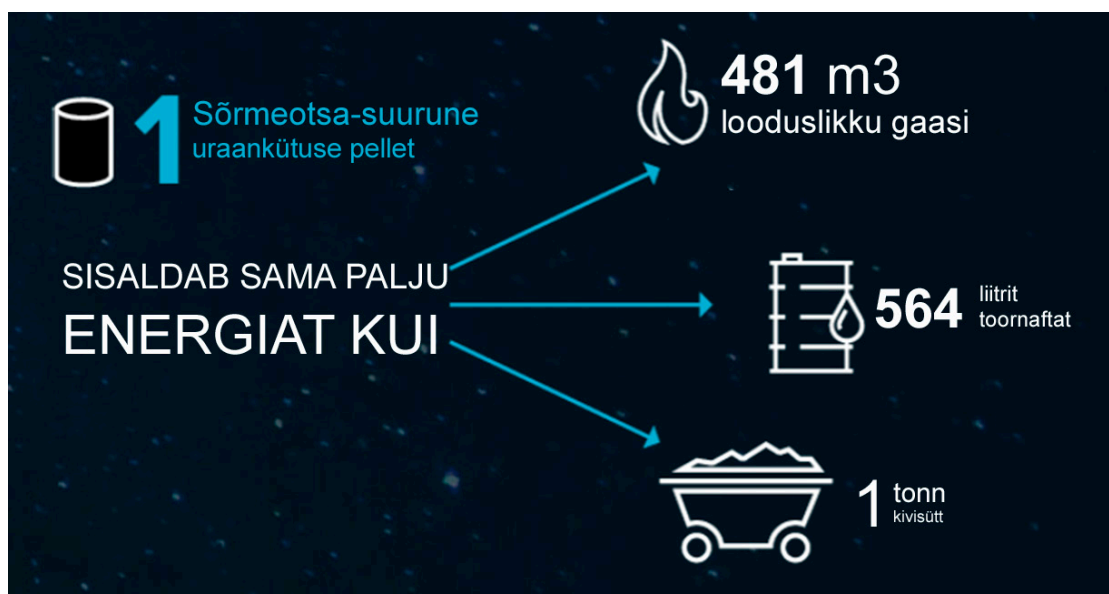
Joonis 1. Kütuse, taristu ja muude materjalide abelad tuumaenergeetikas.

KÜTUSEAHEL

Tehnoloogiavalikust sõltumatud aspektid

Tuumkütus

Tuumkütus on materjal, millest saab tuuma lõhustumise abil energiat toota. Enimlevinud tuumkütusematerjal tuumaelektrijaamades on uraan, mis on looduses laialt levinud element. Tuumalõhustumise käigus vabaneb 1 kg lõhustuvast uraanist ca 3 miljonit korda rohkem energiat kui 1 kg kivisöe põletamisel. Energiatootmiseks kuluvat kütuse koguse erinevust konventsionaalsest kütusest illustreerib joonis 2.



***Joonis 2.** Uraanpelleti põletamisel toodetava energiakoguse võrdlus sama energiahulga tootmiseks vajaliku fossiilkütuse kogusega. Võrdlus võtab arvesse tüüpilist U-235 kontsentratsiooni tuumkütuses.*

Uraan esineb looduses peamiselt kahe isotoobina - U-238 (99.3%) ning U-235 (0.7%). Tavalised vesijahutusega reaktorid vajavad uraani rikastamist ehk U-235 kontsentratsiooni tõstmist ca 4%-ni. Teatud reaktoritehnoloogiate (nt rasket vett või sulasoolasid jahutusvedelikuna kasutavad reaktorid) puhul saab kasutada ka looduslikku uraani ehk kütuse rikastamist vaja ei ole. Reaktoris kasutatakse uraani tahke oksiidi kujul (UO_2).

Teine tuumaelektrijaamades kasutatav kütus on nn oksiidide segu ehk MOX kütus. See kütus sisaldab lisaks värsketele või ümbertöödeldud uraanile ka juba kasutatud kütusest eraldatud plutooniumi, mis on väga tõhus kütusematerjal. Tuumaelektrijaamades alternatiivseid kütusetüüpe nagu metalliline, mitteoksiid-keraamiline, gaasiline või vedelal kujul oleva uraankütus seni kasutusele jõudnud ei ole.

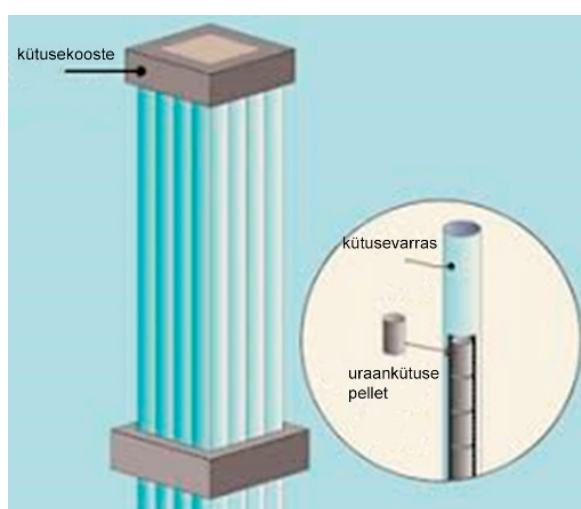
Uraani saadavus ja ekstraheerimine

Uraani leidub praktiliselt igal pool looduses nii kivimites kui ka näiteks merevees. Kütuse tootmiseks peetakse majanduslikult sobivaks mineraale, milles uraani kontsentratsioon ületab 0,1%. On hinnatud, et praeguseks teadaolevate uraanivarude põhjal uraanil põhineva tuumkütuse puudust lähemate inimpõlvede jooksul karta ei ole ning see tuumaenergeetika arengut takistada ei saa. Pigem võib piiravaks asjaoluks osutuda, kui paljude erinevate kütusetarnijate vahel on võimalik iga konkreetse reaktoritüübi korral valida.

Kaevandatav uraanimaak peenestatakse ning uraan ekstraheeritakse hapete või leelislahustitega. Ekstraheerimise tulemusena saadud uraanperoksiid (U_3O_8) kuivatatakse ja peenestatakse. Saadud produkti tuntakse ka „kollakoogi“ nime all.

Konversioon ja rikastamine – kergeveereaktorid vajavad lõhustumisprotsesside säilimiseks uraani rikastamist. Enamik tänapäeval kasutusel olevatest reaktoritehnoloogiatest kasutab kütust U-235 rikastustasemega kuni 5%, mida nimetatakse madala rikastusastmega kütuseks. Rikastamiseks on vajalik „kollakook“ keemiliselt puhastada kas märg- või kuivprotsessi abil, misjärel U_3O_8 muundatakse gaasilisse olekusse uraanheksafluoriidiks (UF_6). UF_6 rikastamine toimub peamiselt tsentrifuugimise või gaas-difusioonmeetodil.

Kütuseelementide tootmine – enamik maailma tuumaelektrijaamadest kasutab kütust uraandioksiidi vormis, seetõttu konverteeritakse rikastatud UF_6 uraandioksiidiks (UO_2). UO_2 on must pooljuhtiv tahke aine, millel on madal soojusjuhtivus. UO_2 pulber pressitakse kõrge surve all 7 mm läbimõõduga ja 10 mm kõrgusega pelletiteks, mis kuumtöötlemise abil muudetakse ühtlasteks kütusepelletiteks. Nii toodetud pelletid laaditakse üksteise otsa tsirkooniumsulamist valmistatud kütusevarrastesse, mis eraldavad tuumkütuse ülejäänud reaktorikeskkonnast (vt Joonis 3). Kütusevarraste ja juhtvarraste kogumit nimetatakse kütusekoosteks.



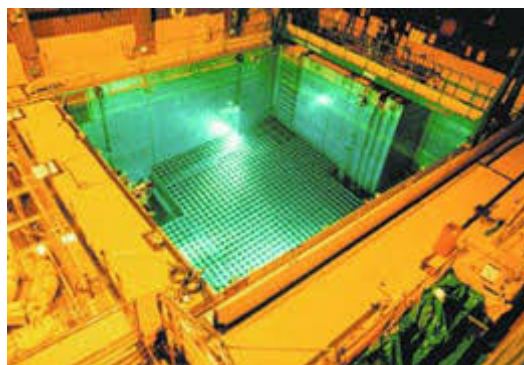
Joonis 3. Illustratsioon kütusepelletist, kütusevardast ning kütuse koostust.

Tänapäevastes reaktorites kasutatakse üha enam suurendatud õnnetustaluvusega reaktorkütuseid. Sellised kütused põhinevad materjalidel ja tehnoloogiatel, mis vähendavad vesiniku tekkimist, on korrosiooni-, kõrgtemperatuuri- ning kiirituskindlamad.

Erinevalt fossiilsetel kütustel töötavatest jaamadest moodustab kütuse hind jaama opereerimise kogukuludesse väikese osa. Võib hinnata, et kütuse hind moodustab ca 3% kogu tootmiskulude maksumusest.

Kasutatud tuumkütus on reaktoris soojusenergia tootmise eesmärgil kiiritatud kütus, milles enamus U-235 isotoobist on soojuse tekitamisel ära kasutatud ning mille sisaldus seetõttu on langenud ca 1%. Kasutatud kütus sisaldab erinevaid radioaktiivseid lõhustumisprodukte ja transuraanseid elemente ning liigitub seetõttu kõrge radioaktiivsusega jäätme. Pärast lõhustumisreaktsioonide lakkamist kuumutavad radioaktiivsed jääkproduktid kütust veel mitu aastat sellisel määral, et kütus vajab pidevat jahutamist. Tuumaelektrijaamades hoitakse kasutatud kütust esimesed aastad vee all kasutatud kütuse basseinis (vt Joonis 4). Sellist lahendust kasutavad ka NuScale ja BWRX-300. Kasutatud tuumkütust liigutatakse reaktorist jahutusbasseini vee all. 3–5 aasta jooksul väheneb radioaktiivsuse tase ja lagunemisel tekkiv kuumus sedavõrd,

et kasutatud tuumkütust saab ümbertöödelda või suunata edasi kuivladustamisele (Joonis 5). Tänapäevaks on tuumatööstuses hästi väljakujunenud praktika kasutatud tuumkütuse ladustamiseks vahelhoidlates kuni 100 aastaks. Pärast vaheladustamist on kasutatud tuumkütuse käitlemiseks kaks peamist lähenemisviisi: 1) kütuse ümbertöötlemine ja taaskasutus või 2) lõppladustamine.



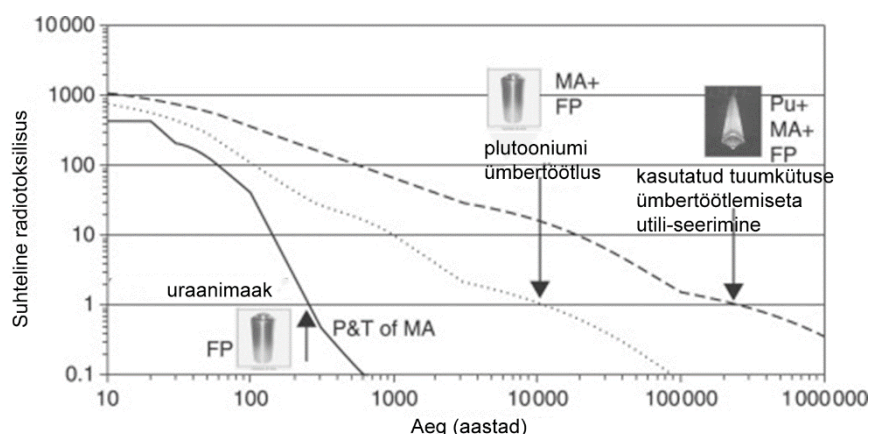
Joonis 4. Kasutatud kütuse jahutusbassein.

<i>Reaktori sulgemisest möödunud aeg</i>	<i>Lagunemisreaktsioonide võimsuse suhe reaktori nominaalvõimsusesse</i>	<i>Lagunemisvõimsus 3000 MW võimsusega reaktori korral</i>
0	0,065	195
1 sekundit	0,055	165
10 sekundit	0,05	150
1 minut	0,035	105
10 minutit	0,02	60
30 minutit	0,015	45
1 tund	0,012	36
12 tundi	0,006	18
1 päev	0,005	15
10 päeva	0,0025	7,5
30 päeva	0,002	6
60 päeva	0,0015	4,5
1 aasta	0,0009	2,7

Joonis 5. Lagunemisel tekkiva energia vähenemine pärast reaktori seiskamist.

Kasutatud kütuse ümbertöötlemine ja ringlussevõtt. Tuumaenergia eripäraks on, et kasutatud kütust saab ümber töödelda ning taaskasutada. Praegu läheb maailmas ümbertöötlemisele umbes üks kolmandik kasutatud tuumkütusest. Ümbertöötlemist rakendavad Venemaa, Hiina, Prantsusmaa, India ja Jaapan, vältides väärtusliku ressursi raiskamist [vii]. Ümbertöötlemise käigus eraldatakse kõrgradioaktiivsed jäätmed, mis lõppladustamiseks seotakse inertse, klaasistatud ballastmaterjaliga. Joonisel 6 on illustreeritud, kui palju erineb jäätmete radiotoksilisuse vähenemise kiirus sõltuvalt sellest, kas jäätmed sisaldavad vaid lõhustumisprodukte, ainult väikeaktiiniide (väikeaktiiniidideks nimetatakse tuumareaktsioonide tulemusel tekkivaid aktiiniide va. uraan ja plutoonium) ja lõhustumisprodukte või nii plutooniumit, väikeaktiiniide kui ka lõhustumisprodukte [ii]. SSR-W reaktori korral on planeeritud kasutada tuumakütusena just ümbertöödeldud kütust. SSR-W reaktorid annavad võimaluse konventsionaalsetest

reaktoritest pärit Pu kohe kasutusele võtta, kuna tehnoloogia litsentseerimine on kavandatud plutooniumikütuse jaoks.



Joonis 6. Lõhustumisprodukte (FP), aktiniide ja lõhustumisprodukte (MA+FP) ning plutooniumi, aktiniide ja lõhustumisprodukte (Pu+MA+FP) sisaldavate jäätmete aktiivsuse kontsentratsioonide alanemise muutus võrreldes uraanimaagi kontsentratsiooni muutusega [ii].

Kasutatud tuumkütuse ümbertöötlemiseks on kasutusel erinevaid eraldamistehnoloogiaid, peamised neist on vesi- ja orgaanilistel lahustitel (PUREX, UREX, TRUEX, jt) ning termotöötlusel põhinevad meetodid. Tavaliselt kasutatakse tahkekütuste jaoks vee- ja orgaaniliste lahustite tehnoloogiat (nt. NuScale ja BWRX-300 reaktorid), samas kui sulasoolaga kütuste (IMSR400 ja SSR-W reaktorid) jaoks kavandavad tehnoloogiaarendajad termotöötlust.

Jäätmete käitlus ja lõppladestamine

Tuumamaterjalide, kasutatud tuumkütuse ja muude radioaktiivsete materjalide käitlemine on rangelt kontrollitud nii siseriiklikult kui rahvusvaheliselt. Eesti on ühinenud kasutatud tuumkütuse ja radioaktiivsete jäätmete ohutu käitlemise konventsiooniga [i].

Üheks radioaktiivseid jäätmeid iseloomustavaks omaduseks on, et nende radioaktiivsus väheneb aja jooksul. See asjaolu muudab jäätmete käitlemise lihtsamaks. Näiteks on kasutatud kütuse jääkradioaktiivsus 40 aastat pärast reaktorist eemaldamist vaid üks tuhandik algsest radioaktiivsusest.

Tuumaenergeetikas tekkivad jäätmed võib liigitada kolmeks – kõrge radioaktiivsusega (HLW), keskmise radioaktiivsusega (ILW) ning madala radioaktiivsusega (LLW) jäätmed. Kõige olulisem HLW allikas on kasutatud tuumkütus [vii]. HLW-jäätmed moodustavad vaid 3% tuumaenergia tootmisel tekkivatest jäätmetest, kuid need sisaldavad 95% kõikide jäätmete radioaktiivsusest. Kasutatud tuumkütuse radioaktiivsete jäätmete täpne koostis sõltub alati reaktori neutronspektrist, neutronvoo tugevusest, läbipõlemisastmest ja kasutusajast enne ümbertöötlemist või utiliiseerimist. Jäätmete maht sõltub aga jäätmekäitlusstrateegiast. Üldistatuna võib öelda, et kasutatud kütuse ümbertöötlemata jätmise korral tuleb seda käsitleda HLW-jäätmena. Ümbertöötlemisega jäätmekäitluse korral saab aga HLW jäätmekoguseid väga oluliselt vähendada.

Tabelis 1 on esitatud SWOT-analüüs avatud kütuse tsüklile. Tabelis 2 on esitatud SWOT-analüüs suletud kütusetsüklile.

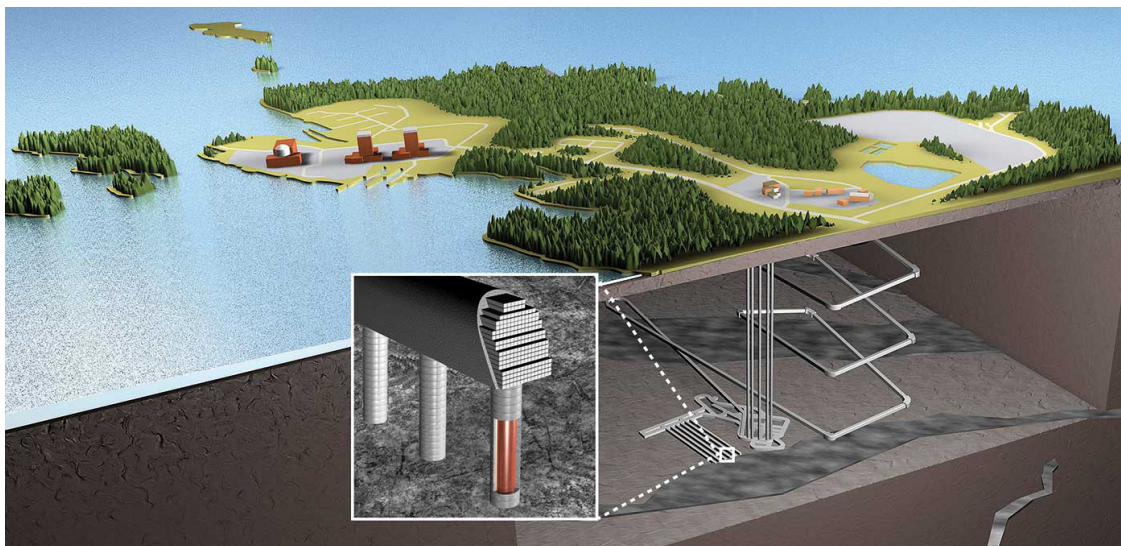
Tabel 1. Kütusetsükli SWOT-analüüs avatud kütusetsüklile.

Tugevused: • hästi arenenud uraani toorme tootmistehnoloogia; • hästi arenenud tehnoloogia kütuse tootmiseks; • hästi arenenud tehnoloogia kasutatud tuumkütuse ajuti-seks ladustamiseks; • suhteliselt palju tuumkütuse tarnijaid; • uraani lai levik; • kütuse madal kulu võrreldes käidukuludega.	Nõrkused: • potentsiaalselt piiratud majanduslikult soodsad U ressur-sid; • kõrgradioaktiivsete jäätmete lõppladustamisega seotud määramatus (lõppladustamise koha valik, ehituskulud, tegevuskulud); • Suur lõppladestatav jäätmekogus võrreldes ümbertöötlemist sisaldava käitlusahelaga.
Võimalused: • lõppladestamine mõnes rahvusvahelises rajatises; • rahvusvahelise, IAEA madalrikastatud uraanipanga [] kasutamine.	Ohud: • sõltuvus U tarnijatest; • sõltuvus U rikastamisteenuste pakkujatest.

Tabel 2. Kütusetsükli SWOT-analüüs ümbertöötlemist sisaldavale käitlusahelale.

Tugevused: Kõik tabelis 1 toodud tugevused ning lisaks: • U ja Pu taaskasutamine; • lõppladustamisele mineva HLW koguste vähenemine.	Nõrkused: • kõrged kasutatud kütuse ümbertöötlemiskulud; • kõrgradioaktiivsete jäätmete lõppladustamisega seotud määramatus (lõppladustamise koha valik, ehituskulud, tegevuskulud); • tuumarelvade loomiseks potentsiaalselt kasutatava tuuma-materjali levimiskid; • üsna keeruline ümbertöötlemistehnoloogia; • suhteliselt keeruline Pu-ga kütuse litsentsimise kord.
Võimalused: • lõppladustamine mõnes rahvusvahelises rajatises; • rahvusvahelise, IAEA madalrikastatud uraanipanga ka-sutamine.	Ohud: Kõik Tabelis 2 toodud ohud ning lisaks: • sõltuvus ümbertöötlemisteenuste pakkujatest (juhul kui ümbertöötlemistehas asub Eestist väljaspool).

Kasutatud tuumkütuse ja kõrgradioaktiivsete jäätmete ohutu käitlemise parimaks võimaluseks peetakse nende paigutamist süvageoloogilisse lõppladestuskohta eesmärgiga isoleerida jäät-med biosfäärist []-[] . Isolatsioon saavutatakse tehniliste ja looduslike tõkete kombineerimise tulemusena. Lisaks peab ladestuskoht olema konstrueeritud nii, et tulevastel põlvedel ei ole kohustust ladestuskohta hooldada. Sarnaseid lõppladestushoidlad on juba kasutusel muude mürgiste jäätmete hoiustamiseks (mille mürgisuse aste erinevalt tuumajäätmete radioaktiivsusest aja jooksul ei vähene). Kogu maailma kasutatud tuumkütusest (ca 300 000 t []) paikneb praegu ca 90% turvaliselt reaktori-lähedastes või riikide tsentraalsetes vaheladustuspaikades. Siiani on ümbertöödeldud umbes 100 000 tonni kasutatud tuumakütust. Aastane ümber-töötlemisvõimsus on tavaliste oksiidkütuste puhul umbes 5000 tonni aastas [xv]. Riigid on asunud lõppladustamist planeerima lähtudes rahvusvaheliselt heakskiidetud ning IAEA poolt kinnistatud printsiibist, et tuumaelektrijaamadest saadud energiat kasutav generatsioon vastu-tab ka kaasnenud jäätmete turvalise ning ohutu lõppladustamise eest. Radioaktiivsete jäätmete lõppladestushoidlate rajamisel on kõige kaugemale jõutud Soomes ja Rootsis []. Nende plaani-de kohaselt kapseldatakse kasutatud kütus malmist sisekatttega vaskkanistritesse ning paiguta-takse vähemalt 400 m sügavusele graniidist aluskivimisse (vt joonis 7).



Joonis 7. Soome kavandatud kõrge radioaktiivsusega jäätmete lõppladestushoidla [1].

Tuumaanergeetikaga alustamist kaaluvatel riikidel soovitab IAEA [xiii] samuti kõigepealt luua riiklik kasutatud kütuse ning radioaktiivsete jäätmete käitlemisepoliitika ning käitlemiseks vajalik infrastruktuur.

Rahvusvahelised / piirkondlikud hoidlad. Seni on valitsenud konsensuslik arusaam, et igal riigil on eetilise ja õigusliku vastutus oma jäätmete ohutu käitlemise ees. Seetõttu toimub ka radioaktiivsete jäätmete käitlemine senini riigisiselt. Samas, juba 2003. aastal on IAEA väljendanud arvamust [1], et jäätmekäitlust võiks korraldada rahvusvaheliselt. Ümbertöötlemist või lõppladustamist vajavad rohkem kui 50 riigis asuvad ajutiselt ladustatud tuumkütuse jäätmed. Kõikides riikides ei ole lõppladustamiseks sobivaid geoloogilisi tingimusi ning paljude väikeriikide jaoks oleks geoloogiliste lõppladestusrajatiste ehitamiseks ja käitamiseks vajalikud rahalised ja inimressursid ebamõistlikult suured. Näiteks Austraalia teatas 2016. aastal, et neil on maailmatasemel jäätmekäitluskoha väljaarendamiseks ja ohutuks käitlemiseks kõik võimalused [2]. Sarnased rahvusvahelised või regionaalsed jäätmekäitlusrajatised võiks tulevikus olla riiklikele projektidele arvestatav alternatiiv. Selline suur rahvusvaheline jäätmehooldla peaks väiksemate riiklike lahendustega võrreldes pakkuma eeliseid nii asukoha sobivuse kui ökonoomsuse poolest. Samas, käesoleval hetkel selliseid valikuid reaalselt veel ei eksisteeri ning raske on ennustada, kui kiiresti rahvusvaheline kogukond niikaugele jõuda võiks.

Tehnoloogiaspetsiifilised aspektid

Kütuse kirjeldus. NuScale sõlmis ettevõttega Framatome 2015. a kütuse arendamise ja sertifitseerimise lepingu. Kütuseelementide tehnoloogia hakkab baseeruma nende standardsel, 17x17 paigutusega kooste lahendusel [3], millesse laaditav uraankütuse kogus on ca 3000 kg. Reaktorikütuse asendamine uuega toimub 24 kuu jooksul. NuScale'i kütusevaru lahendus on pärit konventsionaalsest surveveereaktorist, kuid on vaid pool selle tavakõrgusest. Kütusevarud tehakse erisulamist tsirkoonkatttega ning kütusena kasutatakse keraamilisi UO_2 pelleteid [4]. On planeeritud, et Framatomist saab ka hilisem kütuse tarnija [5]. Ettevõtte Lightbridge Corporation and Enfission demonstreeris hiljuti [6], et on arendanud surveveeraktoritele mõeldud

suurendatud õnnetustaluvusega reaktorikütuse tootmistehnoloogia, mida saaks kasutada ka NuScale'i reaktoris.

BWRX-300 reaktori kütusekooste tehnoloogia põhineb GNF2-tehnoloogial, millega laetakse üle 80% töös olevatest keev-veereaktorite reaktorisüdamikest kas osaliselt või täielikult. Kütusevared koosnevad samuti tsirkoonsulamist ümbrisest, mis on täidetud keraamiliste UO_2 pelletitega. Reaktorikütuse asendamine uuega toimub 24 kuu jooksul. Tänapäeval on üle maailma tarnitud juba üle 18 000 GNF2 kütusekooste.

IMSR400 kasutab oma kütusena keemiliselt stabiilset ja inertset kandesooladega segatud vedelat uraanetrafluoriidi (UF_4), millel on head soojuslikud ja radionukliide siduvad omadused. Kuna tegemist on vedelkütuse (sulasoola) reaktoriga, siis puuduvad reaktoril tahkekütuse elemendid. Fluoriidsoolad on keemiliselt stabiilsed, seovad soolaga radioaktiivseid lõhustumisprodukte ja neil on äärmiselt kõrge keemistemperatuur. Kütusesoola segu toimib ka reaktori peamise jahutusvedelikuna. Reaktorikütuse uuendamine toimub koos reaktori asendamisega pärast 7-aastast töötamist. Antud kütusetüüp vajab enne kasutuselevõttu potentsiaalselt mitmeaastast kütusekvalifitseerimist.

Esimene IMSR400 on planeeritud konstrueerida avatud kütusetsükliga ja madala rikastusastmega kütusena, kuna sellist lahendust peetakse lihtsaimaks ja ökonoomseimaks. IMSR400 reaktorikütuse tootmiskulud on eeldatavalt väiksemad tavakütusest. Kütuse tootmine vajab soolade teatud puhtusastme saavutamist standardsete tööstuslike keemiliste meetoditega, olles oluliselt odavam kui traditsiooniline, kõrgetele kvaliteedinõuetele vastava UO_2 kütuse tootmine [1]. Samas on sulasoolreaktorite kommertskogemus vesireaktoritega võrreldes väike, mistõttu leidub selle kütuseliigi tootmise ja tarnimise suhtes palju ebaselgust. Kütusetehnoloogia arendamiseks on IMSR400 arendaja sõlminud kokkulepped ettevõttega BWXT Canada Ltd., kellel on üle 60 aasta pikkune kogemus tuumatehnoloogiate arendamisel. Arendustöö toetamiseks on sõlmitud kokkulepped Karlsruhe asuva Euroopa Komisjoni Teadusuuringute Ühiskeskusega (JRC).

Kiiretel neutronitel töötav reaktor [2] SSR-W on konstrueeritud plutooniumi ja väikeaktiniide sisaldava tuumkütuse põletamiseks. Selle reaktori sulasoolkütus on väga sarnane IMSR400 kütusega, kuid erinevuseks on kütusekooste kasutamine. Kütusetehnoloogia arendaja eeldab, et SSR-W algkütus tuleb olemasolevatest PUREX-tehnoloogiaga ümbertöödeldud kasutatud tuumkütuse varudest, so PuO_2 ja vaesestatud uraantrikloriidi segukütusest. Erinevalt reaktori *NuScale*, *BWRX-300*, ja *IMSR400* uraanikütustest, on *SSR-W* kütus kõrgradioaktiivne enne reaktoris laadimist ning vajab seetõttu tugevat kiirgusvarjestust ja oluliselt erinevaid käitlemisprotseduure. Reaktorikütuse asendamine uuega toimub 12 aasta jooksul. Antud kütusetüüp vajab enne kasutuselevõttu potentsiaalselt mitmeaastast kütusekvalifitseerimist.

Kuna NuScale'i ja BWRX-300 tehnoloogia korral kasutatakse konventsionaalset kütust ja –koosteid, siis tabelites 1 ja 2 esitatud SWOT-analüüs kehtib ka nende tehnoloogiate juures kasutatava kütuse kohta. Tabelis 3 on esitatud SWOT-analüüs IMSR400 ja SSR-W tehnoloogiate juures kasutatavatele kütustele.

Tabel 3. IMSR400 ja SSR-W reaktorite SWOT-analüüs.

Tugevused: • suhteliselt lihtne tehnoloogia sulasoolkütuse tootmiseks; • arenenud tehnoloogia kasutatud tuumkütuse ajutiseks ladustamiseks; • olemasoleva ümbertöödeldud kasutatud kütuse korduskasutamine SSR-W reaktorites	Nõrkused: • HLW jäätmete lõppladustamisega seotud ebaselgus (lõppladustamise koha valik, ehituskulud, tegevuskulud); • Vähenen kogemus sulasooltehnoloogia kasutamise ja kütuse tootmise kohta; • SSR-W reaktorikütuse suured ümbertöötlemiskulud; • tuumarelvade loomiseks potentsiaalselt kasutatava tuumamaterjali kõrgemad levimiskid võrreldes NuScale'i ja BWRX-300 kütustega; • SSR-W korral üsna keeruline ümbertöötlemistehnoloogia; • suhteliselt keeruline kütuse litsentseerimise protsess Pu-kütusega SSR-W korral; • SSR-W korral suurenenud HLW maht suure kütuse läbipõlemise korral.
Võimalused: Kõik tabelis 1 ja 2 toodud võimalused ning lisaks: • sulasoolreaktorite tehnoloogia kiire areng.	Ohud: Kõik tabelis 1 ja 2 toodud võimalused ning lisaks: • sõltuvus SSR-W ümbertöötlemisteenuste pakkujatest (juhul kui ümbertöötlemistehas asub väljaspool Eestit); • Eesti sõltuvus ühest kütuse tarnijast ja tuumajäätmete käitlemise tehnoloogia tarnijast reaktoritehnoloogia aeglase arengu korral.

TARISTU JA KULUMATERJALIDE AHELA ANALÜÜS

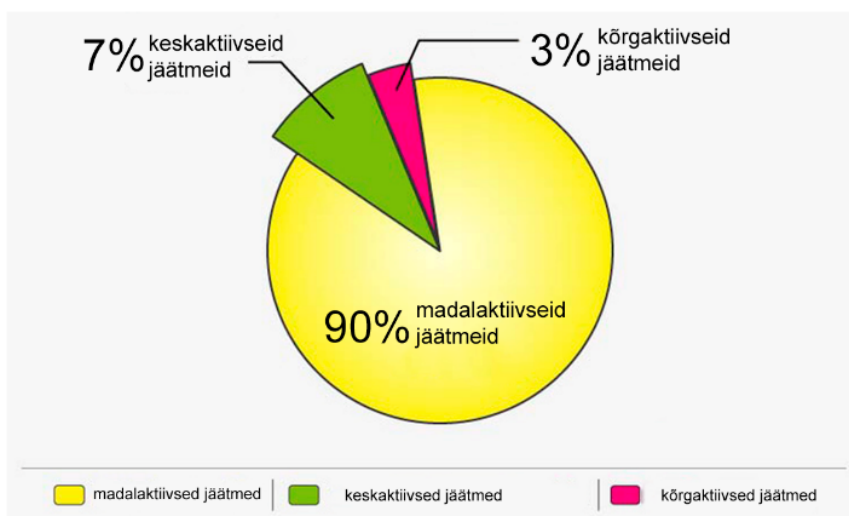
Taristu ja kulumaterjalide ahela lõpposa, e. see osa ahelast mis järgneb tuumaelektrijaamas energia tootmisele, sisaldab ILW ja LLW jäätmete käitlemist ning tuumarajatise dekomisjoneerimist. Terminit dekomisjoneerimine määratletakse kui radioaktiivsusest puhastamist ja tuumaelektrijaama demonteerimist. Dekomisjoneerimine on lõpule viidud pärast saastest puhastamise kontrollimist ja jäätmete eemaldamist. Dekomisjoneerimist viiakse üldjoontes läbi ühel alljärgnevatest viisidest []:

- Kohene demonteerimine: tuumaelektrijaama lõplik demonteerimine võib alata mõne kuu või aasta jooksul. Pärast demonteerimist jaam eemaldatakse kiirgustegevuskontrolli alt ning territoorium lubatakse vabakasutusse.
- Konserveerimine: kiirgustegevuskontroll eemaldatakse ajalise viitega, tavaliselt 40–60 aasta pärast. Tuumarajatise konserveeritakse, lammutamist alustatakse pärast lühiealiste radionukliidide radioaktiivsuse vähenemist. Alternatiivi eelis on oluliselt väiksem kiirgurisk lammutustööliste ja lihtsustatud töövõtted. Selle stsenaariumi puuduseks on aga, et kiirgusohutusnõuded võivad konserveerimisaja jooksul muutuda ning selle kaudu ettearvamatult mõjutada dekomisjoneerimise lõppmaksumust.
- Kapseldamine: lühiealised radioaktiivsed jäätmed konditsioneeritakse ja maetakse koha peal ning kontrollialust territooriumi vähendatakse. Matmiseks ehitatakse näiteks pika kasutuseaga betoonehitis, mille konstruktsioon peaks vastu pidama seni, kuni jäätmete radioaktiivsus on vähenenud ohutule tasemele.

Tuumarajatiste dekomisjoneerimisega on maailmas piisavalt kogemusi. 2016. aasta lõpuks on suletud umbes 115 kommertstuumajaama, 48 eksperimentaalset või prototüüpreaktorit, üle 250 uurimisreaktori ja mitu kütusetsükli rajatist. Vähemalt 17 rajatist on täielikult demonteeritud. Lisaks on tulevastel aastakümnetel oodata globaalset dekomisjoneerimislainet, kuna

suur osa kommertsjaamadest on jõudnud või jõuavad lähiajal oma loomuliku või poliitilise eluea lõpuni. Enamikes riikides vastutab dekomisjoneerimise kulude eest käitaja või omanik, panustades osa elektritootmise tuludest vastavasse fondi. Dekomisjoneerimise rahastamine erineb riigiti. Kasutusel on piiratud kasutusega ettemaksukontod, kokkulepitud protsent elektrimüügituludest või eri tüüpi kogumis- ja kindlustusfondid. Sõltumata rahastussüsteemist peab see tagama dekomisjoneerimiseks vajaliku raha.

Nii jaama normaalse tegevuse kui dekomisjoneerimise käigus tekkinud jäätmete käitlemisel tuleb vahet teha ILW ja LLW jäätmetel. ILW nõuab üldiselt kiirgusvarjestuse kasutamist, kuid eralduv soojus on väike, mida jäätmehooldla konstrueerimisel arvesse võtma ei pea. ILW moodustab tüüpilise surveveereaktori puhul 7% jäätmete kogumahust, kuid sisaldab 4% kogu radioaktiivsusest. ILW-na utiliseeritakse peamiselt kontrollvardad, reaktorite surveanumad ja nende sisekomponendid. LLW moodustab 90% jäätmete kogumahust, kuid sisaldab ainult 1% kogu radioaktiivsusest (vt Joonis 8). LLW koosneb kergelt saastunud esemetest nagu paber, tööriistad, rõivad, filtrid ja muud materjalid, mis on vähesel määral saastunud peamiselt lühiealiste radionukliididega. Tavaliselt ei vaja LLW käitlemisel ja transportimisel erivarjestust. ILW ja LLW jäätmete ladestamiseks ehitatakse pinnalähedased hoidlad, mida eksisteerib maailmas hulgaliselt. Kuigi ka madalaktiivsete jäätmete hoidlad on spetsiaalselt rajatud, ei erine need kuigipalju tavalistest olmejäätmete hoidlatest või prügilatest (vt joonis 9 ja 10). ILW ja LLW jäätmete käitlemiseks on pika aja jooksul hästi väljakujunenud praktika. Tsiiviilotstarbelised jäätmete käitlemise rajatised pole oma enam kui 50 kasutusel olnud aasta jooksul põhjustanud kahju ega keskkonnoahtu. Tabelis 4 on esitatud SWOT-analüüs dekomisjoneerimisele, ning ILW ja LLW jäätmete käitlemisele.



Joonis 8. Eri tasemega radioaktiivsete jäätmete proportsioonid surveveereaktorite korral [1].



Joonis 9. Hollandi radioaktiivsete jäätmete käitleja COVRA Kesk- ja madalradioaktiivsete jäätmete hoidla (välisvaade) [1].



Joonis 10. Hollandi radioaktiivsete jäätmete käitleja COVRA Kesk- ja madalradioaktiivsete jäätmete hoidla (sisevaade) [xxvii].

Tabel 4. Dekomisjoneerimise ning ILW ja LLW jäätmete käitlemise SWOT analüüs

Tugevused: • hästi arenenud tehnoloogia tavapäraste reaktorite dekomisjoneerimiseks; • hästi arenenud tehnoloogia ILW käitlemiseks; • hästi arenenud tehnoloogia LLW käitlemiseks.	Nõrkused: • ILW lõpladustamise asukoha valikuga seotud eba-kindlus; • varases ettevalmistusfaasis väga raske hinnata ILW käitlemise ja ladustamise tegelikke kulusid.
Võimalused • Vahepealsetel aastatel lisandub hulgaliselt uusi dekomisjoneerimise kogemusi; • Tekivad uued ILW käitlustehnoloogiad ja kogemused.	Ohud: • uued ELi piirangud ja ohutusnõuded ILW käitlemisele.

TRANSPORDI ANALÜÜS

Transport on kütusetsükli loomulik osa. Suurem osa transpordist toimub kütuse erinevate töötlusastmete vahel. Kütuse, kasutatud kütuse või ümbertöödeldud kütuse jääkide transport toimub enamasti tahkel kujul, v.a UF₆, mida võidakse transportida ka vedelas olekus. Tavaliselt kasutatakse kütuse, kasutatud kütuse ning radioaktiivsete jäätmete transpordiks olemasolevat infrastruktuuri. Transport peab vastama kindlatele ohutusnõuetele ja on rangelt standardiseeritud [1]. Transport vajab vaid eritranspordivahendid, raudteetranspordi korral spetsiaalseid raudteevaguneid, maanteetranspordi korral spetsiaalseid veoautosid. Õhu-, mere-, raudtee- ja maanteetranspordil kasutatakse spetsiaalseid veokonteinereid (vt jooniseid 11 ja 12). Veose konteiner peab pakkuma vajalikku kiirgusvarjestust ja pidama vastu võimalikele avariilukordadele ning õnnetusjuhtumitele.

Värske kütus ei vaja reeglina transportimisel eraldi kiirgusvarjestust, ka vaatluse all olevate reaktoritehnoloogiate korral. Vaid SSR-W reaktorikütus (mis põhineb juba kasutatud kütusel) vajab transportimisel täiendavat kiirgusvarjestust. Ka kasutatud kütuse transpordi korral on kiirgusvarjestus vajalik.

IMSR400 kütus tarnitakse tahkel kujul eraldi elektrijaama territooriumile, kus see sulatatakse üles ja lisatakse reaktoris [1]. Täpseid transpordinõudeid ei ole tehnoloogia arendaja siiski seni avaldanud. Sama kehtib SSR-W reaktoriarendaja kohta.



Joonis 11. Kasutatud kütuse maanteetranspordi konteinerid [1].



Joonis 12. Kasutatud kütuse raudteetranspordi konteinerid [1].

KOKKUVÕTE

Ülaltoodud analüüsi tulemusel võime Eesti puhul vaadeldavate reaktoritehnoloogiate suhtes teha järgmised järeldused:

- NuScale ja BWRX-300 kütusetehnoloogiad põhinevad konventsionaalsetel, surve- ja keevveereaktorite tehnoloogiatel. Nende tehnoloogiate kasutamisel, sh kütusetsükli ja eri etappide jäätmekäitluse suhtes on pikaajaline kogemus ning tehnoloogia on hästi väl- ja arendatud;
- Sulasoolreaktorid (IMSR400, SSR-TS ja SSR-W) on suure potentsiaaliga, kuid tehnoloogia on arendusjärgus ning napib kasutuskogemust (maailmapraktika piirdub uurimisreaktoritega). Kui IMSR400 reaktori kütusekonfiguratsioon põhineb konventsionaalsel vedelal sulasoola tehnilisel lahendusel, siis SSR-W reaktori kütusekooste on uudne, mille lahenduse suhtes kogemus puudub. Lisaks komplitseerib SSR-W reaktorikütuse kasutamist plutooniumkütus. Ehkki kiirete neutronite reaktoritehnoloogiat on arendatud aastaid ja aja jooksul kasutatud mitmetes riikides, on seda tehnoloogiat kommertskasutuses täna vaid Venemaal (reaktorid BN-600 ja BN-800);
- Kütuse tootmine, tarnimine ja kättesaadavus – uraanil põhineva kütuse tarneahel (uraani kaevandamine, jahvatamine, muundamine, kütuse rikastamine, kütusekoostete tootmine) on hästi väljakujunenud turuga. Kütuse rikastamisega kaasnevad tuumamaterjali leviku ohud, kuid IAEA püüab seda vähendada, luues uraanipanka [xii]. Ka koostete tarne sisaldab teatavat riski, arvestades et kütuse tootmine on üks kolmest tuumaenergia tarnekindluse ja energiajulgeoleku võtmekomponendist. Kuid viimane on suhteliselt

hästi maandatatav valides reaktoritehnoloogia, kus on võimalik valida erinevate kütuse-tootjate vahel.

- Värske ja kasutatud tuumkütuse vedu. NuScale ja BWRX-300 reaktorite värske ja kasutatud tuumkütuse transport on hästi väljakujunenud ja sellega seoses uusi tehnilisi probleeme ette näha ei ole. Sulasoolareaktorite IMSR400 kütuse ja SSR-W plutooniumkütuse transpordi kohta tehnoloogiaarendajad infot avaldanud ei ole.
- Kütuse ladustamine enne kasutamist. Kõigis esitatud reaktorites hoiustatakse kütust tuumaelektrijaama territooriumil ja tehnoloogia tarnijad peavad pakkuma ladustamistehnoloogiat.
- Kütuse ladustamine pärast kasutamist. NuScale ja BWRX-300 reaktorites kasutatakse kahefaasilist ladustamise skeemi: esmalt hoitakse kütust tuumaelektrijaama jahutusbasseinides 3–5 aastat ja hiljem viiakse kasutatud kütus kuivladustamisele. Kui välismaiste ettevõtetega kütuse ladustamise või ümbertöötlemise lepinguid ei sõlmita, peab Eesti tagama, et vastav hoidla loodaks Eesti territooriumile. Sulasoolareaktorite arendajad on nende poolt jagatud info kohaselt nõus enda peale võtma ladustamise ja ümbertöötlemise kohustused. Samas on nende kahe reaktoritehnoloogiaga seotud jäätmekäitluslahendused kõige vähem arenenud ja kõige suurema määramatusega.
- Madala ja keskmise radioaktiivsusega jäätmed. Mistahes reaktorikütuse tehnoloogia ja tarnija korral vastutab iga riik (sh Eesti) radioaktiivsete jäätmete ümbertöötlemise ja käitlemise eest, st. hetkel kehtivate seadusandlike tingimuste kohaselt on vastava hoidla ehitamine vajalik.
- Lõppladestamine. Kuna jäätmete lõppladestamiseni on kaua aega, on võimalus, et Eesti saab vajadusel kasutada rahvusvahelist lõppladestushoidlat. Kui rahvusvaheline lõppladestamine ei ole võimalik, peab Eesti olema valmis ehitama ja käitama lõppladestushoidlat oma territooriumil sarnaselt Soomes ja Rootsis kavandatavale.

2.5 VESINIKU TOOTMINE TUUMAENERGIA ABIL

Rainer Küngas Ph. D

MOTIVATSIOON

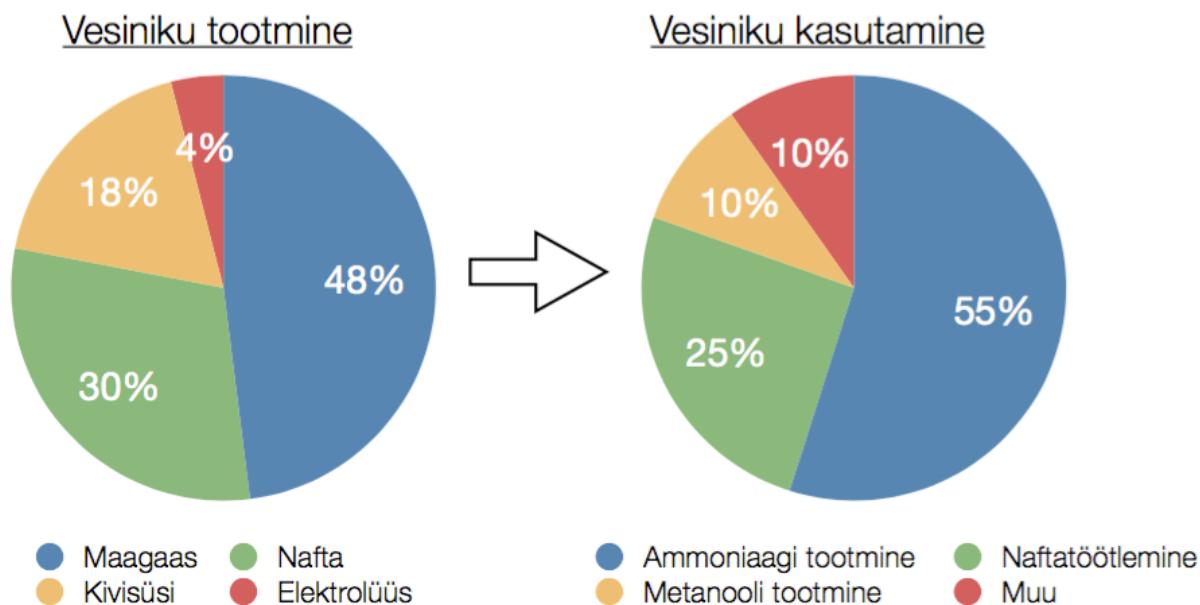
Mida süvemaks muutub kliimakriis, seda karmimad nõuded ja kõrgemad maksud kehtestatakse kõikide majandussektorite CO₂ emissioonidele. Lisaks energeetikasektorile on suurimad kasvuhoonegaaside õhkupaiskajad transpordisektor ja keemiatööstus. Selleks, et CO₂ heitmeid neis sektoreis märkimisväärselt vähendada, tuleb kasutusele võtta tehnoloogiad, mille abil saaks vedelkütuseid ja tööstuskemikaale toota fossiilsete kütuste abita.

Esimeseks sammuks CO₂-neutraalsete kütuste ja kemikaalide tootmisel on vesiniku tootmine. Kliimasõbralikult toodetud vesinikku võib seejärel panna reageerima CO₂-ga, mille tulemusel tekib sünteesigaas (CO + H₂). Sünteesigaas on lähteaineks kõikides suures mahus läbiviidavates keemiatööstusprotsessides (nt ammoniaagi ja metanooli sünteesis), samuti võib sünteesigaasist toota kütuseid, õlisid, vaike ja vedelgaasi. Sellisel teel saadud kemikaalid ja kütused on negatiivse CO₂ emissiooniga, st nende tootmise käigus seotakse süsihappegaasi, mis oleks muidu atmosfääri paisatud.

Käesolev peatükk annab lühiülevaate erinevatest vesiniku tootmise tehnoloogiatest, kus võiks kasutada tuumajaamast pärinevat elektrit ja soojusenergiat.

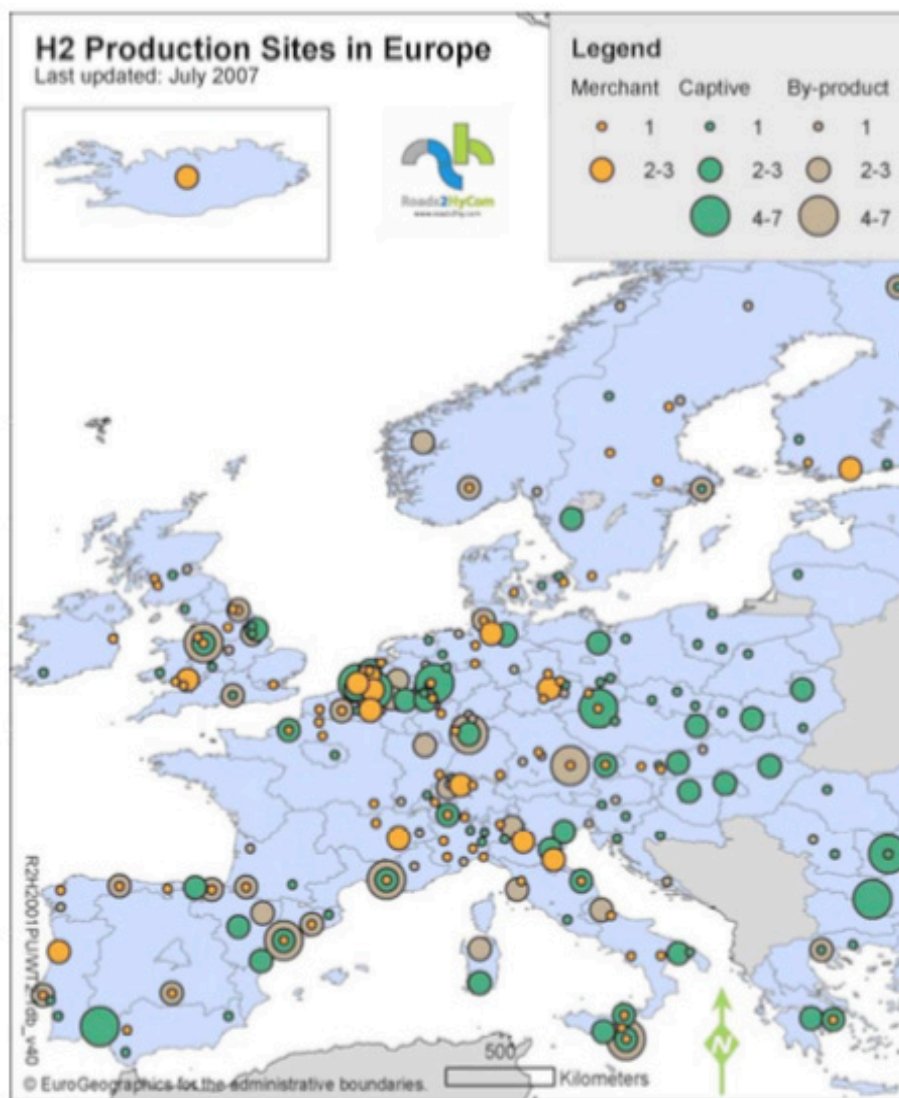
VESINIKU TOOTMINE JA KASUTAMINE

Vesinik (H₂) seostub paljudele vesinikuautode ja teiste tulevikutehnoloogiatega, kuid tegelikult leiab vesinik juba täna väga laialdast kasutust keemiatööstuses. 2006. aastal toodeti globaalselt 53 miljonit tonni vesinikku (IAEA 2013, lk 1) kütteväärtusega 1800 TWh (150 miljonit tonni nafta ekvivalenti). Vesiniku valmistamiseks kulub suurusjärgus 2% kogu maailma energiatarbest. Valdav osa täna kasutusel olevast vesinikust on toodetud fossiilsetest kütustest: maagaasist, naftast ja kivisöest. Hinnanguliselt ainult 4% kogu maailmas toodetud vesinikust on saadud vee elektrolüüsi (vee elektrivoolu abil lõhustamise) teel (joonis 2.1), millest omakorda pool on vesinik, mis tekib klooritootmise kõrvalsaadusena (IAEA 2013, lk 46). Enam kui pool globaalsest vesinikutoodangust kasutatakse ammoniaagi (NH₃) tootmiseks, mida omakorda kasutatakse lämmastikväetiste valmistamiseks. Veerand vesinikutoodangust leiab kasutust naftatööstuses hüdrokrakkimise, hüdrodesulfuriseerimise, hüdrogeenimise jt protsessides. Kümnenndik maailma vesinikust kulub metanooli tootmiseks ja ülejäänud umbes 10% kõikideks muudeks rakendusteks.



Joonis 2.1. Vesiniku tootmine lähteallikate kaupa (vasakul) ja vesiniku kasutamine protsesside kaupa (paremal). 100% = umbes 53 miljonit tonni H₂ (150 miljonit toe, 1800 TWh) (Air Products, 2019).

Vesiniku kokkuseadmine ja transport on väga energiamahukad protsessid, sellepärast toodetakse ja tarbitakse valdav osa maailma vesinikust lokaalselt. Umbes 95% vesinikust ei lahku selle tehase territooriumilt, kus see toodeti, vaid kasutatakse ära kohapeal (ingl k *captive hydrogen*) (Air Products, 2019). Kuigi vesinikuturu koguväärtust hinnatakse 115 miljardile USA dollarile (IEA 2017, lk 7), moodustab avatud turgudel kaubeldava transporditava vesiniku (ingl k *merchant hydrogen*) turg sellest vaid väikese osa. Euroopa suurimad vesinikutootjad on näidatud joonisel 2.2. Muuhulgas on kaardil näha ka **vesinikutehast Porvoos** tootmisvõimsusega 210 000 Nm³ H₂/h (750 MW, HHV), mis kuulub Neste Oil Oy-le. Tehase valmimise ajal 2006. aastal oli see Euroopa suurima tootmisliiniga vesinikujaam, tarnijaks ThyssenKrupp Uhde (ThyssenKrupp, 2012). Tehast laiendati aastal 2016 (GasWorld, 2016). Porvoos toodetud vesinikku kasutatakse bensiini rafineerimiseks ja Neste biodiisli tootmiseks (Barrel Full, 2014).



Joonis 2.2. Euroopa suurimad vesinikutootjad aastal 2007 (CertifHy, 2015). Ringi suurus ei vasta tootmisvõimsusele, vaid näitab vesinikutehaste arvu piirkonnas. Uuemaide kaarte pole koostatud.

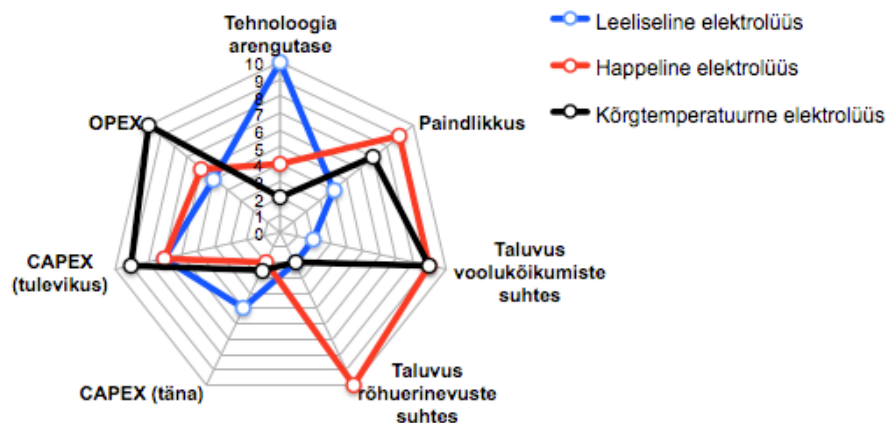
Ülevaade erinevatest vesiniku tootmise meetoditest on toodud tabelis 3.1. Kõige levinum meetod vesiniku tööstuslikuks tootmiseks on **maagaasi aurreformimine** (ingl k *steam methane reforming*). Aurreformimise protsessis reageerib fossiilkütus (nt metaan) kõrgel temperatuuril ja katalüsaatori juuresolekul veeauruga. Reaktsiooni tulemusena tekib segu vesinikust ja vingugaasist ehk sünteesigaas. Sünteesigaasist on võimalik edasise töötlemise teel valmistada metanooli, sünteetilist diislit, vahasid ja paljusid teisi kemikaale. Kui protsessi eesmärgiks on vesiniku tootmine, siis suunatakse sünteesigaas edasi vesigaasi vahetusreaktsiooni (ingl k *water gas shift*) reaktoritesse, kus gaasis leiduv CO reageerib veeauruga, andes iga CO molekuli kohta ühe lisamolekuli H₂, kõrvalsaadusena tekib CO₂. Aurreformimise protsess on väga CO₂-mahukas: iga kilogrammi H₂ (kütteväärtusega 33 kWh, LHV) tootmiseks tuleb õhku paisata 12 kilogrammi CO₂eq jagu kasvuhoonegaase (NREL, 2001, lk 5).

Gasifitseerimine on teine täna laialdaselt kasutusel olev vesiniku tootmise viis. Enamasti kasutavad gasifitseerimisjaamad kütusena kivisütt, ka põlevkiviõli ja –gaasi tootmine on oma olemuselt gasifitseerimisprotsessid. Kivisöel töötavate gasifitseerimisjaamade CO₂ jalajälg on aurreformimisel töötavate jaamade omast veelgi kõrgem. Jalajälge saaks oluliselt vähendada, kui kütusena kasutada biomassi, kuid biomassi gasifitseerimise tehnoloogia on alles arendamisel.

Elektrolüüs on protsess, kus vesi lagundatakse elektrivoolu toimel vesinikuks ja hapnikuks. Elektrolüüsi protsessi kliimasõbralikkus sõltub suurel määral sellest, missugusel teel on toodetud protsessi läbiviimiseks vajalik elekter: kui elekter pärineb madala CO₂ heitmega jaamast (näiteks tuumajaamast), siis on võimalik vesinikku toota nullilähedase CO₂ jalajäljega. Vesiniku tootmiseks sobivad kolm elektrolüüsi-tehnoloogiat: leeliseline elektrolüüs, happeline elektrolüüs ja kõrgtemperatuurine elektrolüüs. Tehnoloogiate kvalitatiivne võrdlus on toodud joonisel 3.1.

Tabel 3.1. Peamiste vesiniku tootmise tehnoloogiate tugevused ja nõrkused (IAEA 2013, lk 2).

Tehnoloogia	Tugevused	Nõrkused
Aurreformimine	Levinud, ennast tõestanud tehnoloogia; Laialdaselt kättesaadavad lähteained; Võimalik suuremahuline CO ₂ püüdmise; Väga sobiv tsentraliseeritud H ₂ tootmiseks	Väikestes jaamades on kasutegur madalam; Väga CO ₂ -mahukas; H ₂ hind tugevas sõltuvuses maagaasi hinnast; Toodetud H ₂ vajab täiendavat puhastamist
Gasifitseerimine	Protsess tuntud ja kasutusel, ka suurtes mahtudes (kivisüsi); Sobib nii vedelike kui tahkete kütuste jaoks; Kütus (kivisüsi) laialdaselt saadaval	Toodetud H ₂ kohta tekib rohkem CO ₂ kui reformimisel; Toodetud H ₂ vajab täiendavat puhastamist; Biomassi gasifitseerimine alles arendamisel
Elektrolüüs	Tuntud ja ennast tõestanud tehnoloogia; Saadav H ₂ on väga puhas; Modulaarne, sobib hajatoomiseks; Väga sobiv taastuenergia kasutamiseks; H ₂ tootmine võimalik ilma CO ₂ heitmeta	H ₂ hind tugevas sõltuvuses elektrihinnast; Madal kasutegur (madaltemperatuurine elektrolüüs); Lühike eluiga (kõrgtemperatuurine elektrolüüs); H ₂ tootmine konkureerib taastuvelektri otsese kasutamisega
Termokeemilised tsüklid	Väiksem või olematu elektrikulu võrreldes elektrolüüsiga; Eeldused suuremahuliseks tootmiseks; H ₂ tootmine võimalik ilma CO ₂ heitmeta; Kasutegur võrreldav elektrolüüsiga	Tehnoloogia alles arendamisel, mitmed protsessi astmed vajavad teaduslikku läbimurret; Põhineb korrosiivsetel ja mürgistel ühenditel; Kõrged kapitalikulud



Joonis 3.1. Vesiniku tootmiseks sobivate elektrolüüsitehnoloogiate võrdlus. Skaala: 0 – arendustee alguses, mittepaindlik, kallis jne tehnoloogia, 10 – tööstuslikult tõestatud, paindlik, odav jne tehnoloogia. Mugandatud raportist (EnergyX 2019, lk 98).

Leeliselises elektrolüüseris lagundatakse vesi vesinikuks ja hapnikuks tugevalt leeliselistes lahustes (tavaliselt 20-40% KOH või NaOH) 60-90°C juures (Kjartansdottir 2014, lk 18). Leeliseline elektrolüüs on vana ja tööstuslikult tõestatud tehnoloogia: esimene sel meetodil põhinev üle 100 MW võimsusega vesinikujaam hakkas tööle 1929. aastal (joonis 3.2). Leeliseliste elektrolüüserite rajamine on võrdlemisi odav (st CAPEX madal), sest seadmes ei kasutata haruldasi või väärismetalle, kuid madala kasuteguri tõttu on OPEX teiste elektrolüüsitehnoloogiatega võrreldes kõrge.



Joonis 3.2. Esimesed tööstuslikud leeliselised elektrolüüserid, mõlemad võimsusega 135 MW. Vasakul – Ryukani elektrolüüsijaam (1929-1970), paremal – Glomfjordi elektrolüüsijaam (1953-1991), mõlemad Norras. Tarnija: Norsk Hydro (praegu NEL Hydrogen) (NEL 2015).

Happelised elektrolüüserid töötavad happelises keskkonnas 50-80°C juures. Happelised elektrolüüserid on võimelised saavutama väga kõrgeid voolutihedusi ja on seega leeliseliste elektrolüüseritega võrreldes kompaktsed. Happeliste seadmete kasutegur on leeliseliste elektrolüüseritega võrreldav, kuid kuna happelised elektrolüüserid töötavad kõrgetel rõhkudel (30 baari), on vesiniku edasiseks komprimeerimiseks vajalik energia oluliselt madalam. Seda tüüpi

elektrolüüserite peamiseks puuduseks on kõrge CAPEX: seadmetes kasutatakse suures koguses plaatina ja iriidiumit, mille hind ja kättesaadavus võib tugevasti ajas muutuda. Isegi, kui kogu maailma aastane iriidiumitoodang kasutada ainult happeliste elektrolüüserite tootmiseks, jätkuks iriidiumit vaid umbes 5 GW elektrolüüsivõimsuse jaoks (vastab 25 protsendile Saksamaa tänasest vesinikutoodangust) (Lettenmeier jt 2018). Suurim happelise elektrolüüsi jaam on täna võimsusega 6 MW (Mission Innovation), kuid järgmisel aastal peaks valmima 20-MW jaam Kanadas (Air Liquide 2019).

Kõrgtemperatuursed elektrolüüserid põhinevad keraamilistel materjalidel ning nende töötemperatuur jääb vahemikku 600-800°C. Eelpool toodud tehnoloogiatega võrreldes on kõrgtemperatuursete elektrolüüserite kasutegur oluliselt kõrgem (madalam OPEX). Teise olulise eelisena saab kõrgtemperatuursetes protsessis ära kasutada tuumareaktorist pärinevat termilist energiat, mille võrra langeb protsessi elektrivajadus umbes 15% võrra (Idaho National Lab, 2012). Võrreldes teiste elektrolüüsitehnoloogiatega on kõrgtemperatuurne elektrolüüs täna kallisk (kõrge CAPEX) ning suurimad rajatud võimsused on suurusjärgu võrra väiksemad kui happelistel elektrolüüseritel. Eestis tegeleb kõrgtemperatuurseks elektrolüüsiks sobivate elementide arendamise ja tootmisega AS Elcogen.

Tabelis 3.2 on ära toodud leeliseliste ja happeliste elektrolüüserite tehnilis-majanduslikud parameetrid aastal 2017 ja hinnangulised väärtused aastaks 2025 (IRENA 2018, lk 20).

Tabel 3.2. Leeliseliste ja happeliste elektrolüüserite tehnilis-majanduslikud parameetrid aastal 2017 ja 2015 (IRENA 2018, lk 20).

Parameeter	ühik	Leeliseline elektrolüüs		Happeline elektrolüüs	
		2017	2025	2017	2025
Kasutegur	kW elektrit / kg H ₂ kohta	51	49	58	52
Kasutegur (LHV)	%	65	68	57	64
Elektrolüüseri eluiga	töötundides	80 000	90 000	40 000	50 000
CAPEX ¹	EUR/kW	750	480	1200	700
OPEX ²	% esialgselt CAPEX-ist aastast	2%	2%	2%	2%
CAPEX: elektrolüüseri vahetus ³	EUR/kW	340	215	420	210
Töörõhk ⁴	baarides	1	15	30	60
Süsteemi eluiga	aastates	20		20	

¹ 20 MW terviksüsteemi maksumus, mis sisaldab vooluallikate ja paigaldamisega seotud kulusid

² 20 MW süsteemi tööshoidmisega seotud kulud

³ Kuna süsteemi eluiga ületab elektrolüüsiseadmete (ingl k *stack*) eluiga, siis tuleb oma eluea lõppu jõudnud elektrolüüsereid perioodiliselt välja vahetada.

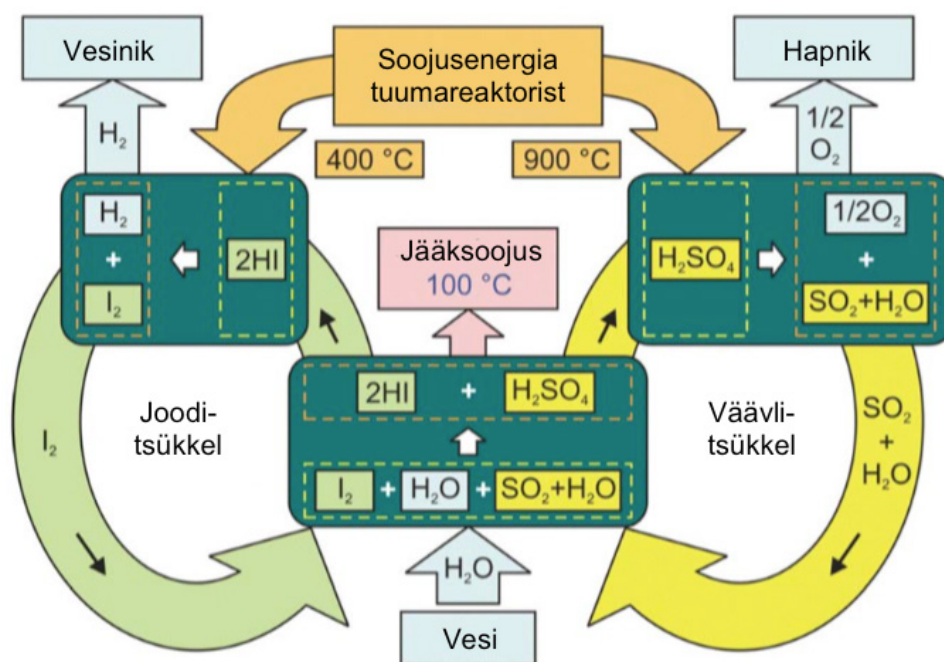
⁴ Mida kõrgem on süsteemi töörõhk, seda vähem lisaenergiat on vaja kulutada vesiniku täiendamaks kokkusurumiseks.

Vesinikku on võimalik toota ka vee termilise lagundamise teel. Vee termiline lagundamine vesinikuks ja hapnikuks on tehnoloogiliselt huvitav juhtudel, kus protsessi läbiviimiseks saab kasutada soojust mõnest kõrgtemperatuursest protsessist, näiteks soojusenergiat tuumareaktorist, ilma seda elektriks muundamata.

Kõige lihtsam viis vesiniku tootmiseks oleks vee otsene lagundamine kõrgel temperatuuril. Paraku on selle protsessi läbiviimiseks vajalik temperatuur (üle 2500°C) praktilisteks rakendusteks liiga kõrge. Vesiniku tootmiseks vajalikku temperatuuri on võimalik alandada, kui protsess läbi viia mitmeastmeliselt nn **termokeemilistes tsüklites**. 1960. ja 1970. aastatel uuriti Itaalias,

Jaapanis ja USA-s vesiniku tootmise eesmärgil sadu erinevaid tsüklilisi protsesse. Kõikidel termokeemilistel tsüklitel on omad puudujäägid, mistõttu pole ühtki neist veel tänase seisuga tööstuslikult rakendatud (IAEA 2013, lk 72)

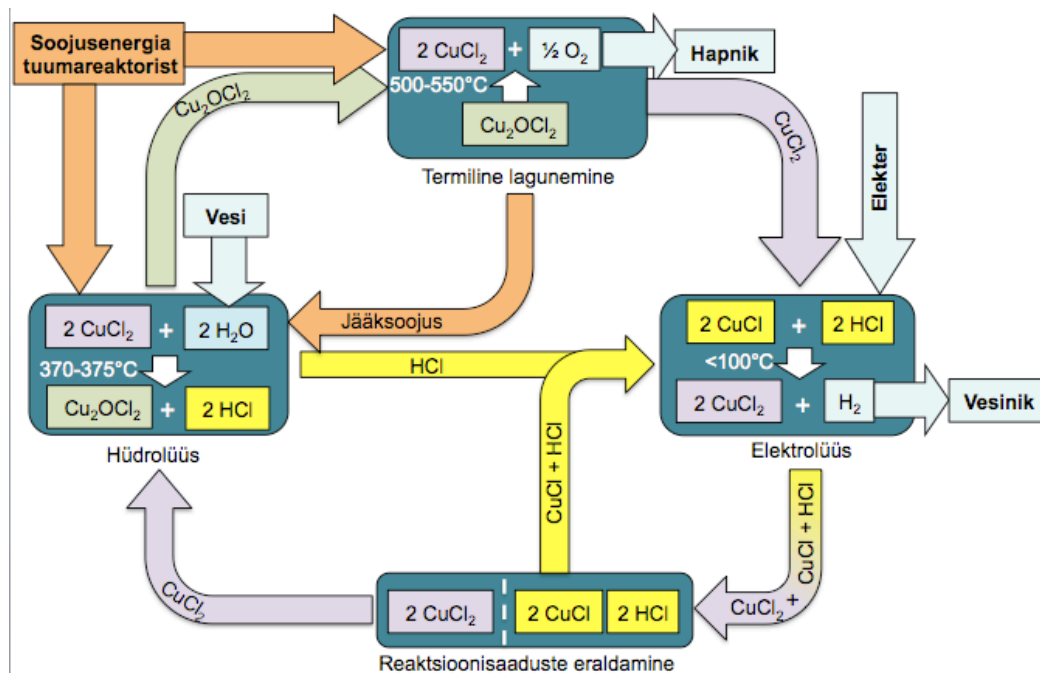
Kõige põhjalikumalt uuritud termokeemiline tsükel on **väävel-joodi tsükel** (joonis 3.3). Tsükli töö põhineb vesinikjodiidhappe (HI) omadusel laguneda 400°C juures vesinikuks ja vabaks joodiks (I_2) ning väävelhappe (H_2SO_4) omadusel laguneda 900°C juures hapnikuks, veeks ja vääveldioksiidiks (SO_2).



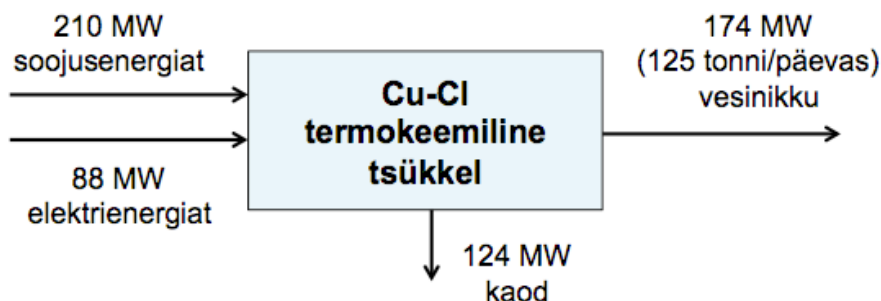
Joonis 3.3. Väävel-joodi termokeemiline tsükel vesiniku tootmiseks.

Väävel-joodi tsükli teoreetiline kasutegur on 51%, kuid reaalne ennustatav kasutegur jääb 30% ja 47% vahele (IAEA 2013, lk 73). Väikeste moodulreaktorite vaatevinklist on väävel-joodi tsükli suurimaks puuduseks väävelhappe lagundamiseks vajalik kõrge temperatuur (900°C). Väävelhappe selle temperatuurini kuumutamiseks ei piisa reaktorist väljuva soojuskandja soojusest, täiendav kuumutamine (nt elektriliselt või põletite abil) vähendab aga oluliselt protsessi kasutegurit.

Moodulreaktorite töötemperatuuriga sobib kõige paremini kokku **vask-kloori tsükel** (joonis 3.4), mille käitamiseks vajalik maksimumtemperatuur jääb 550°C piirisse. Vask-kloori tsükel ei ole rangelt võttes puhtalt termokeemiline tsükel, sest tsükli neljast põhiprotsessist üks on elektrokeemiline (vajab sisendina elektrit, nagu elektrolüüsiki). Argonne'i riikliku uurimislabori hinnangul moodustab tsükli elektritarve umbes 30% protsessi koguenergiatarbest (Ferrandon jt, 2008), vt joonis 3.5.



Joonis 3.4. Vask-kloori termokeemiline tsüklil vesiniku tootmiseks.



Joonis 3.5. Vask-kloori termokeemilise tsükli eeldatav energiavajadus vesiniku tootmiseks mahus 125 tonni (174 MW) päevas (Ferrandon jt, 2008).

Kanada tuumauuringute labor (CNL) on hiljuti demonstreerinud kolme neljast vask-kloori tsüklisse kuuluvast protsessist – elektrolüüsi, termilist lagunemist ja reaktsioonisaaduste eraldamist. Protsesse uuritakse skaalas, mis vastab võimsusele 0,14 kW (50 liitrit vesinikku tunnis). Uurimisprojekti järgmises etapis on plaanis testida tervet tsükli (CNL 2019).

Termokeemiliste tsüklite peamiseks murekohaks on nende madal tehnoloogilise valmiduse tase (TRL). Tsüklite eri osade töötamist on korduvalt demonstreeritud, kuid erinevate protsesside integreerimine pole seni paljulubavaid tulemusi andnud. Kõige suurem väljakutse on tagada, et tsükli eri osades läbi viidavad keemilised ja füüsikalised protsessid toimuksid pöör-

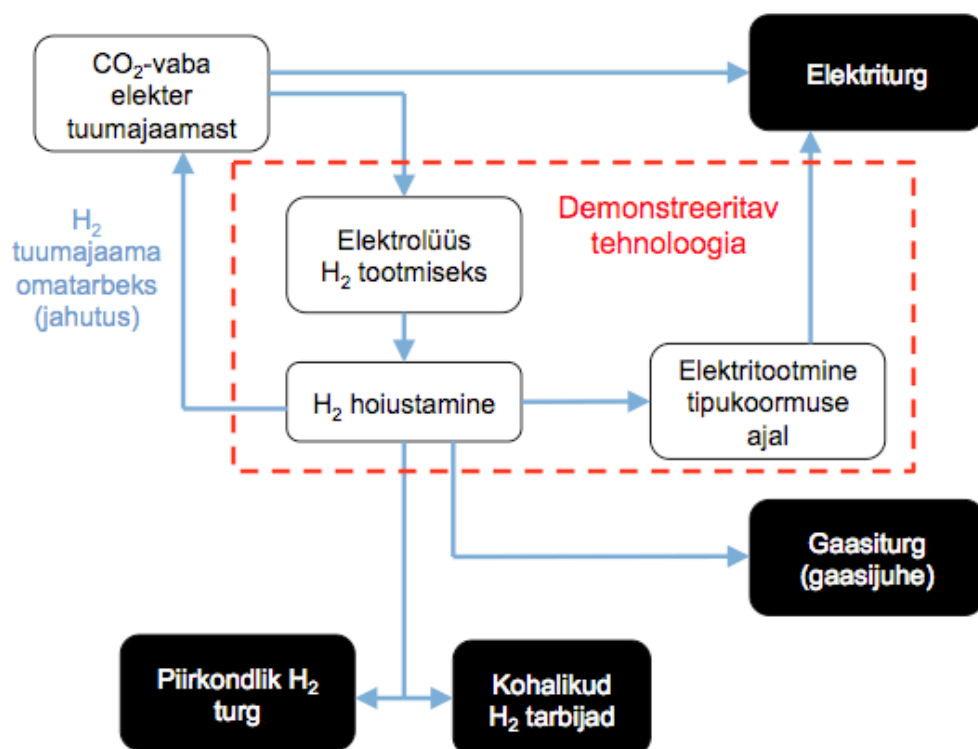
dumatult, ilma kõrvalsaadusi tekitamata. Näiteks vask-kloori tsüklis on probleemiks kloorgaasi tekkimine hüdroliisireaktoris (Ferrandon jt, 2008). Kõrvalsaadused levivad kiiresti tsükli teistesse osadesse ja tekitavad uusi kõrvalsaadusi, kuni lõpuks ei ole protsessi tööhoidmine enam mõttekas.

Termokeemilistes tsüklite teiseks kitsaskohaks on suured massivood. Vesinikujaamas tootmisvõimsusega 174 MW (5 tonni H_2 tunnis) ringleb igas tunnis hinnanguliselt 3100 tonni vett, 1000 tonni $CuCl$, 560 tonni Cu_2OCl_2 , 1000 tonni $CuCl_2 \cdot H_2O$, 42 tonni O_2 ja 6 tonni HCl (Ferrandon jt, 2008).

DEMONSTRATSIOONPROJEKTID

Üheks tõestuseks selle kohta, et vesiniku tootmine tuumaenergia abil on majanduslikult perspektiivikas, on selleteemaliste demonstratsiooniprojektide rohkus. Olgu järgnevalt ära toodud kahe 2019. aastal alanud demo-projekti lühikirjeldused ja loodetavad eesmärgid.

USA suurim tuumaenergia tootja Exelon ja Norra elektrolüüserite valmistaja NEL Hydrogen on sõlminud lepingu 1 MW võimsusega elektrolüüsijaama rajamiseks ja demonstreerimiseks USAs. Kolmeaastase projekti kogumaksumus on 7,2 miljonit USD ja pool rahastusest pärineb USA energiaministeeriumi "H2@Scale" programmist. Lisaks ettevõtetele osalevad projektis ka kolm riiklikku uurimislaborit: Idaho National Lab, NREL ja Argonne National Lab. Projekti eesmärgiks on tuumajaama ja elektrolüüseri omavaheline loimimine terviklikuks vesiniku tootmise süsteemiks. Rajatav elektrolüüser põhineb happelise elektrolüüsi tehnoloogial. Tuumaelektri abil toodetavat vesinikku plaanitakse esmajoones kasutada kohapeal tuumajaama turbiinide jahutamiseks ja reaktori jahutusvee koostise kontrolli all hoidmiseks, kuid pikemas perspektiivis soovitakse hakata gaasi müüma lähedalasuvatele tööstustarbijatele, aga ka laiemale gaasiturule. Projekti lisaeesmärgiks on näidata, et elektrolüüsijaama on võimalik vajaduse tekkimisel kiiresti sisse või välja lülitada (töötada nn dünaamilises režiimis). (Power Magazine 2019).



Joonis 4.1. Exeloni ja NEL Hydrogeni juhitava tuumavesiniku demonstratsioonprojekti skeem.

Suure tuumaenergia portfelliga Ühendkuningriigi energiafirma EDF Energy plaanib “Hydrogen 2 Heysham” projekti raames rajada elektrolüüsi-tehnoloogial põhineva vesinikujaama, mis toodaks vesinikku Heyshami tuumajaamast pärinevast elektrist. Projekti teostatavusanalüüs valmis 2019. aasta septembris ja 2020. aastal plaanitakse alustada elektrolüüsijaama ehitusega. Demonstratsioonprojekti eesmärgiks on muuta tuumajaam kohaliku tähtsusega vesinikukeskuseks. Lisaks EDF-ile osalevad projektis Euroopa Energiauuringute Instituut (EIFER), Lancasteri ülikool ja EDF-i vesinikutehnoloogiatele keskenduv tütarfirma Hynamics. Teostatavusanalüüsi valmimist toetas Ühendkuningriigi äri-, energia- ja tööstusstrateegia-ministeerium (EDF Energy 2019).

LÕPPSÕNA

Vesinik on võtmetähtsusega tooraine kütuste, väetiste, plastide ja teiste laiatarbemikemikaalide valmistamisel. Tavapärased vesiniku tootmise meetodid, nagu metaani aurreformimine ja kivi-söe gasifitseerimine, on küll töökindlad ja odavad, kuid väga CO₂-mahukad (üle 12 kg CO₂-eq iga toodetud kg H₂ kohta). Mida kõrgema tähelepanu alla satuvad keemiatööstuse CO₂ emissioonid ja kõrgemaks muutub CO₂ kvootide hind, seda pakilisemaks muutub tööstuse jaoks küsimus: “Kust saada “rohelist” vesinikku?”. Arvestades 1) Euroopa Liidu süsinikuneutraalsuse eesmärki aastaks 2050, 2) tasuta heitmekvootide lineaarset vähenemist nullini ja sellest tulevalt 3) heitmekvoodi hindade eeldatavat tõusu, muutub aurreformimise teel vesiniku tootmine Euroopa Liidus enam kui kaks korda tänasest kallimaks. Tulevikustsenaariumis, kus CO₂ heitmetele on kehtestatud kõrged maksud, muutub madala CO₂ jalajäljega tehnoloogiate abil toodetud vesinik seega järjest atraktiivsemaks.

Käesolevas peatükis käsitleti kaht võimalikku tehnoloogiat madala CO₂ emissiooniga vesiniku tootmiseks: vee elektrolüüsi ja vee termilist lagundamist. Mõlemad tehnoloogiad on hästi integreeritavad tuumajaama poolt toodetava elektri- ja/või soojusenergiaga, kuid erinevad soojuse ja elektri omavahelise osakaalu poolest (Tabel 4.1). Samuti erinevad tehnoloogiad märgatavalt oma valmiduse taseme ja sellega seondult ka tehnilise määratuse poolest. Täna on kõige madalama tehnilise määratusega meetod CO₂-neutraalse vesiniku valmistamiseks leeliseline elektrolüüs, mida on H₂ tööstuslikuks tootmiseks kasutatud juba 90 aastat ning kus tarnijatel on olemas suurte, üle 100-MW jaamade valmistamise kogemus. Viie aasta perspektiivis võib ka happelise elektrolüüsi tehnoloogia olla piisavalt arenenud, et leeliselisele elektrolüüsile suuremahulistes projektides konkurentsi pakkuda.

Tabel 4.1. Vesiniku tootmise tehnoloogiate omavaheline võrdlus.

Tehnoloogia	Aur-reformimine	Leeliseline elektrolüüs	Happelise elektrolüüs	Kõrgtemp. elektrolüüs	Väävel-joodi tsükl	Vask-kloori tsükl
Sisend	*	100% elekter	100% elekter	85% elekter 15% soojus	100% soojus	30% elekter 70% soojus
TRL**	9	9	8-9	6-7	5	4
Määramatus (põhjendus)	keskmine (CO ₂ maksud)	madal (töökin-del)	keskmine (Iriidium)	kõrge (mas-taap)	kõrge (900°C)	kõrge (mas-taap)

* Aurreformimine on väga suure soojussisendiga protsess. Mitmed riigid on viinud läbi uuringuid aur-reformimise reaktori ja tuumareaktori omavaheliseks integratsiooniks. Aurreformimise ja tuumaenergia kombinatsioon võimaldab vesiniku tootmise CO₂ jalajälge oluliselt vähendada ja vajab lähemat uurimist.

** TRL = tehnoloogilise valmiduse aste (1 – idee, 9 – ennast tõestanud tehnoloogia).

Kõrgtemperatuursete protsesside vaieldamatuks eeliseks on võimalus ära kasutada tuumajaama poolt toodetavat soojusenergiat ilma seda elektri muundamata, samuti märgatavalt kõrgem kasutegur. Kahjuks on kõrgtemperatuursete protsessid alles arendamisel ja suurimad rajatud elektrolüüsivõimsused jäävad täna 1 MW, termokeemiliste tsüklite puhul 1 kW piiresse. Kuigi kõrgtemperatuursete protsesside valdkonnas käib hetkel kiire areng, on nende sobivus H₂ tootmiseks mahtudes üle 20 MW järgmise 5 aasta perspektiivis pigem küsitav.

VIITED

Air Liquide 2019. Air Liquide invests in the world's largest membrane-based electrolyzer to develop its carbon-free hydrogen production <https://en.media.airliquide.com/news/air-liquide-invests-in-the-worlds-largest-membrane-based-electrolyzer-to-develop-its-carbon-free-hydrogen-production-7f65-56033.html>. Külastatud 07.12.2019.

Air Products, 2019. Hydrogen - frequently asked questions. <http://www.airproducts.com/Industries/Energy/Power/Power-Generation/faqs.aspx>

Barrel Full, 2014. Porvoo Refinery. <http://abarrelfull.wikidot.com/porvoo-refinery>

CertifHy, 2015. Overview of the market segmentation for hydrogen across potential customer groups, based on key application areas. https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/project_results_and_deliverables/D%201.2.%20Overview%20of%20the%20market%20segmentation%20for%20hydrogen%20across%20potential%20customer%20groups%20based%20on%20key%20application%20areas.pdf

CNL 2019. A. Vega, Nuclear Hydrogen Economy. Poster, World Nuclear University.

EDF Energy, 2019. Hydrogen plant powered by low-carbon, low-cost electricity from nuclear power station, <https://www.edfenergy.com/energy/nuclear-new-build-projects/sizewell-c/news-views/low-carbon-hydrogen-produced-nuclear-plant>

3. OSA

VÄIKSE MOODULREAKTORI PROGRAMMIKS VAJALIKUD VÕIMEKUSED JA TEGEVUSED

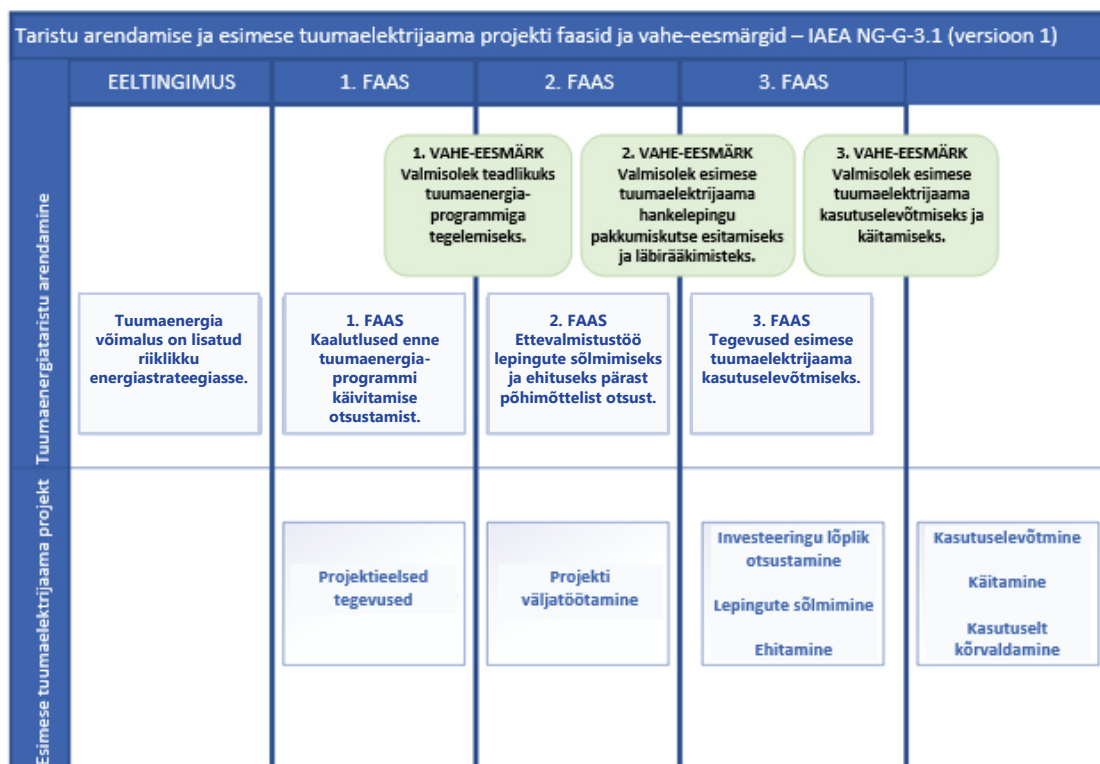
SISSEJUHATUS

Selles dokumendis on esitatud kaks peatükki (3.1 ja 3.2 peatükk), mis on mõeldud lisamiseks uuringusse „*Väikeste moodulreaktorite sobivus Eesti 2030+ elektrivarustuskindluse ja kliimapolitiika eesmärkidega*“. Töö põhineb Fortum Power and Heat Oy ja Fermi Energia OÜ vahel 2019. aasta mais sõlmitud lepingul (Fortumi ettepanek QUO-005890-00, versioon 2, mille Fermi Energia OÜ allkirjastas 08.05.2019).

3.1 VÄIKESTE MOODULREAKTORITE RAKENDUSPROGRAMMI VAHE-EESMÄRGID

Rahvusvaheline Aatomienergiaagentuur (IAEA) on välja töötanud vahe-eesmärkide saavutamise tegevuskava uute tuumaenergiariikide toetamiseks nende tuumaenergiaprogrammiks vajaliku taristu arendamisel./1/ Vahe-eesmärkide saavutamise tegevuskava koos selle faaside ja asjakohaste vahe-eesmärkidega on esitatud joonisel 1. Vahe-eesmärkide saavutamise tegevuskava koosneb kolmest faasist ja selles eristatakse taristu arendamist ja esimese tuumaelektrijaama projekti. Tegevuskavas määratletakse nende kahe spetsiifilise aspekti ühised vahe-eesmärgid.

IAEA vahe-eesmärkide saavutamise tegevuskava on rahvusvaheliselt hästituntud ja seda võib Eestis asjakohasel määral kindlalt soovitada ka väikeste moodulreaktorite jaoks, ehkki algselt on see välja töötatud suurte reaktorite arendamiseks.



Joonis 1. Taristu arendamise ja esimese tuumaelektrijaama projekti faasid ja vahe-eesmärgid /1/

IAEA vahe-eesmärkide saavutamise tegevuskavas on tuumaenergiaprogrammi arendamiseks kindlaks määratud kolm põhiorganisatsiooni, kellega on arvestatud: valitsus / tuumaenergiaprogrammi rakendusorganisatsioon (NEPIO), omanik/käitaja ja regulatiivorgan. NEPIO ja omaniku/käitaja rolle ja vastutust on käsitletud allpool.

Lähtuda tuleb sellest, et NEPIO on valitsuse seadusjärgsest vastutusest ja kohustusest tulenevalt rohkem keskendunud taristu arendamisele ja tuumaenergiaprogrammi üldisele koordineerimisele. Omaniku/käitaja eesmärk ja vastutus on aga rohkem seotud esimese tuumaelektrijaama projektiga.

IAEA on NEPIO määratlenud valitsusüksusena, kellel tuleb 1. faasis kokku koguda vajalik teave ja koordineerida uuringuid, mida riigil on vaja tuumaenergiaprogrammi käivitamise otsuse tegemiseks. NEPIO on tuumaenergiaprogrammi raames riikliku taristu arendamist koordineeriv organisatsioon. NEPIO töö korraldamiseks on palju erinevaid viise, alates suurest valitsusorganisatsioonist, mis teeb suurema osa uuringuid iseseisvalt, kuni muude (juba olemasolevate) valitsus- ja eraorganisatsioonide tegevust kontrolliva ja koordineeriva komiteeni.

Näiteks võib NEPIO-ks pidada Soomes 1960. ja 1970. aastate tuumaenergia nõuandekomiteed (Ato-mienergianeuvottelukunta, alates 1988. a Ydinenergianeuvottelukunta). Ydinenergianeuvottelukunta töötas kaubandus- ja tööstusministeeriumi juures.

Araabia Ühendemiraatides oli nii projekti omaniku kui ka NEPIO roll avalik-õiguslikul organisatsioonil Emiraatide tuumaenergia ühendus (ENEC, Emirates Nuclear Energy Corporation) /6/. Muud näited NEPIO-de kohta on esitatud näiteks IAEA väljaandes /8/.

Eesti tööstussektoris on juba praegu olemas tugev liikumapanev jõud (Fermi Energia OÜ), mis võiks tuumaenergiaprogrammi väljatöötamise algfaasis olla omaniku/käitaja rollis. Soome näite põhjal

võiks Eestis NEPIO-ks olla asjakohase ministeeriumi või valitsuse otseses alluvuses töötav väike riiklik töörühm või komitee.

Vahe-eesmärkide saavutamise tegevuskavas antakse ülevaade ka 19 taristuteemast (esitatud tabelis 1), mida tuleb tuumaenergia rakendusprogrammis käsitleda. Ehkki suure tuumaelektrijaama kasutuselevõtmine on teistsugune kui väikese moodulreaktori korral, tuleb kõiki taristuteemasid teatud määral käsitleda ka seoses väikese moodulreaktoriga.

Tabel 1. 19 taristuteemat /1/ kohaselt

Riigi seisukoht	Sidusrühmade kaasamine
Tuumaohutus	Asukoht ja tugirajatised
Juhtimine	Keskkonnahoid
Rahastamine ja investeringud	Ohuolukorra tegevusplaan
Õigusraamistik	Tuumajulgeolek
Kaitsemeetmed	Tuumakütuse tsükkel
Normide raamistik	Radioaktiivsete jäätmete käitlemine
Kiirguskaitse	Tööstuse kaasamine
Elektrivõrk	Hanked
Inimressursside arendamine	

Väikeste moodulreaktorite korral on soovitatav teema käsitlemise põhjalikkus ja detailsus kohandada teema olulisusega, s.t väikeste moodulreaktoritega seotud olulistele teemadele keskendutakse rohkem ja vähem asjakohaseid teemasid käsitletakse vaid põgusalt.

Väikeste moodulreaktorite tehnoloogia rakendamisel saab vahe-eesmärkide saavutamise tegevuskavas teha järgmisi kasulikke lihtsustusi.

- Suurte tuumaelektrijaamadega võrreldes tekib suurim kulusääst väikeste moodulreaktorite standardimisest. Seega tuleb standardimise maksimaalseks rakendamiseks ning kulude ja projekti riskide vähendamiseks konstruktsiooni muuta nii vähe kui võimalik. See võib vähendada algse investeringu ja investeringutasuvuse vahelise kriitilise nn surmaoru kestust.
- Väikeste moodulreaktorite litsentsimine võib põhineda rahvusvaheliselt tunnustatud regulatiivorganite eelneval heakskiidul ja koostööl asjakohase organisatsiooniga. Enamasti saavutatakse moodulkonstruktsiooni rakendamise ja standardimise tulemusena olukord, kus riigi regulatiivorgan kiidab väikeste moodulreaktorite tehnoloogia ühel korral heaks ja seejärel (eriti, kui asukoht on sama) saab moodulite arvu suurendada palju lihtsama litsentsimisega.
- Väikeses riigis (nt Soome või Eesti) oleks mõistlik kaaluda, millised pädevused tuleb luua riigis endas, kui palju saab toetuda välismaistele eraorganisatsioonidele ja kui ulatuslikult saab arendada asjakohast koostööd. Standarditud tuumaelektrijaama tarnija saab osutada palju suuremal määral tehnilist tuge ning isegi toetada käitust ja hooldust. Siiski on regulatiivorganitel ja omanikel/käitajatel konkreetsete teadmiste sisseostul nii häid kui ka halbu kogemusi. Mõnel juhul on olnud võimalik luua omaniku/käitaja ühisettevõtte, millesse on kaasatud ka elektrijaama tarnija, kes tagab suutlikkuse ja pädevuse. Vajaliku pädevuse tagamiseks omanikeringi kaasata ka olemasolevaid tuumaelektrijaamu.

Valitsuse seisukoht väikeste moodulreaktorite arendamisvõimaluse kohta

IAEA vahe-eesmärkide saavutamise tegevuskava määratleb riigi seisukoha esimese taristuteema 19-st. Tuumaenergia valdkond on rangelt reguleeritud ja selle jaoks on vaja eraldi taristut, mistõttu on selle rakendamise peamiseks eeltingimusteks laialdane poliitiline ja ühiskondlik tugi, aga ka valitsuse selge heakskiit. Valitsuse heakskiit peab hõlmama kõige kõrgema valitsustaseme selget seisukohta kavatsuse kohta koos asjakohaste kohustuste võtmisega ja riikliku taristu arendamise käivitamiseks vajaliku rahastuse tagamisega.

Tuumaenergiat peetakse sageli lahkarvamusi põhjustavaks energiatootmise viisiks. Seetõttu võib tunduda, et uutes tuumaenergiariikides (nt Eesti) on laialdase ühiskondliku ja poliitilise toetuse saamine keeruline. Hiljutised kliimamuutused ja energiatootmise CO₂-heite vähendamise kiire vajadus on siiski oluliselt mõjutanud avalikku arutelu tuumaenergia teemadel.

Näiteks on IPCC 2018. a aruanne /2/ üsna otsene hoiatus CO₂-heite vähendamise ebaõnnestumise tagajärgede eest. Eri osalejad on seda käsitlenud erineval viisil. Euroopa Komisjon on kavandanud mitmeid võimalusi energiapoliitikaga edasiminekuks, kuid viimatises pikaajalises energiapoliitika visioonis on selgelt sõnastatud, et tuumaenergia koos järjest suureneva taastuvenergia kasutusega jääb energiasüsteemi selgrooks.

Mitmed viimasel ajal tehtud uuringuid käsitlevad tuumaenergia (eelkõige väikeste moodulreaktorite) võimalusi energiatootmise CO₂-heite vähendamiseks. MIT-i raport tuumaenergia tuleviku kohta /3/ annab nii reaktorite tarnijatele kui ka valitsustele selged soovituselised muutuste kohta, mida on tuumatööstusel vaja tuumaenergia CO₂-heite vähendamiseks. Raportis käsitletud tehnilis-majanduslike probleemide lahendamisel on väikesed moodulreaktorid väga paljutootavad. Paljud riigid on uurinud väikeste moodulreaktorite võimalusi riiklike energiasüsteemide CO₂-heite vähendamiseks mõistliku kulutasemega. Esialgsed tulemused on olnud paljulubavad. Sellised riigid on näiteks Ühendkuningriik (TEA aruanded /4/) ja Soome (VTT uuringud kaugkütte kohta /5/).

Vahe-eesmärkide saavutamise tegevuskava 1. faasis on enamasti vaja teha mitmesuguseid uuringuid. Neid teevad nii NEPIO kui ka omanik/käitaja (kui omanik/käitaja on 1. faasis juba olemas). Kõik need uuringud peaksid valitsusele andma seisukohavõtuks vajalikud andmed (nt riiklik energiastrateegia ja kas lisada sellesse tuumaenergia, Eesti korral väikesed moodulreaktorid).

Selles kontekstis tuleb valitsusel selgelt eristada järgmist:

- riigi seisukohana käsitletav üldine seisukoht tuumaenergiaprogrammi käivitamise kohta vahe-eesmärkide saavutamise tegevuskava 1. vahe-eesmärgi kohaselt
- iga konkreetse tuumaelektrijaama rakendusprojekti kohta otsuse tegemine või projekti heakskiitmine.

Esimese projekti kaalumise ajal võivad need seisukohad olla uue tuumaenergiariigi jaoks rohkem omavahel seotud (mõtteliselt ja poliitiliselt), ehkki enamasti teeb valitsus selge otsuse konkreetse projekti kohta hiljem. Riigi õigusaktidest olenevalt tuleb valitsusel 2. faasi lõpuks teha siduv otsus, kas lubada omanikul/käitajal jätkata konkreetse tuumaelektrijaamaga (anda nn poliitiline roheline tuli) või mitte. Seega peab omanikul/käitajal pärast seda otsust olema poliitiliste riskide vähendamiseks õigusraamistik, mis võimaldab projektiga jätkata olenemata valimistulemustest ja muudest poliitilistest aruteludest. Järelikult eeldab selline poliitiline otsus

praktikas, et riigil on koostatud ja jõustatud tuumaenergiat käsitlevad õigusaktid ning määratletud ka kohaldamisulatus.

Pärast poliitilist otsust tuleb järgnevate litsentsimisetappide käigus keskenduda üksnes sellele, kas poliitilises otsuses sisalduvad võimalikud spetsiifilised ja selgelt määratletud tingimused on täidetud, ja kas tuumaohutust saab tagada. Seejärel otsustab regulatiivorgan tuumaohutuse üle eelnevalt koostatud normdokumentide ja juhiste kohaselt ilma mistahes poliitilise sekkumiseta.

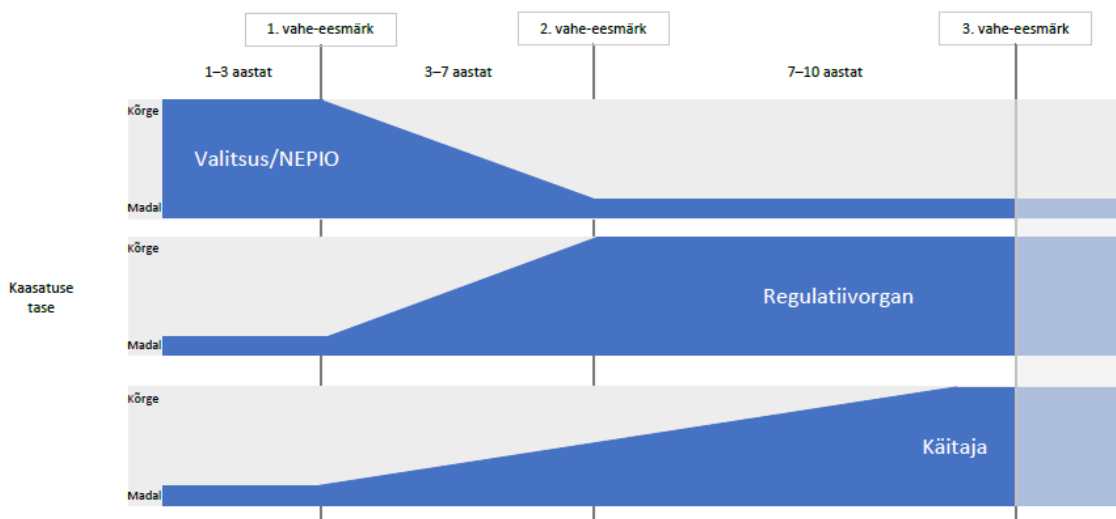
Võrdluseks: Soome valitsus rakendab tuumaenergiat käsitlevatest õigusaktidest tulenevalt iga üksiku tuumarajatise projekti kohta nn põhimõttelise otsuse põhimõtet, ehkki tuumaenergia on olnud Soomes heakskiidetud energiavalik juba alates 1970. aastatest. Seega võib Soomes põhimõttelise otsuse põhimõtet käsitleda iga uue tuumarajatise projekti „poliitilise litsentsina“.

Soomes teeb valitsus projekti kohta põhimõttelise otsuse üldise ühiskonnakasulikkuse põhjal. Põhimõttelise otsuse taotluses ei pea reaktori tehnoloogia ja tuumaelektrijaama asukoht olema täpselt määratud – esitada võib piiratud hulgal variante. Põhimõttelise otsuse eeltingimusteks on kiirgus- ja tuumaohutusameti (Säteilyturvakeskus) positiivne otsus tuumaohutuse kohta, majandus- ja tööministeeriumi positiivne otsus keskkonnamõju kohta, kuid ka võimalike asukohtade omavalitsuste positiivsed otsused vastavate plaanide kohta.

Vastutuse jaotumine väikeste moodulreaktorite programmis

IAEA dokumendid /8/, /10/ ja /11/ keskenduvad kolmele põhiorganisatsioonile ja kirjeldavad tüüpilist vastutuse jaotumist NEPIO, omaniku/käitaja ja regulatiivorgani vahel.

Igal organisatsioonil on oma spetsiifiline roll. Programmi käigus muutuvad organisatsioonide kaasatuse tasemed, rollid ja vastutused. Joonisel 2 on esitatud vahe-eesmärkide saavutamise tegevuskava kontekstis NEPIO, omaniku/käitaja ja regulatiivorgani iseloomulikud kaasatuse tasemed protsessi erinevates faasides. Rollide ja vastutuste jaotus NEPIO ja omaniku/käitaja vahel võib igal konkreetsel juhul riigiti erineda. Näiteks on võimalik, et edaspidi omaniku/käitajana jätkav eraettevõtte luuakse juba päris alguses. Sellisel juhul peab tulevane omanik/käitaja varuma algfaasis rohkem ressursse, et NEPIO-l oleks rohkem vahendeid IAEA vahe-eesmärkide saavutamise tegevuskavas määratletud taristuteemade arendamiseks. Isegi siis, kui vastutuste täpne jaotus võib muutuda, on oluline, et kõik 19 taristuteemat saavad vajalikul määral käsitletud.



Joonis 2. Uue tuumaenergiariigi põhiorganisatsioonide iseloomulikud kaasatuse tasemed ja ressursside jaotus suure tuumaelektrijaama korral /12/

Enamasti on iseloomulik, et NEPIO vastutab taristu arendamise üldise koordineerimise eest ja tagab kõigi oluliste osapoolte kaasamise varajases faasis. Paljudel juhtudel juhib alustavas tuumaenergiariigis tuumaenergiaprogrammi päris selle alguses peaaegu täielikult NEPIO ning regulatiivorgan ja omanik/käitaja moodustatakse või määratakse hiljem (nt 2. faasi alguses). Sellegipoolest on 1. faasis oluline, et valitsus eraldaks NEPIO-le piisavalt vahendeid selle rollist ning riigi ja taristu seisukorrast tulenevalt.

Regulatiivorgan tuleb moodustada ja tuumaenergiat käsitlevad riigi õigusaktid tuleb jõustada hiljemalt 2. faasis. Regulatiivorgani peamine vastutus 2. faasis on riigi õigusraamistiku määramine. Väikeste moodulreaktorite korral, kus arengu peamine vedur on standardimine, on kõige paljutöotavam/soovitavam võimalus rahvusvahelise hea tava ja päritoluriigi normdokumentide arvestamine. Tagada tuleb riikliku regulatiivorgani läbipaistvus ja sõltumatus omanikust/käitajast. Riigi õigusaktide alusel moodustatud ja volitatud regulatiivorgan vastutab projekti järelevalve eest riigis kehtivate õigusaktide kohaselt ning pädevate ja sõltumatute õiguslike otsuste tegemise eest.

Omanik/käitaja vastutab tegeliku tuumaelektrijaama projekti ettevalmistamise eest. Omanik/käitaja vastutab tehnoloogia valimise, hangete ettevalmistamise ja pakkumuste hindamise eest (võistupakkumise korral), lepinguläbirääkimiste ja tuumaelektrijaama projekti juhtimise eest, sh ehitamiseks ja käitamiseks vajalike litsentside taotlemise eest /13/. Omanik/käitaja peab oma tegevuses lähtuma nn teadliku tellija põhimõttest ja arendama suutlikkust tuumaelektrijaama käituse ja ohutuse eest üldvastutuse ülevõtmiseks.

Eesti ja väikeste moodulreaktorite korral võib olukord olla veidi teistsugune, sest tööstussektoris on juba praegu olemas liikumapanev jõud (Fermi Energia OÜ), mis päris algfaasis võiks olla võimaliku tulevase omaniku/käitaja rollis.

Väikeste moodulreaktorite oluline erinevus suurtest kergveereaktoritest on, et kasutusel ei ole veel ühtki sarnast elektrijaama (vähemalt mitte Eestis hetkel arutelul osalevate võimalike kandidaatide seas) ja selliseid ei ole isegi veel ehitamisel. Seetõttu tuleb suurt rõhku panna eri riikide väikeste moodulreaktorite tehnoloogia- ja äriarengute ning litsentsimise jälgimisele ja

mõistmisele. Loomulikult peab juhtiv roll selles tegevuses olema tulevasel omanikul/käitajal, isegi siis, kui neid arenguid jälgivad ka NEPIO ja regulatiivorgan.

Peale mitmesuguste energianõudlus- ja tarnestsenaariumide analüüsi ja plaanimise võib algetapil NEPIO üheks olulisemaks tegevuseks pidada inimressursside süstemaatilist arendamist riikliku tuumaenergiataristu jaoks ja tuumaenergiat käsitleva õigusraamistiku väljatöötamist.

1. faasis on üks olulisemaid ülesandeid vajalike uuringute tegemine tabelis 1 esitatud teemadel. NEPIO peab olema omaniku/käitaja ja muude sidusrühmade ressursside ja oskusteabe kasutamist koordineerivas rollis.

Üks spetsiifiline valdkond on tuumaenergiat käsitlevate riigi õigusaktide koostamise ja avaldamise ettevalmistamine. Need õigusaktid peavad hõlmama vähemalt rahvusvaheliste lepingute rakendamise meetodeid riigi õigusaktides, litsentsimise sisseseadmist, regulatiivorgani moodustamist ning litsentsitaotlejate ja -omanike tuumaohutuse, tuumajulgeoleku ja kaitsemeetmete vastutuse määramist.

Näiteks Soomes käsitlevad tuumaenergiat mitme eri taseme normdokumendid, sh tuumaenergiaseadus (990/1987) ja kiirgusseadus (859/2018), mida täiendavad tuumaenergiamäärus (161/1988) ja tuumaenergia kasutamist reguleerivad kiirgus- ja tuumaohutusameti määrused (endised valitsuse määrused).

Samuti tuleb määrata tuumakahjustustega seotud vastutus ja tuumkütuse elutsüklil, sh tuumajäätmete käitlemise strateegiad, rahastamismehhanismid ja vastutus. Need tuleb tuumaenergiat käsitlevates õigusaktides varakult ja läbipaistvalt kindlaks määrata.

Tuumaenergiaseaduse (990/1987) kohaselt tuleb Soomes tuumaenergia kasutamisel või kasutamise tulemusel tekkinud tuumajäätmed käidelda, ladustada ja lõplikult kasutuselt kõrvaldada Soomes.

Seetõttu moodustati Soomes tuumajäätmete käitlemise kulude katmiseks 1988. aastal tuumaenergiaseaduse (990/1987) alusel riiklik tuumajäätmete käitlemise fond. Selle fondi eesmärk on tuumajäätmete tulevaseks käitlemiseks vajaliku raha kogumine, hoiustamine ja usaldusväärne investeerimine. Fond annab ühiskonnale finantstagatise tuumajäätmete käitlemise korraldamiseks mistahes olukorras. Fondi ei rahastata riigieelarvest ning see tegutseb majandus- ja tööministeeriumi haldusalas. Fondi kapital koosneb jäätmekäitluskohustusega käitajate iga-aastastest maksetest ja fondi tuludest. Majandus- ja tööministeerium määrab summa, mis tuleb fondile igal aastal maksta, tagamaks fondi suutlikkus rahastada kõiki rakendatavaid tuumajäätmete käitlemise meetmeid.

1. ja 2. faasis tuleb omanikul/käitajal ette valmistada väikeste moodulreaktorite kasutuselevõtmisega seotud tehnilised ja rahalised aspektid. See hõlmab näiteks teadmiste kogumist tuumaohutuse, tuumajulgeoleku ja kaitsemeetmete, riiklikku energiatestide ja energiatarnesüsteemidesse töökindlalt sobivate erinevate elektrijaamakontseptsioonide, eri tüüpi elektrijaamade elutsüklilude, energiaturgude ning mitmesuguste rahastamis- ja lepingumudelite kohta. Omanikul/käitajal tuleb ka sõlmida rahastamislepingud ja elektrijaama tarnelepingud ning võtta vastutus elektrijaama käitamise eest.

Võrdluseks: Soomes moodustati 1955. aastal riiklik energiakomitee (Energiakomitea) /14/, /15/. Hiljem nimetati energiakomitee ümber tuumaenergia nõuandekomiteeks. Energiakomitee, mida võib pidada selle aja NEPIO-ks, alustas Soomes tuumaenergia kasutamise konkurentsivõimelisuse ja teostatavuse hindamist. USA-st osteti General Atomicsi Triga 2-tüüpi

uurimisreaktor ja see käivitati 1962. aastal Espoos. Peamine vastutus tuumaenergiaprogrammi edendamise eest läks 1960. aastatel üle energiaettevõtetele Imatran Voima Oy (IVO, Fortumi eelkäija) ja Teollisuuden Voima Oy (TVO). IVO algatas 1961. aastal võistupakkumise, mis pärast mitmelt lääneriikide reaktoritarnijalt pakkumuste saamist siiski tühistati. Esimesed reaktorid (Loviisa 1 ja 2) telliti Nõukogude Liidust. Seetõttu oli IVO-l riigile kuuluva ettevõtteks väga oluline roll programmi varajastes faasides. Kiirgusenergia kasutamise järelevalveks moodustati 1958. aastal Soomes regulatiivorgan, mis esmalt kandis kiirgusfüüsika ameti nimetust. 1968. aastal lisandus tuumaohutuse järelevalve ülesanne, nimetuseks sai tuumaohutuse amet ning sõltumatus tagamiseks see viidi üle sotsiaal- ja tervishoiuministeeriumi haldusalasse. 1984. aastal nimetati see kiirgus- ja tuumaohutusametiks (Säteilyturvakeskus).

Selles aruandes eeldatakse, et omanik ja käitaja on sama ettevõtte. See on kõige laiemalt levinud variant. Siiski on olemas ka mõned näited, kus tuumaelektrijaama käitaja ja omanik on erinevad juriidilised isikud. Sellisel juhul on käitaja litsentsisaaja (käitamislitsentsi hoidja) ja vastutab täielikult elektrijaama ohutuse eest. Selline korraldus on näiteks Araabia Ühendemiraatides, kus käitaja (käitamislitsentsi taotleja) NAWAH-i kaasomanikeks on Barakahi tuumaelektrijaama omanik ENEC ja Barakahi elektrijaama tarnija Korea elektrienergiaettevõtte KEPCO. Sellise korralduse võimalik eelis on, et välispartneri lai kogemustepagas on uuele tuumaenergiariigile paremini kättesaadav.

Vajaliku pädevuse ja suutlikkuse arendamine ja ajastamine

Inimressursside arendamine on üks IAEA vahe-eesmärkide saavutamise tegevuskava 19 taristuteemast. Inimressursside arendamist võib pidada uue tuumaenergiariigi (nt Eesti) üheks kõige olulisemaks ülesandeks, sest see mõjutab märkimisväärselt riigi tuumaenergiaprogrammi kõiki olulisi osalisi.

Hea ülevaade vajaliku tööjõu plaanimisest ja pädevuse arendamisest on esitatud IAEA dokumendis NG-T-3.10. /7/.

1. FAAS.

Kaalutlused enne tuumaenergiaprogrammi käivitamise otsustamist

Vajalik pädevus ja selle arendamise ambitsioonide tase sõltub plaanitava tuumaenergiaprogrammi ulatusest, laadist ja omaniku/käitaja plaanitud rollist. On väga tõenäoline, et vähemalt riigi esimesed tuumaseadmed võetakse kasutusele täisvalmis tuumarajatise lepinguga. Isegi sellisel juhul peab omanik/käitaja olema valmis nn teadliku tellija rolli täitmiseks. Muud riiklikud sidusrühmad peavad selle toetamiseks täitma asjakohaseid tugirolle ja tagama vajaliku riikliku taristu.

Eri sidusrühmade pädevuse ja tööjõu plaanamise käivitamiseks peavad kõikide sidusorganisatsioonide rollid, vastutused ja funktsioonid olema selgelt kindlaks määratud. Seejärel saab kindlaks määrata tööjõu plaanimisega seotud põhitegevused ja iga tegevuse eest vastutava organisatsiooni ning hinnata iga tegevuse jaoks vajalikku pädevust. Alguses tuleb eelkõige määratleda NEPIO tüüp ja roll ning tegevuste jaotus NEPIO ja omaniku/käitaja vahel. Võib eeldada, et 1. faasis on NEPIO tõenäoliselt paljude tegevuste eest peamiselt vastutav organisatsioon. 2. faasis nihkub vastutus järjest rohkem omanikule/käitajale ja regulatiivorganile.

1. faasis tuleb valitsusel arendada sobivat pädevust ja suutlikkust tuumaenergia kasutuselevõtmiseks vajalike jõupingutuste ja kohustuste mõistmiseks, et teha asjatundlik otsus tuumaenergiaprogrammi taristu arendamiseks. NEPIO on seejuures võtmeorganisatsioon. Võib eeldada, et ajal, mil eraldiseisev eraettevõtte valmistab ette esimese tuumaelektrijaama projekti, tuleb NEPIO-l tegutseda komitee või väikese organisatsioonina, mis koordineerib mitmesuguste (valitsuse) töörühmade ja sidusorganisatsioonide tegevust, kuid millel enda tegevuseks ei ole vaja märkimisväärselt tööjõudu. See on sarnane näiteks Soomes kasutatud mudeliga, kus NEPIO roll oli tuumaenergia nõuandekomiteel.

1. faasis on ressursivajadus üsna piiratud ja suunatud plaanimiseks vajalikele erispetsialistidele. Eesti jaoks tähendab see tõenäoliselt välismaal õppimis- või töötamiskogemusega spetsialistide kasutamist ja ka rahvusvaheliste spetsialistide palkamist. Tuumenergia-asjatundlikkuse süstemaatiline arendamine inimesi välismaale kogemusi omandama saates peab olema rakendatud hiljemalt 1. faasis.

2. FAAS.

Ettevalmistustöö lepingute sõlmimiseks ja ehituseks pärast põhimõttelist otsust

Tuleb tagada regulatiivorgani piisavad teadmised tuumaelektrijaama tehnoloogia mõistmiseks. Regulatiivorganis või teise variandina eraldiseisvas tehnilises tugiorganisatsioonis tuleb arendada tuumaelektrijaamadega seotud spetsiifilisi süvateadmisi (nt reaktorifüüsika, reaktorite termohüdraulika, töökindlustehnika ja tuumaenergia-spetsiifiline materjaliteadus). Samuti on võimalik, et regulatiivorgan moodustab võrgustiku mitmesugustest sellistest tehnilistest tugiorganisatsioonidest, kellel on juba suutlikkus ja pädevus spetsiifilistes tehnilistes valdkondades.

Valitsus peab järgima pikaajalist energiastrateegia plaani ja rahvusvahelisi lepinguid ning vastavalt sellele kaasajastama õigusakte. See kehtib nii 3. faasi kui ka sellele järgneva elektrijaama käitamise kohta. Selleks peab olema tagatud õigusaktide muutmise pädevus ja suutlikkus. See võib olla NEPIO, mõne muu alalise valitsusasutuse või valitsusasutuse juures tegutseva nõukogu ülesanne. NEPIO roll peab 2. faasis olema väiksem kui 1. faasis.

Kaaluda tuleb ka muude valitsusasutuste (nt päästeamet, kaitsevägi, politsei, tervishoiusüsteem) kaasamist ja nende pädevuse arendamist (nt valmisolek ohuolukorraks, füüsiline kaitse, tegutsemine võimaliku kiirgusõnnetuse korral). Peale selle peavad keskkonnalubade väljastamise eest vastutavad valitsusasutused teatud ulatuses omama teadmisi tuumaelektrijaamade keskkonnamõjust (vähemalt maakasutuse ja jahutusvee võimalik mõju). Võimalik kiirgusmõju on tavaliselt tuuma- või kiirgusohutusega tegeleva regulatiivorgani vastutusallas, kellel on valdkonnast põhjalikumad teadmised.

Omaniku/käitaja saab moodustada mitmel viisil. Omanik/käitaja on tuumaohutuse eest vastutav juriidiline isik, kellel peab selleks olema piisav suutlikkus ja pädevus. Omaniku/käitaja asjakohase suutlikkuse ja pädevuse arendamist tuleb alustada hiljemalt 2. faasis.

Omanikul/käitajal tuleb ehitusfaasiks valmistuda nii, et ta saab võtta üldvastutuse tuumaohutuse, tuumajulgeoleku ja kaitsemeetmete eest. Omaniku/käitaja suutlikkust tuleb arendada peamiselt samades tehnilistes valdkondades, mida eespool on nimetatud regulatiivorgani kohta. Kuigi omanikul/käitajal on üldvastutus tuumaohutuse, tuumajulgeoleku ja kaitsemeetmete eest, peab omaniku suutlikkus siiski olema laialdasem ja põhjalikum kui regulatiivorganil.

Mõnes tehnilises küsimuses saab omanik/käitaja toetuda võimalikule reaktoritarnijale. Tuleb tähele panna, et vaja on vaid mõnda spetsialisti, kellel on süvateadmised näiteks reaktorifüüsika või tuumkütuse valdkonnas. Enamik spetsialiste on tõenäoliselt baashariduselt tavalised insenerid (nt elektrijaamade insener, protsessitehnoloog, elektriinsener, automaatikainsener), kelle erialateadmisi on mõnel määral täiendatud tuumaenergia-spetsiifilise väljaõppega.

Peale selle tuleb omanikul/käitajal valmistuda projekti elluviimiseks. Selleks on vaja projekti-halduse (tööplaan, riskid, raha), kvaliteedijuhtimise (sh kvaliteedikontroll ja -tagamine), hanketoimingute (isegi siis, kui on tegemist täisvalmis elektrijaama peatöövõtulepinguga, on selles tavaliselt osa ka omanikul) ning ehitus- ja paigaldusjärelvalve suutlikkust.

3. FAAS.

Tegevused esimese tuumaelektrijaama kasutuselevõtmiseks

3. faasis tuleb regulatiivorganil teha ettevalmistusi normdokumentide täiendamiseks, õiguslikuks järelevalveks ja ülevaatusteks käituse ajal. Seoses väikeste moodulreaktorite konstruktsiooni litsentsimisega Eestis võiks regulatiivorgan kaaluda protsesside ja normdokumentide kehtestamist sellisel viisil, mille korral võetakse nii palju kui võimalik arvesse konkreetse väikese moodulreaktori konstruktsiooni litsentsimist selle päritoluriigis. Sellisel juhul väheneks väikeste moodulreaktorite konstruktsiooni vastavuse tõendamiseks vajalike Eesti-spetsiifiliste normdokumentide ja protseduuride hulk. Siiski eeldatakse, et regulatiivorgan teeb ehituse ajal ülevaatusi koos sõltumatute kontrolliorganisatsioonidega või kinnitab kasutuselevõetava väikese moodulreaktori vastavust heakskiidetud projektile vähemalt verifitseerimis- ja valideerimisdokumentide alusel.

Koostööd saab teha eelkõige päritoluriigi regulatiivorgani või muu asjakohase tehnoloogia kogemusega regulatiivorganiga. Regulatiivorgani suutlikkuse ja pädevuse arendamisel võib näiteks rohkem keskenduda elektrijaama käitusele ja hooldusele. Hiljemalt 3. faasis tuleb arendada ka elektrijaama kasutuselt kõrvaldamise ning tuumkütuse ja tuumajäätmete käitlemise suutlikkust. Omaniku/käitaja ehitus- ja käitussuutlikkust käsitletakse põhjalikumalt ptk 9.1 ja 9.3.

Sidusrühmade kaasamine väikeste moodulreaktorite programmi

Viiteallika /11/ kohaselt on sidusrühmadeks üldsus, seadusandjad, valitsusasutused ja otsustajad, tuumaenergiaprogrammi edenemisel omanik/käitaja, regulatiivorgan, võimalikud tarnijad, töötajad, võimalike asukohtade lähedal asuvad kogukonnad, naaberriigid ja valitsusvälised organisatsioonid.

Ehkki paljud organisatsioonid ja üksikisikud tunnustavad tuumaenergiat kliimamuutuste vastu võitlemise ja energiatootmise CO₂-heite vähendamise olulise elemendina, on see üldsuse ja poliitikute jaoks endiselt vaidlusteemaks. Seetõttu on ülioluline teavitada eelkõige otsustajaid, kohalikke kogukondi, üldsust ja ka valitsusväliseid organisatsioone tulevikuplaanidest ja programmi edenemisest. Sel eesmärgil:

- tuleb püsivalt kättesaadavaks teha projektiga seotud asjakohane teave ja seda levitada
- tuleb tagada konkreetsete sidusrühmade ametlikud osalusviisid ning nende kommentaaride ja arvamuste ärakuulamine asjakohaste otsuste ettevalmistamisel.

Teabe kättesaadavaks tegemiseks on näiteks Soomes kasutatud internetti ja sotsiaalmeediat, tuumaelektrijaama asukoha lähedal asuvatesse kodudesse saadetud brošüüre ja teabevoldikuid, arutelusid riigi ja kohaliku kogukonna tasemel otsustajatega ning aktiivset osalemist kohalikel üritustel.

Ametlikud osalusviisid on näiteks ametlikud kuulamised ning seisukohtade ja kommentaaride küsimine keskkonnamõju hindamise, põhimõttelise otsuse tegemise (nt Soome) ja tuumarajatiselitsentsi taotlemise protsessis. Näiteks Soomes küsitakse mitmesuguste sidusrühmade seisukohti ja kommentaare keskkonnamõju hindamise aruande ja põhimõttelise otsuse, ehitamisvõi käitamislitsentsi taotlemise kohta. Sellised sidusrühmad on asjakohased ministeeriumid või valitsusasutused, ametiühingud, valitsusvälised organisatsioonid, kohalikud kogukonnad ja muud asjaomased kohalikud haldusüksused ning tuumaenergia kasutamise regulatiivorgan ja enamasti kõik, kes soovivad esitada kommentaare või seisukohti.

Eeldatavasti pakuvad üldsusele peale tuumaelektrijaama ehitusprojekti suurt huvi ka tuumajäätmete käitlemisplaanid, mis võivad olla üliolulised ühiskondliku heakskiidu saamiseks. Tuleb rõhutada, et üks põhjus, miks Soomes on tuumaenergiale küllaltki suur toetus, on tuumajäätmete (sh kasutatud tuumkütuse) kindlate käitlemisplaanide olemasolu. Seetõttu on oluline, et kohe programmi alguses pööratakse tähelepanu tuumajäätmete käitlemisplaanidele.

Juhime tähelepanu, et peale asukohariigi sidusrühmade tuleb arvesse võtta ka mitmeid rahvusvahelisi sidusrühmi. Mõned näited on esitatud allpool.

- Espoo konventsioonis (*“Piiriülese keskkonnamõju hindamise konventsioon”*) /16/ nõutakse teatud tegevusaladel keskkonnamõju hindamist plaanimise varajases faasis. Peale selle nõutakse, et kõikide selliste suurte planeeritavate projektide korral, mis tõenäoliselt avaldavad olulist kahjulikku piiriülest keskkonnamõju, tuleb naaberriike teavitada ja nendega konsulteerida. Näiteks Loviisa tuumaelektrijaama keskkonnamõju hindamisel teavitas Soome kõiki naaberriike ja kõiki Läänemereriike ja konsulteeris nendega.
- Euratomi asutamislepingu artikkel 41 kohustab käitajaid Euratomi liikmesriikides teavitama Euroopa Komisjoni uutest tuumaenergiainvesteeringutest ja olemasolevate projektide olulistest muudatustest.
- Euratomi asutamislepingu artikkel 37 kohustab Euroopa Komisjonile esitama radioaktiivsete jäätmete kõrvaldamise kõikide plaanide üldandmed.

Eeldatavasti ei erine väikeste moodulreaktorite programmi sidusrühmadega suhtlemise nõuded olulisel määral suure tuumaelektrijaama projekti asjaomastest nõuetest.

Rahvusvaheline tuumaenergiakoostöö

Rahvusvaheline koostöö on alustava tuumaenergiariigi pädevuse arendamise oluline osa. Vaja on nii rahvusvaheliste organisatsioonide kui ka kahepoolsete lepingutega seotud kogenud partnerite toetust.

IAEA toetab alustavaid tuumaenergiariike mitmel viisil. Eelkõige on IAEA välja töötanud vahe-eesmärkide saavutamise tegevuskaval põhineva kõikehõlmava juhiste komplekti. Need juhised on internetis avalikult saadaval /9/. Vahe-eesmärkide saavutamise tegevuskava, mitmesugused juhenddokumendid ja asjakohased koolitusmaterjalid tagavad uuele tuumaenergiariigile

tuumaenergiaprogrammi plaanimiseks kindla platvormi. Vahe-eesmärkide saavutamise tegevuskava on algselt välja töötatud suuri tuumaelektrijaamu silmas pidades. Tegevuskava suuremat osa saab kasutada ka väikeste moodulreaktorite programmis. Uued tuumaenergiariigid saavad IAEA-lt taotleda ka tuumataristu terviklikku ülevaatus, mille korral rahvusvahelised spetsialistid teevad kindlaks, kas programm põhineb toimival riiklikul poliitikal ja strateegial, usaldusväärsel haldusel, kohasel õigusraamistikul ja kvalifitseeritud tööjõul. Tuumataristu terviklik ülevaatus on kasulik vahend, mis võib osutada asjakohaseks 2. faasis.

IAEA on koostanud ka ohutusnormide kogu, mida pidevalt hallatakse ja ajakohastatakse ning mida saab kasutada riiklike ohutusnõuete hindamis- ja võrdlusalusena. Ohutusnormid koosnevad ohutuspõhimõtetest, -nõuetest ja -juhenditest. Ohutuspõhimõtteid ja -nõuded on ülemaailmselt tunnustatud kõrgtasemel nõuded, ohutusjuhendid moodustavad hea tava juhiste kogu.

IAEA pakub ka tuge asjakohaste rahvusvaheliste lepingute koostamisel tuumarelvade leviku tõkestamise, tuumaohutuse, tuumajulgeoleku ja tuumavastutuse valdkonnas.

IAEA veab ka rahvusvahelist innovaatiliste tuumareaktorite ja tuumkütuksüklite projekti (INPRO). See on liikmelisusel põhinev projekt, mida on rakendatud ka väikeste moodulreaktorite valdkonnas.

Regulatiivsel poolel on Lääne-Euroopa tuumaohutust reguleerivate asutuste ühendus (WENRA) teinud tööd tuumaohutuse regulatiivsete nõuete harmoneerimise nimel Euroopas. WENRA ja selle töörühmad on avaldanud ohutuse etalontasemed olemasolevate reaktorite jaoks ning ohutuseesmärgid ja mitmed seisukohad uute reaktorite jaoks. WENRA etalontasemeid ja seisukohti saab pidada riiklike õigusaktide usaldusväärseks aluseks Euroopas.

Maailma tuumaelektrijaamade käitajate organisatsioon (WANO) on tuumaelektrijaamade käitajate üks olulisemaid, kui mitte kõige olulisem koostööorganisatsioon. Alustava tuumaenergiariigi (nt Eesti) omanike/käitajate ühinemist WANO-ga tuleks kaaluda näiteks 3. faasi alguses. Kasutuselevõtmise faasis pakub WANO omanike/käitajate toetuseks näiteks käivitamiseelset vastastikust eksperdi hinnangut.

Euroopa elektriettevõtjate nõuete organisatsioon (EUR) on elektriettevõtjate rühm, kes on ühiselt välja töötanud tehnilised nõuded uute tuumaelektrijaamade jaoks. Hiljuti alustas EUR-i juures tööd väikeste moodulreaktorite töörühm. Enne tuumaelektrijaama lepingu tehniliste nõuete väljatöötamist võib osutada otstarbekaks kaaluda EUR-iga ühinemist, et EUR-i dokumente saaks kasutada tehniliste nõuete alusena.

Maailma Tuumaassotsiatsioon (WNA) on liikmelisusel põhinev organisatsioon, mis on samuti oma töös käsitlenud väikeseid moodulreaktoreid ja mis on näiteks CORDEL-i töörühmas välja töötanud seisukohad väikeste moodulreaktorite litsentsimiseks. Maailma Tuumaülikool (WNU) on WNA sõsarorganisatsioon, mis pakub võimalikele tulevastele juhtidele tuumaenergeetika valdkonna koolitusi.

Suurte reaktorite jaoks on reaktoritarnijad/-projekteerijad tavaliselt moodustanud nn omanike rühmad, kus konkreetse konstruktsiooniga reaktorite omanikud saavad oma kogemusi jagada. Näiteks on olemas keevveereaktorite omanike rühm, surveveereaktorite omanike rühm, Framatome-reaktorite omanike rühm (FROG) ja Põhjamaade reaktoriomanike rühm. Võib eeldada, et kui väikeste moodulreaktorite korral jõutakse ehitusfaasi mitme tellija juures, moodustatakse sarnane omanike rühm ka väikese moodulreaktori konkreetse tüübi jaoks.

Asjakohane rahvusvaheline tuumaenergeetikaorganisatsioon on näiteks ka OECD Tuumaenergia Agentuur (NEA).

Uue tuumaenergiariigi korral on võimalikeks partneriteks ja vajaliku koolituse andjateks võimalikud elektriijaama tarnijad ja nende asukohariigid, aga ka mitmesugused ülikoolid ja uurimisorganisatsioonid. Näiteks USA tuumaregulatsioonikomisjonil (NRC) on 45 riiki hõlmav rahvusvaheline abiprogramm, kus võimaldatakse koolitust ohutuse, uute reaktorite, asukoha valiku, füüsilise kaitse ja muu valdkonnas.

3.2 VAJALIK EHITUS- JA KÄITUSSUUTLIKKUS

Väikeste moodulreaktorite plaanimine ja ehitamine

IAEA vahe-eesmärkide saavutamise tegevuskava /1/ ning NEPIO ja omaniku/käitaja üldvastutust selle käsitluse kolmes faasis on kirjeldatud eespool (vt ptk 2). Vahe-eesmärkide saavutamise tegevuskava 2. faas hõlmab rakendusprojekti ettevalmistamist ning 3. faas lepingute sõlmimist ja projekti tegelikku elluviimist. Tuumaelektriijaama projekti elluviimise ettevalmistamine on omaniku/käitaja ülesanne.

Omaniku/käitaja üks esimesi ülesandeid on valmistumine asukoha valikuks. Asukohtade eelvalik tuleb teha näiteks IAEA juhiste kohaselt. Asukoha omanikuks või valdajaks saamine peab toimuma suhteliselt varakult. See võimaldab jätkata näiteks asukoha plaanimise ja loa taotlemisega, kuid ka keskkonnamõju hindamisega. Keskkonnamõju hindamiseks on vaja ka kohaanalüüsi andmeid. Seetõttu võib asukoha valik kergesti osutuda projekti jaoks kriitiliseks aspektiks. Kohaanalüüsi andmeid on vaja ka asukoha tingimuste esitamiseks tuumaelektriijaama hanke pakkumiskutses. Seetõttu on omanikul/käitajal juba päris varajastes faasides kohaanalüüsiks ja keskkonnamõju hindamiseks vaja mõnest inimesest koosnevat meeskonda, keda toetavad kogenud nõustajad.

Tehnoloogia valik on tõenäoliselt omaniku/käitaja kõige olulisem ülesanne. Väikeste moodulreaktorite korral on ülesanne veelgi problemaatilisem, sest käitamise- ja isegi ehitamiskogemused on senini väga piiratud. Eestiga seoses mainitud väikeste moodulreaktorite tüüpidest ei ole veel ühtegi ehitama hakatud. Oluline on jälgida võimalike väikeste moodulreaktorite tehnoloogia ja tootmise arengut. Kindlasti soovitame võtta pakkumused ainult nendelt tarnijatelt, kelle väikeste moodulreaktorite tehnoloogia on enne lepingu sõlmimist päritoluriigis litsentsitud ja ärilises kasutuses (või vähemalt kasutuselevõtmise faasis). Enne pakkumiskutse avaldamist on soovitatav teha mõne võimaliku väikese moodulreaktori tüübi tehniline teostatavusuuring. Tehnilise teostatavusuuringu tegemise ajal õpib omanik tundma võimalikke konstruktsioone ja nende piiranguid. See aitab pakkumiskutse jaoks koostada paremaid tehnilisi tingimusi. Ka võimalikud tarnijad saavad konkreetsetest tingimustest ja asukohast parema ülevaate, mis tõenäoliselt on pakkumuse tegemiseks samuti kasulik.

Suurte reaktorite korral on pakkumiskutses sageli omaniku üsna üksikasjalikud tehnilised nõuded. Väikeste moodulreaktorite korral on eesmärgiks konstruktsiooni standardimine palju suuremal määral kui see oleks võimalik suurte reaktorite korral. Seetõttu tuleb läbi mõelda pakkumiskutse tehniliste nõuete osakaal. On selge, et määratleda tuleb näiteks asukohaspetsiifilised nõuded (nt pinnase omadused, seismilised parameetrid, jahutusvee tingimused, õhutam-

peratuurid jne) ja konstruktsiooni tuleb asukoha tingimustega kohandada. Teiselt poolt peab eesmärk olema etalonkonstruktsiooni muuta nii vähe kui võimalik. Seetõttu peavad omaniku erinõuded ja litsentsimise aluste erinevused eri riikides olema viidud miinimumi. On tõenäoline, et omanik määrab pakkumiskutse tehniliste nõuete osa, kuid selle osatähtsus väheneb rangete nõuete tasemelt soovitude tasemele ja nende peamine eesmärk on lihtsustada pakkumuste hindamist ja pakkujate võrdlemist.

Uue tuumaenergiariigi kõige tõenäolisem kasutuselevõtmise ja lepingu mudel (ka väikeste moodulreaktorite korral) on täisvalmis tuumarajatis. Põhimõtteliselt on teiseks võimaluseks jagatud paketi tüüpi kasutuselevõtmise mudel, mille korral omanik sõlmib eraldi lepingud näiteks tuumaüksuse, turbiiniüksuse, lisa- ja abisüsteemide ning ehitustööde jaoks. Jagatud paketi mudeli rakendamise korral peab omanik tagama, et pakettide kokkupuutekohad on lepinguliselt ja tehniliselt teostatavad. Jagatud paketi mudeli kasutamiseks peab enamasti omanik olema pädev ja kogenud. Sageli jäävad ka täisvalmis tuumarajatisel mudeli rakendamise korral lepingus omaniku teha mõned taristutööd.

Väikesed moodulreaktorid on majanduslikult elujõulised üksnes siis, kui neid standarditakse oluliselt rohkem kui seniseid Euroopa ja USA suurte tuumareaktorite uusehituste projekte. Viiteallika /18/ kohaselt näitab senine suurte tuumaelektrijaamade standardimise kogemus, et Prantsusmaal on maksumuse erinevus esimeste omataoliste seadmetega võrreldes 15–55%. Koreas on standardimiselt saadavaks säästuks nimetatud 25–40%. Siin on arvesse võetud ka ehitusaja lühenemisest tingitud sääst. Väikeste moodulreaktorite korral on eeldatav sääst isegi veel suurem, kui võtta aluseks, et rohkem tuumaelektrijaama seadmeid saab toota tehases.

Viiteallikas /13/ on esitatud näide, kus vahe-eesmärkide saavutamise tegevuskava 2. faasi alguses on omaniku/käitaja tehniliste töötajate arv umbes 100. Selle arv kehtib peamiselt suurte tuumaelektrijaamade korral. See on üldiselt sarnane näiteks Soome kogemusega uue tuumaelektrijaama projekti pakkumiskutse ettevalmistamise ajal. Väikeste moodulreaktorite korral saab eeldada, et ulatuslikum standardimine vähendab vajalikku töömahtu mõnevõrra. 2. faasis ei saa siiski eeldada märkimisväärt erinevust, sest ka väikeste moodulreaktorite korral peab omanik/käitaja olema nn teadliku tellija rollis ja ühtlasi valmistuma projekteerimisorganiks. Omanik/käitaja vastutab edaspidi väikeste moodulreaktorite ohutuse eest. Teiselt poolt võib 3. faasi ja käitamise ajal eeldada, et palju ulatuslikuma standardimise ning süsteemide, rajatiste ja komponentide väiksema arvu tõttu on inimressurssi vaja vähem kui suurte tuumaelektrijaamade korral. IAEA kasulikud juhised pädevusnõuete ja pädevuse arendamise kohta on esitatud viiteallikas /19/.

Eesti suutlikkus väikeste moodulreaktorite ehitamiseks

Tuumaenergiaprogrammi väljatöötamisel on oluline riigi tööstussektori kaasamine. Ehitamise ajal saab paljud tarned, teenused ja tööd tellida kohalikele tööstusettevõtetele ja asjatundjatele. Lokaliseerimine tooks Eesti ühiskonnale ja tööstusele kasu töökohtade, lisandunud oskusteabe ja suutlikkuse näol. Teiselt poolt sõltub väikeste moodulreaktorite konkurentsivõime suuresti rahvusvahelisest standardimisest ja loodavate tarneahelate püsivusest. Seetõttu on tõenäoline, et väikeste moodulreaktorite korral võib lokaliseerimise võimalik ulatus olla mõnevõrra väiksem kui suurte reaktorite ehitamisel.

Võidakse ka otsustada, et riikliku ja kohaliku osaluse suurendamine väikeste moodulreaktorite ehitamisel seatakse riiklikuks eesmärgiks. IAEA vahe-eesmärkide saavutamise tegevuskava

kohaselt tuleb lokaliseerimist toetava riikliku abi võimalusi uurida juba varajases faasis (1. vahe-eesmärk).

Omanikul tuleb põhjalikult kaardistada võimalikud Eesti ettevõtted ja selle alusel teha otsused lokaliseerimise strateegia ja ulatuse kohta. Lokaliseerimise strateegia peab olema esitatud juba pakkumiskutses või muus elektriijaama tarnija ja omaniku vahelises siduvas kokkuleppes. Sageli väljendatakse kohaliku osaluse määra protsentuaalselt projekti kogumaksumusest pakkumiskutses või muus elektriijaama tarnijaga sõlmitud kokkuleppes. Euroopa konkurentsinoored võivad siiski piirata Eesti ettevõtete eelistamist muude EL-i riikide ettevõtetele. Tuleb mees pidada, et ranged riikliku osaluse nõuded võivad tarneahela muutustest tulenevalt mõjutada projektiga seotud riske ja üldist maksumust.

Enamasti on isegi uues tuumaenergiariigis võimalik rakendada kohalikke projekteerimis-, tootmis- ja ehitusettevõtteid. Kasutada saab paljusid kohalikke teenuseid, mida osutavad näiteks keskkonnahinnangu ja asukoha valikuga tegelevad ettevõtted, kalibreerimislaborid, ehitusplatsi vee ja elektriga varustavad või jäätmekäitlusettevõtted. Pinnasetöid teevad ja prügilateenust osutavad üldiselt samuti kohalikud ettevõtted. Oluline roll on ka füüsilisel kaitsel ja turvateenusel.

Oluline otsus saavutatava lokaliseerimisulatuse kohta tehakse omaniku tööde ulatuse määramisel. IAEA pakub konkreetseid tabeleid, milles on esitatud tuumaelektriijaama projektiga seotud mitmesugused tooted ja teenused, mille rakendamist saab omanik täielikult korraldada Eesti ettevõtete baasil /22/.

Üks väikeste moodulreaktorite spetsiifiline omadus on, et suur osa tarnetest on valmistooted, mistõttu kohapeal on vaja teha vähem töid kui suurte tuumaelektriijaamade ehitamisel. Väikeste moodulreaktorite tavakomponentide tarneid saab lihtsamalt lokaliseerida kui otseste tuumaenergia-spetsiifiliste komponentide tarneid. Tavakomponendid võivad olla näiteks mahutid, torud, kaablid, kaablirennid, kliimaseadmed, elektriseadmed jne. Eesti tööstussektori suutlikkust eelnimetatud komponentide tarnimiseks tuleb uurida ja kaardistada.

Eestis on võimalik arendada tööstussektori suutlikkust rasketööstuse ja tuumaenergia-spetsiifiliste komponentide tootmiseks, kuid see on väljakutse, mille jaoks võib vaja olla suuri investeeringuid tootmismahude suurendamiseks ja väljaõppeks. Need Eesti tööstusettevõtted peavad sel juhul täitma tuumaenergia-spetsiifiliste komponentide tootmisele kehtestatud rangete õigusaktide, standardite ja kvaliteediprotseduuride nõudeid. Sellise suutlikkuse kujundamine nõuab suurt pingutust ja võib selguda, et selle väljaarendamise investeeringutasuvus ei ole Eesti ettevõtetele huvipakkuv ühe projekti korral, kuid võib osutuda ahvatlevaks mitme väikese moodulreaktori ehitamise korral. See on üks võimalik strateegiline valik.

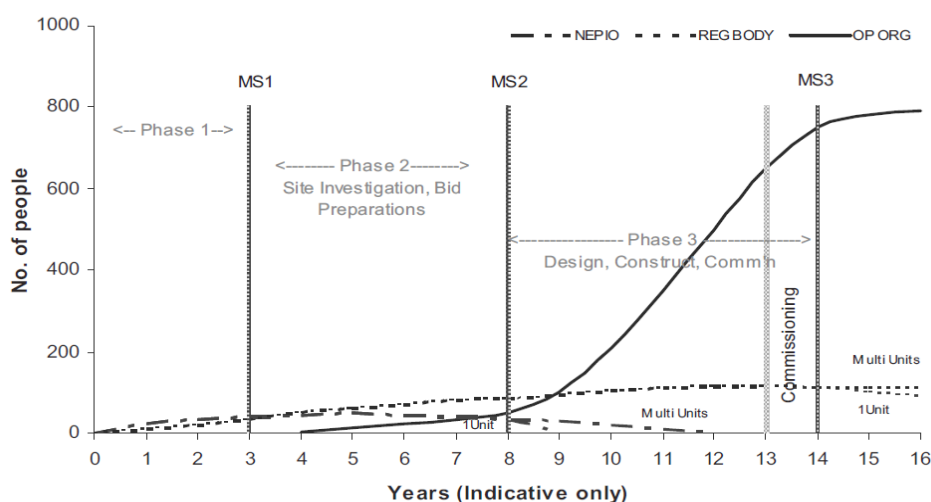
Esialgu võib eeldada, et Eestis saavutatakse lokaliseerimismäär umbes 20%. Isegi piiratud lokaliseerimise korral luuakse ehitamise ajaks sadu või isegi mõni tuhat töökohta, sest võib eeldada, et suured välismaised tarnijad palkavad selleks ajaks väga palju kohalikke töötajaid. Eesti tööjõu konkurentsivõime on hinda ja kvaliteeti arvestades hea, kuid see teema vajab põhjalikumat analüüsi.

IAEA on välja andnud spetsiaalse lokaliseerimisjuhendi, mis on esitatud näiteks viiteallikas /20/.

Väikeste moodulreaktorite käitusorganisatsiooni suutlikkus ja personalihõive

Omaniku/käitaja käitussuutlikkuse suurendamist tuleb alustada varakult (vt ptk 3), ehkki pädevuste mitmekesisuse ja töötajate arvu suurenemise tippaeg on üsna selgelt vahe-eesmärkide saavutamise tegevuskava 3. faasis.

Joonisel 3 on võrdluseks esitatud alustava tuumaenergiariigi inimressursi vajaduse faasid suure reaktori korral. Väikeste moodulreaktorite projekti eesmärk on, et nii 3. faasis kui ka käitamisfaasis oleks vaja tunduvalt vähem töötajaid kui joonisel näidatud suure tuumaelektrijaama korral.



Joonis 3. Alustava tuumaenergiariigi inimressursivajaduse tüüpilised faasid suure reaktori korral /7/

3. faasi ajal on omaniku/käitaja seisukohalt põhirõhk tegeliku käitusorganisatsiooni ja muude vajalike töötajate (sh organisatsioonisisese tehnilise tugiüksuse) arendamisel. Erilist tähelepanu tuleb pöörata tulevase elektrijaama käitajate koolitusele ja väljaõppele. Tulevaste käitajate väljaõpe on elektrijaama tarnija põhipädevus, mistõttu ei eeldata, et see väljaõpe saab uue tuumaenergiariigi (nt Eesti) korral komistuskiviks.

IAEA ohutusjuhendis NS-G-2.4 /21/ on esitatud soovitusel tuumaelektrijaama käitusorganisatsiooni ülesehitamiseks, ohutu käituse soodustamiseks ja tugeva ohutuskultuuri juurutamiseks vajalike korralduslike meetmete rakendamiseks. Ohutusjuhendis rõhutatakse samuti tuumaohutuse, kvaliteedi tagamise, radioaktiivsete jäätmete käitlemise ja kiirguskaitse tõhusa halduse jaoks vajalikke olulisi tingimusi.

Väikeste moodulreaktorite käituseks ja hoolduseks vajalike töötajate valik ja pädevus sarnaneb suurtele tuumaelektrijaamadele, ehkki väikeste moodulreaktorite käituseks vajalike töötajate arv peaks olema väiksem kui suure tuumaelektrijaama korral. Enamasti ei ole vajalike töötajate arv võrdeline elektrijaama võimsusega. Seda näitab viiteallika /17/ ptk 2.2, milles on esitatud maailmas leiduvate ühe ja mitme reaktoriga tuumaelektrijaamade töötajate arv. Näiteks kahe 500 MW reaktoriga Loviisa elektrijaamas töötab 500 inimest. Väikseid moodulreaktoreid

käitavate töötajate arv sõltub konkreetse väikese moodulreaktori konstruktsioonist. Töötajate arvule tuleb suurt tähelepanu pöörata juba tehnilise teostatavusuuringu tegemise ajal ning hanke- ja lepinguläbirääkimiste faasis.

Traditsiooniliste suurte tuumaelektrijaamadega võrreldes võib väikeste moodulreaktorite ulatuslik standardimine pakkuda võimalusi vajaliku hoolduspersonali optimeerimiseks. Näiteks, kui sarnased reaktorid asuvad üksteise lähedal või samas riigis, saaks käitusorganisatsioon koondada mitme elektrijaama hooldamiseks vajaliku pädevuse. Sel juhul hõlmab elektrijaama käitamiseks vajalike inimeste arv ainult selle konkreetse elektrijaama personali. Töökatkestuse ajal ning suuremate remondi- ja hooldustööde jaoks vajalikke inimesi saab roteerida ja vastavalt vajadusele kasutada eri elektrijaamades. Rakendada võib ka mitmesuguseid koostöömudeleid, mis sõltuvad elektrijaamade ning eri omanike ja käitajate arvust.

Siiski ei saa isegi väikese elektrijaama korral tuumaohutusega seotud eripädevust ja elektrijaama käitamist tavaliselt sisse osta. Seega võib teha järelduse, et esimeses väikese moodulreaktoriga elektrijaamas on tõenäoliselt vähemalt 200 töötajat. Tõenäoliselt sõltub töötajate arv ka konkreetse reaktori tüübist. Näiteks Soomes esitatud põhimõttelise otsuse taotluste kohaselt on kahe suure reaktoriga uue tuumaelektrijaama korral tavaline umbes 300–500 töötajat.

VIITEALLIKAD

- IAEA Nuclear Energy Series No. NG-G-3.1. Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power. Rev.1. IAEA, 2015.
- IPCC. IPCC Special Report Global Warming of 1.5 °C. <https://www.ipcc.ch/sr15/>. 2018
- MIT. An Interdisciplinary MIT study, The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World. <http://energy.mit.edu/research/future-nuclear-energy-carbon-constrained-world/>. 2018
- UK Government, Small Modular Reactors: Techno-Economic Assessment website. <https://www.gov.uk/government/publications/small-modular-reactors-techno-economic-assessment>. 2017
- VTT Report District heat with Small Modular Reactors (SMR). <https://cris.vtt.fi/en/publications/district-heat-with-small-modular-reactors-smr>. 2017.
- Policy of the United Arab Emirates on the Evaluation and Potential Development of Peaceful Nuclear Energy. https://www.uae-embassy.org/sites/default/files/UAE_Policy_Peaceful_Nuclear_Energy_English.pdf as of 18 September 2019
- IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-3.10. Workforce planning for New Nuclear Power Programmes. IAEA, 2011.
- IAEA Nuclear Energy Series, No. NG-T-3.6 . Responsibilities and Capabilities of a Nuclear Energy Programme Implementing Organization. IAEA, 2009.
- IAEA Nuclear infrastructure development website. <https://www.iaea.org/topics/infrastructure-development>
- IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-3.1. Initiating Nuclear Power Programmes. Responsibilities and Capabilities of Owners and Operators. IAEA, 2009.
- IAEA Nuclear Energy Series, Draft version (Working Document) for Revision 1 of NG-T-3.1. Responsibilities and Capabilities of Owner/Operators in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power. As available at https://www.iaea.org/sites/default/files/19/02/ng-t-3.1_rev_1_working_document.pdf on 19 September 2019.
- <https://www.iaea.org/topics/infrastructure-development/e-learning-for-nuclear-newcomers> as of 26 September 2019
- IAEA Nuclear Energy Series, Draft version (Working Document) for Revision 1 of NG-T-3.1. Responsibilities and Capabilities of Owner/Operators in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power. As available at https://www.iaea.org/sites/default/files/19/02/ng-t-3.1_rev_1_working_document.pdf on 19 September 2019.
- Helsingin Sanomat. Vuosikymmenten vääntö ydinvoimasta. 2.8.2015. <https://www.hs.fi/talous/art-2000002842289.html>

Tekniikka & Talous. Ydinvoiman kiemurainen tie Suomeen. 5.9.2008. <https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/ydinvoiman-kiemurainen-tie-suomeen/9cd388c5-c1df-3f16-9579-040ee5b5f952>

UNECE. Environmental Impact Assessment website. <https://www.unece.org/env/eia/eia.html>

IAEA, Nuclear Power Plant Personnel Training and its Evaluation A Guidebook, Technical Reports Series No. 380, IAEA, Vienna (1996).

Reduction of Capital Costs of Nuclear Power. OECD, NEA, 2000.

IAEA web site: <https://nucleus.iaea.org/competency-framework/>

IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-3.4. Industrial Involvement to Support a National Nuclear Power Programme, IAEA, 2016.

IAEA Safety Guide NS-G-2.4 The Operating Organization for Nuclear Power Plants. IAEA, 2002.

IAEA Technical Reports Series No.396, Economic Evaluation of Bids for Nuclear Power Plants, 1999 edition, IAEA 2000.

3.3 PÄDEVUSE ARENDAMINE VÄIKESE MOODULREAKTORI PROGRAMMI JAOKS

Koostaja: Vesa Suolanen

SISSEJUHATUS

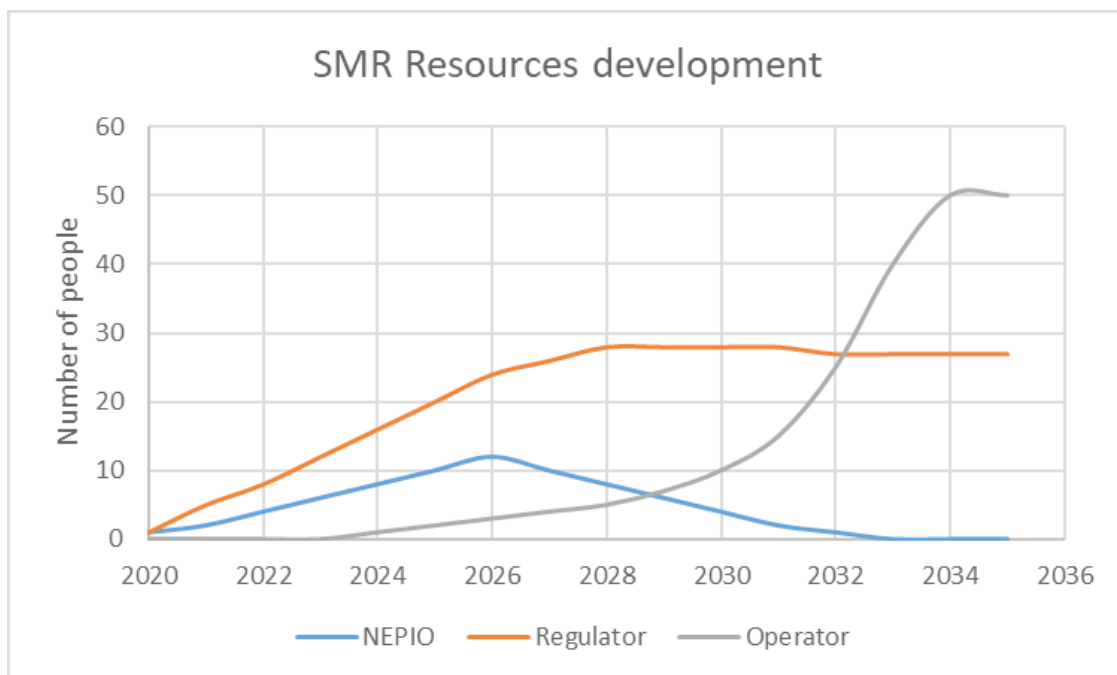
Aruanne on Fermi Energia OÜ koostatava teostatavuse eeluuringu üks osa. Selle eesmärk on anda ülevaade pädevusest ja inimvarast, mida on vaja väikese moodulreaktoriga tuumaelektriijaama programmi rakendamiseks. Aruandes esitatud hinnangud põhinevad hüpoteetilistel väikeste moodulreaktorite andmetel ja tulevikustsenaariumide pädevusvajadusel.

See osa on jaotatud neljaks peatükiks, milles käsitletakse järgmisi teemasid:

- töövõtja ja keskkonnaluba väljastava asutuse vajalik pädevus tuumaelektriijaama keskkonnamõju hindamiseks (ptk 2)
- tuumaelektriijaama kasutuselevõtmiseks vajalik poliitikakujundamise pädevus ja selle arendamine (ptk 3)
- esmase litsentsimis- ja järelevalveasutuse pädevus väikese moodulreaktori programmi jaoks ja selle arendamine (ptk 4)
- arendaja/elektriettevõtja vajalik pädevus ja selle arendamine (ptk 5).

Pärast väikese moodulreaktori programmi alustamist muutub osalevate organisatsioonide tööjõuvajadus programmi käigus (vt joonist 1). Kõigepealt tuleb luua riiklik töörühm – tuumaenergiaprogrammi rakendusorganisatsioon (NEPIO). Reguleeriva asutuse personali tuleb arendada nii, et sel oleks pädevus programmi raames esitatud loataotluste menetlemiseks (nt alates 2028. aastast või hiljem, nagu on näidatud arengut kujutaval joonisel 1). Väikese moodulreaktori ehitusetapis (eeldatavasti alates 2030. aastast) suureneb käitaja tööjõuvajadus kiiresti (vt joonist).

Kogu aruandes lähtutakse eeldusest, et väikeste moodulreaktoritega tuumaelektriijaam tarnitakse täisvalmis ehituslahendusena. See tähendab, et omanik/käitaja tegutseb ehituse ajal üldise juhi või koordinaatorina ja tema personalivajadus võib seega piirduda mõnekümne inimesega.



Joonis 1. Väikese moodulreaktori programmi hinnanguline tööjõuvajadus ajas

Töövõtja ja keskkonnaluba väljastava asutuse vajalik pädevus tuumaelektrijaama keskkonnamõju hindamiseks (Euratom 87/2014 ja IAEA ohutusnõuete kohaselt)

Keskkonnamõju hindamine on vastastikune protsess tuumaelektrijaama loa taotleja, pädeva asutuse ning seadusjärgsete ja muude sidusrühmade vahel. Keskkonnamõju hindamise aruandes tuleb kindlaks teha kogu sotsiaalmajanduslik ja keskkonnamõju (sh laad, tõenäosus, kestus, ulatus ja olulisus) [1]. See hõlmab kogu projekti arendusprogrammi alates tuumaelektrijaama ehitamisest kuni tegevuse lõpetamiseni. Keskkonnamõju hindamise aruande põhieesmärk on hinnata, kas kaalutav tuumaelektrijaamaprojekt on valitud asukoha keskkonda arvesse võttes sobiv.

Keskkonnamõju hindamine tehakse tuumataristu arendusprogrammi 1. etapis (vt ptk 3) [1, 6].

Töövõtja vajalikud ressursid ja pädevus keskkonnamõju hindamise tüüpiliste valdkondade kirjeldamiseks ja hindamiseks (viite 1 kohandus):

- asukoha ja keskkonna kirjeldus
- väikeste moodulreaktoritega tuumaelektrijaama ja piirkonna asendiplaan
- väikese moodulreaktori tehnilised andmed
- tuumkütuse tsükli alg- ja lõppetapi kirjeldus
- jahutusvee korraldus (sissevool, väljavool, keskkonna termiline koormus)

- kiirgusemissioon ja muu emissioon
- õnnetused (projekteerimisel arvesse võetav õnnetus, projekteerimisel mitteamestatud õnnetus, rasked õnnetused)
- müratase
- jäätmekäitlus (ehitamise, käitamise ja tegevuse lõpetamise ajal)
- seotud asjaolud (võrguühendused ja võrgu tugevdamine, maismaa- ja merevedude ühendused ja logistika)
- elektrivõrguga seotud kaalutlused.

Keskkonnamõju valdkonnakohaseks hindamiseks on enamasti vaja ülikooliharidusega inimest, kes on keskkonnateaduste (asukoha kirjeldus), taristu ja ehituse ning tuumatehnika asjatundjad (nt termohüdraulika, materjaliteadus, kohapealsed ja laboratoorsed radioloogilised analüüsid, jäätmekäitlus ja logistika). Välikatseteks ja -mõõtmisteks on vaja ka keskharidusega tehnilisi töötajaid.

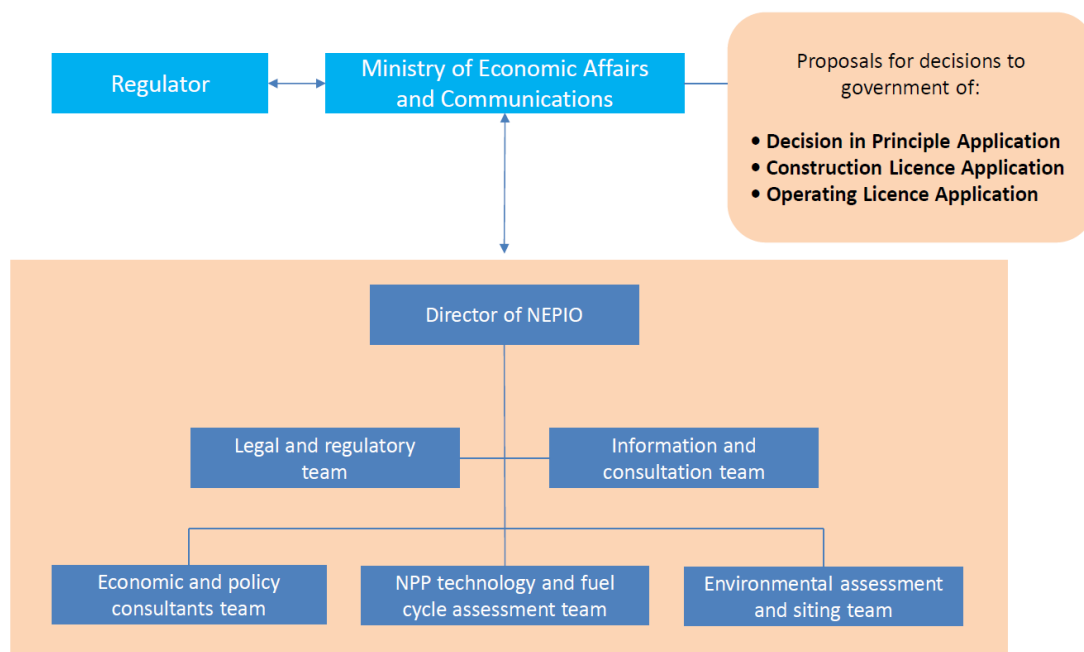
Väikese moodulreaktori loa taotlejal on keskkonnamõju hindamiseks vaja umbes 10–15 inimest. Mitmete ülesannete jaoks saab kasutada ka välisspetsialiste. Siiski on oluline ja soovitatav arendada valdkondades, kus on vaja pikaajalist pädevust, riiklikku pädevust.

Luba väljastaval asutusel peab olema hinnangute ja keskkonnamõju hindamise aruande läbi vaatamiseks ja hindamiseks vajalik pädevus. Eestis on pädev asutus majandus- ja kommunikatsiooniministeerium, kes vastutab kogu keskkonnamõju hindamise protsessi juhtimise eest. Seetõttu tuleb kiirgusohutuse eest vastutavate ametiasutuste ja konkreetse ministeeriumi jaoks luua riiklik pädevus. Ametiasutustes peab olema vähemalt viis ülikooliharidusega inimest.

Tuumaelektrijaama kasutuselevõtmiseks vajalik poliitikakujundamise pädevus ja selle arendamine (millist ja millisel tasemel pädevust ja väljaõpet on vaja tuumaenergiaprogrammi eri etappides)

Tuumataristu arendusprogrammi olulised etapid ja vahe-eesmärgid (viite 1 kohaselt).

- 1. ETAPP (PROJEKTIEELSED TEGEVUSED). Kaalutlused enne väikese moodulreaktori programmi alustamise otsust.
 - 1. vahe-eesmärk. Valmisolek võtta teadlik kohustus väikese moodulreaktori programmi elluviimiseks.
- 2. ETAPP (PROJEKTI VÄLJATÖÖTAMINE). Väikese moodulreaktori ehitamise ettevalmistamine pärast poliitilise otsuse tegemist.
 - 2. vahe-eesmärk. Valmisolek esimese väikese moodulreaktori pakkumiskutse esitamiseks.
- 3. ETAPP (EHITAMINE). Tegevused esimese väikese moodulreaktori kasutuselevõtmiseks.
 - 3. vahe-eesmärk. Valmisolek esimese väikese moodulreaktori kasutuselevõtmiseks ja käitamiseks.



Joonis 2. Näide tuumaenergiaprogrammi rakendusorganisatsiooni (NEPIO) ja selle suhtluse kohta vastutava ministeeriumiga väikese moodulreaktori litsentsimiseks

Tuumaenergiaprogrammi rakendusorganisatsioon (NEPIO) (vt joonist 2) moodustatakse plaanitava taristuprogrammi algetapis. NEPIO on riiklik ja alaline töörühm, kuhu kuuluvad tuumaenergia ja muude oluliste valdkondade asjatundjad (nt seadusandlus, järelvalve, majandus, teave ja keskkonnamõju hindamine). NEPIO direktor ja mitmed NEPIO spetsialistid tulevad väikese moodulreaktori arendusprogrammi alustanud ettevõttest, kuid küllaldaste töörühmade moodustamiseks on tõenäoliselt vaja ka välisspetsialiste.

NEPIO suhtleb vastutava ministeeriumiga eelkõige litsentsimisprotsessi ajal. Põhimõttelise otsuse taotlust ja muid loataotlusi menetletakse vastutavas ministeeriumis. Järelvalveasutus annab ministeeriumile taotluste kohta eksperdihinnangu. Seejärel esitab ministeerium riigi valitsusele taotluste kohta otsuse tegemise ettepaneku. Siinses aruandes mõistetakse järelvalveasutuse personalivajaduse all tuumaenergia spetsialiste ja muid järelvalveasutuse juures tegutsevaid spetsialiste (nt kiirgusohutuse seire).

1. etapis on otseselt kaasatud töötajate arv suhteliselt väike (umbes 10–20 inimest), kuid vaja on rahvusvaheliste või riigisiseste eksperdirühmade täiendavat tuge [2]. Nagu on näidatud joonisel 2, tegelevad programmi alguses programmi koordineerimise ja personalihõivega NEPIO ja selle eksperdirühmad.

1. etapis vastutab enamiku tegevuste eest NEPIO. Suure osa eriteadmisi nõudvast tööst teevad välisspetsialistid.

2. etapi alguses juhib programmi endiselt NEPIO, kuid sel ajal peaksid olema moodustatud muud vastutavad organisatsioonid (sh järelvalveasutus ja omaniku/käitaja organisatsioon), kelle roll muutub järjest olulisemaks.

3. etapi alguseks võib NEPIO-l olla endiselt järelevalvaja/koordinaatori roll, kuid väikese moodulreaktori ehitamise ja kasutuselevõtmise eest vastutab peamiselt käitav organisatsioon, kelle ülesanne on värvata aktiivselt tuumaelektrijaama alalist personali ja korraldada väljaõpet.

IAEA ja EL-i ohutusnõuete (Euratom 87/2014) kohaselt peab Eesti riik tuumaküsimustes välja arendama vajaliku riikliku asjatundlikkuse, mis tagab tuumaohutusega seotud pädevuse ja rahvusvaheliste kohustuste täitmise.

Hariduse ja kvalifikatsiooni seisukohalt on suurem osa taristuarenduse 1. ja 2. etapis vajalikest tuumiktöötajatest ülikooliharidusega spetsialistid. Väikese moodulreaktori käitamisetapis moodustab ülikooliharidusega tööjõud väiksema osa personalist, suurem osa töötajatest on tehnilise haridusega. Sellistelt töötajatelt ei nõuta ulatuslikke teadmisi tuumavaldkonnas, kuid neile tuleb teha põhjalik koolitus tuumakeskkonnas töötamisega seotud kvaliteedi- ja ohutusnõuete kohta.

Esmase litsentsimis- ja järelevalveasutuse pädevus väikese moodulreaktori programmi jaoks ja selle arendamine (plaanitava põhimõttelise otsuse taotluse menetlemiseks 2028. aastal ja ehitusloa taotluse menetlemiseks 2029. aastal eeldusel, et esmane litsentsimine tehakse USA-s või Kanadas)

Litsentsimine on astmeline loataotlusprotsess, mis algab riigi valitsuse tehtavast põhimõttelise otsusest, millele järgnevad väikese moodulreaktori ehitusluba, tegevusluba ja tuumaelektrijaama elutsükli lõpus tegevuse lõpetamise luba. Põhimõttelise otsuse etapp on poliitilise otsuse tegemise etapp, mille taustaks on asukoha valik ja keskkonnamõju hindamine. Ehitusloa, tegevusloa ja tegevuse lõpetamise loa menetlemisega kaasnevad ulatuslikud ohutusanalüüsid ja õiguslane läbivaatus.

Eesti riigis on väikese moodulreaktori litsentsimisprotsessi alustamise eeltingimus tuumaenergiat käsitlevate õigusaktide ja õiguslike juhiste olemasolu, mis peavad olema kooskõlas Rahvusvaheline Aatomiaenergiaagentuuri (IAEA) juhistega. Riiklikul reguleerival asutusel peab olema vajalik pädevus arendusprogrammi eri etappides esitatavate loataotluste hindamiseks ja läbivaatamiseks.

Väikesed moodulreaktorid on kompaktsed ja tarnijad saavad tööstuslikult toota sarnaseid väikeste moodulreaktoritega tuumaelektrijaamu. Sellest tulenevalt saavad päritoluriigi litsentsimisprotsessi kasutada ka muud riigid, kes kaaluvad väikese moodulreaktori ostmist. Seetõttu võiks reguleeriv asutus standardse väikeste moodulreaktoritega tuumaelektrijaama korral etteulatuvalt kaaluda asukoha varajast heakskiitmist ja reaktori mudeli litsentsimist [3].

Litsentsimisprotsessi võib lihtsustada ka reaktori mudeli litsentsimiseks tehtav rahvusvaheline koostöö. Sellisel juhul saab taotleja esitada ettenähtud ajal spetsiaalse taotluse näiteks kombineeritud ehitus-, kasutuselevõtmis- ja tegevusloa saamiseks. Olenevalt riiklikust õiguskorrast tuleb enne asukoha valiku või reaktori mudeli heakskiitmist lahendada kõik ohutus- ja keskkonnamõjud.

Loodud on reguleerivate asutuste rahvusvaheline foorum, kus arutatakse väikeste moodulreaktoritega seotud reguleerimisküsimusi. Eesmärk on tuvastada ja läbi arutada üldised ohutusprobleemid, mis võivad väikeste moodulreaktoritega seotud projektide läbivaatustel tekkida, ning võimaluse korral soovitada ühtseid lähenemisi nende lahendamiseks. Reaktori uute

modelite korral arvestab foorum ka IAEA ohutusnõudeid ja muude organisatsioonide (nt Lääne-Euroopa tuumaohutust reguleerivate asutuste ühendus WENRA) ohutuseesmärke.

Mõned riigid, näiteks USA ja Kanada, litsentsivad NuScale-tüüpi väikeseid moodulreaktooreid (USA) ja IMSR-tüüpi intereeritud sulasoolareaktoreid (Kanada). Selliste reaktoritüüpide heakskiitmist on oodata lähiaastatel. Üksikasjalikud litsentsimisdokumendid võib hindamiseks ja vastavuse kontrollimiseks saata Eesti pädevatele asutustele. Euroopas kehtivad WENRA litsentsimisnõuded erinevad USA nõuetest, mis võib litsentsimisprotsessi mõnevõrra keerulisemaks muuta.

Kanada ja USA reguleerivad asutused on allkirjastanud koostöömemorandumi, mis näeb ette koostööd IV põlvkonna reaktorite ja väikeste moodulreaktorite tehnoloogiate tehnilisel läbi-vaatusel [4]. See tagab uuendusliku tehnoloogia ohutu ja tõhusa väljatöötamise ja kasutuselevõtmise.

Väikese moodulreaktori litsentsimisprotsessiga seotud spetsiifiliste õiguslike ja tuumatehniliste probleemide tõttu eeldatakse järelevalveasutuselt mitmekülgset pädevust. Litsentsimise riiklik ja alternatiivne regulatsioon tuleb nõuetekohaselt lahendada. Ohutusnõuete järgimine elektriijaama projekteerimisel eeldab tehnilist asjatundlikkust. Pädevus on oluline kütuse käitumise, termohüdraulika ja materjaliteadusega seotud valdkondades.

Seoses asukoha litsentsimise ja asukohaväliste tagajärgede hindamisega peab järelevalveasutusel olema vajalik pädevus, et hinnata ja kontrollida keskkonna kiirguskoguseid ja terviseriske ning analüüsida väikeste moodulreaktoritega tuumaelektriijaama ümbritsevate ohualade ulatust.

Litsentsimisetapis suureneb personalivajadus ja järelevalveasutustesse tuleb värvata kokku umbes 20–30 ülikooliharidusega inimest. Väikeste moodulreaktoritega tuumaelektriijaama litsentsimine võib kesta umbes kaks aastat, isegi kui esmane litsentsimine on tehtud päritoluriigis.

Arendaja/elektriettevõtja vajalik pädevus ja selle arendamine (plaanitava põhimõttelise otsuse taotluse menetlemiseks 2028. aastal ja ehitusloa taotluse menetlemiseks 2029. aastal)

Tuumaelektriijaama arendusprogrammi töötajate pädevuse arendamiseks on vaja ühtset riiklikku strateegiat. Selle eesmärk on ühendada üksikorganisatsioonide (sh tugioorganisatsioonide) kavad riikliku strateegia väljatöötamiseks, mis hõlmab järgmist [5]:

- käitaja organisatsiooni, reguleeriva asutuse ja eriorganisatsioonide ressursside ja pädevuse vajalik tasakaal ning kõigis organisatsioonides vajaliku väljaõppe tagamine
- pikaajaline strateegia kõigis organisatsioonides jätkusuutlike ja pädevate ressursside tagamiseks
- riikliku haridustaristu piisavuse kinnitamine või vajalike täiustusvajaduste tuvastamine
- välismaal õppimise võimaluste loomine ja optimeerimine.

Tuumataristu arendusprogrammi eri etappides on vaja iga organisatsiooni ressursse ja pädevust. Näiteks peab elektriettevõtja pädevus hõlmama järgmisi valdkondi:

- tehnika (mittetuumaenergia ja tuumaenergia)

- äri (nt õigus, rahandus)
- litsentsimine (hindamine)
- tuumkütuse tsükli haldus ja hanked
- ehitustööde juhtimine ja kasutuselevõtmine
- käitus ja hooldus
- kasutatud tuumkütuse ja radioaktiivsete jäätmete käitlemine ning kasutuselt kõrvaldamine
- väljaõpe ja arendamine (pidev väljaõpe).

Üleminekul ettevalmistusetapist (2. etapist) ehitusetappi (3. etapp) ning sellele järgneva tuumaelektrijaama kasutuselevõtmise ja käitamise ajal suureneb elektriettevõtja tööjõuvajadus kiiresti. Tööjõu pädevuse tagamiseks on oluline personalihõivega kaasnev pidev väljaõpe.

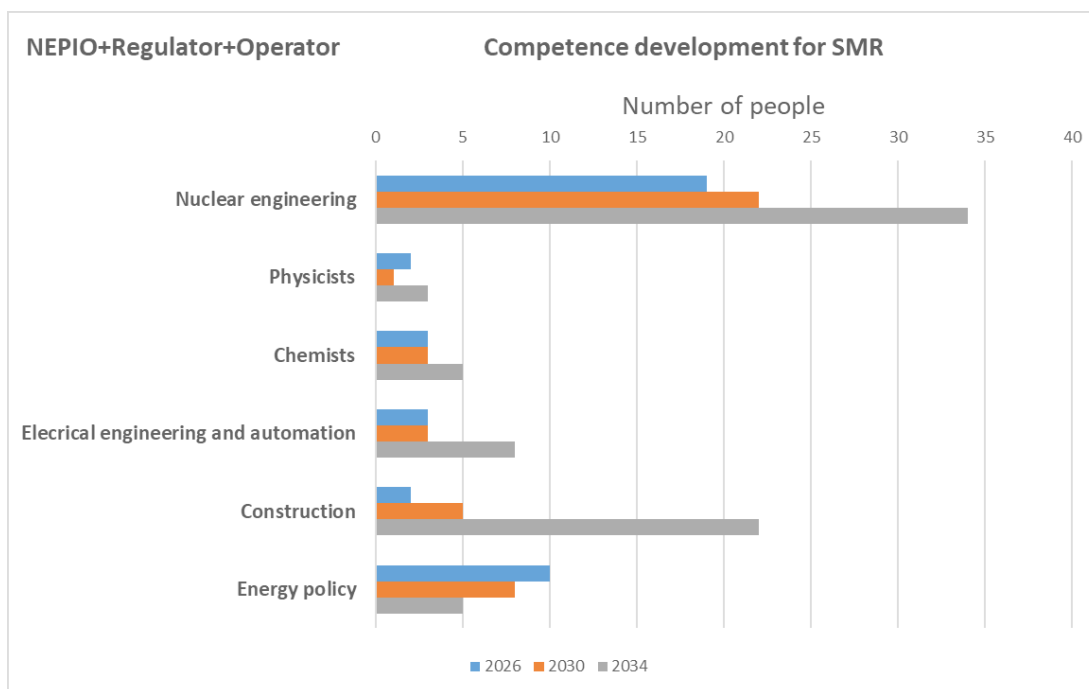
Väikese moodulreaktori korral on käituseks ja hoolduseks vajalike inimeste arv umbes kümme korda väiksem kui suurte tuumareaktorite korral (vt joonist 1 eespool). See on tingitud väikeste moodulreaktorite kompaktselt konstruktsioonist ning nende kaugjuhtimise ja -käitamise võimalusest. Alguses juhib ja delegeerib programmi ülesandeid NEPIO, kuid järk-järgult läheb vastutus programmi rakendamise eest üle käitajale (käitaja areneb välja NEPIO-st).

Väikese moodulreaktori reguleerimiseks on vaja vähem regulatiivtöötajaid kui suurte reaktorite korral (kus riiklike regulatiivtöötajate arv võib olla 100–300 inimest), sest sellele tehakse tõenäoliselt vähem regulaarseid kohapealseid ülevaatusi (nt kiirgustaseme seire ja muud komponentidega seotud ülevaatused). Väikese moodulreaktori omadused võimaldavad vähendada ka kasutatud tuumkütuse käitlemisega seotud töid, sest mõne reaktori mudeli korral peab kütust lisama harvem kui tavalistes tuumareaktorites. Seega mõjutab väikese moodulreaktori mudel ja mujalt saadavate kogemuste kasutamise võimalus oluliselt vajalike töötajate arvu.

Väikeste moodulreaktorite kasutuselevõtmise eesmärk on lihtsustada arendusprotsesse ja saavutada võrreldes tavapäraste reaktoritega väiksem töötajate arv. Seda eesmärki aitab saavutada rahvusvaheline koostöö ja väikeste moodulreaktorite arendamise ja reguleerimisega seotud vastutuse jagamine.

VIITED

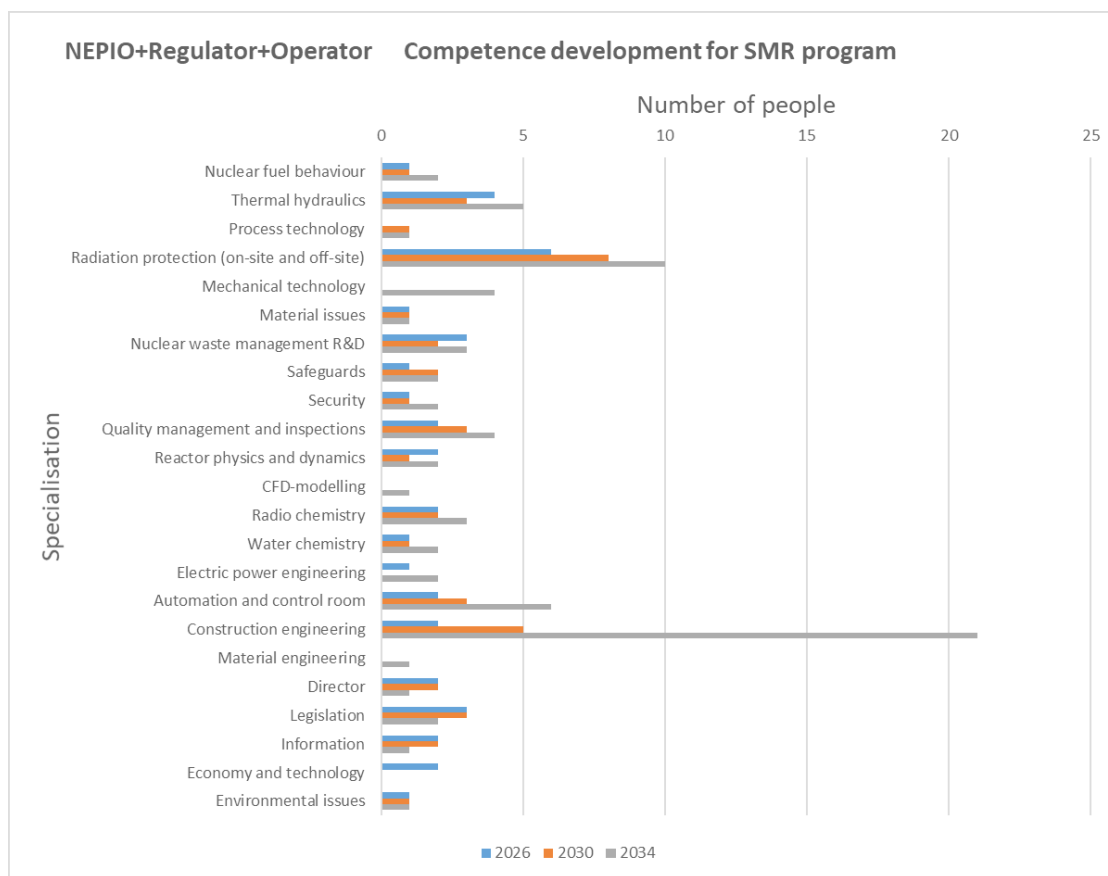
1. Managing environmental impact assessments for construction and operation in new nuclear power programmes, Technical Reports, NG-T-3.11, International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, 2014.
2. Workforce planning for new nuclear power programmes, Technical Reports, NG-T-3.10, International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, 2011.
3. Licensing process for nuclear installations, Specific Safety Guide, No. SSG-12, International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, 2010.
4. Regulators formalise technical collaboration on SMR regulation, Word Nuclear News (WNN), 16 August 2019. <http://world-nuclear-news.org/Articles/Regulators-formalise-technical-collaboration-on-SM>
5. Evaluation of the status of national nuclear infrastructure development, Technical Reports, NG-T-3.2 (Rev. 1), International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, 2016.
6. Milestones in the development of a national infrastructure for nuclear power, Guides, NG-G-3.1 (Rev. 1), International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, 2015.

LISA A.**Näide väikese moodulreaktori programmi personalivajaduse kohta valdkondade kaupa**

Joonis 3. Hinnanguline kogu personalivajadus (NEPIO, reguleeriv asutus ja käitaja) valdkondade kaupa aastatel 2026, 2030 ja 2034. Esitatud töötajate arv kehtib üksnes väikese moodulreaktori programmi kohta

LISA B.

Näide väikese moodulreaktori programmi personalivajaduse kohta erialade kaupa



Joonis 4. Hinnanguline kogu personalivajadus (NEPIO, reguleeriv asutus ja käitaja) erialade kaupa aastatel 2026, 2030 ja 2034. Esitatud töötajate arv kehtib üksnes väikese moodulreaktori programmi kohta

LISA C.**Väikese moodulreaktori programmi erialateadmiste tase****Tabel 1.** Eriala, personalivajadus ja erialateadmiste tase. Esitatud töötajate arv kehtib üksnes väikese moodulreaktori programmi kohta

Eriala	Hinnanguline personalivajadus			Erialeadmiste tase
	2026	2030	2034	
Tuumatehnika				
Tuumkütuse käitumine	1	1	2	Doktori- ja magistrikraad
Termohüdraulika	4	3	5	Magistrikraad
Protsessitehnoloogia	0	1	1	Bakalaureusekraad ja erialane töökogemus
Kiirguskaitse (tuumaelektrijaama asukohas ja sellest väljaspool)	6	8	10	Magistri- ja bakalaureusekraad
Mehaaniline tehnoloogia	0	0	4	Eriane töökogemus
Materjaliteadus	1	1	1	Doktorikraad
Tuumajäätmete käitlemisega seotud teadus- ja arendustegevus	3	2	3	Magistrikraad
Kaitsemeetmed	1	2	2	Magistrikraad
Turvalisus	1	1	2	Magistrikraad
Kvaliteedijuhtimine ja ülevaatused	2	3	4	Magistri- ja bakalaureusekraad
Füüsikud				
Reaktorifüüsika ja -dünaamika	2	1	2	Doktori- ja magistrikraad
Arvutusliku vedelikudünaamika modelleerimine	0	0	1	Doktori- ja magistrikraad
Keemikud				
Radiokeemia	2	2	3	Magistrikraad
Veekeemia	1	1	2	Magistrikraad
Elektrotehnika ja automaatika				
Elektroenergeetika	1	0	2	Magistrikraad
Automatiseerimine ja juhtimiskeskus	2	3	6	Magistrikraad ja keskharidus
Ehitamine				
Ehitustehnoloogia	2	5	21	Magistrikraad ja erialane töökogemus
Materjalitehnoloogia	0	0	1	Magistrikraad ja erialane töökogemus
Energiapoliitika				
Direktor	2	2	1	Doktorikraad
Seadusandlus	3	3	2	Magistrikraad
Teave	2	2	1	Bakalaureusekraad
Majandus ja tehnoloogia	2	0	0	Doktori- ja magistrikraad
Keskkonnaküsimused	1	1	1	Magistrikraad



FERMI.