TEOSTATAVUSANALÜÜS VÄIKSE MOODULREAKTORI (VMR) SOBIVUSEST EESTI ENERGIAVARUSTUSE TAGAMISEKS JA KLIIMAEESMÄRKIDE TÄITMISEKS 2030+ OSA II

Lühikirjeldus

2020. aastal viis Fermi Energia läbi kuus erinevat uuringut väikseid moodulreaktoreid ja nende rakendamist käsitlevatel teemadel. Tööd keskendusid sellistele valdkondadele nagu asukoht, litsentseerimine, ehitus, hädaolukorra planeerimine, jäätmekäitlus ning energia rakendused.

Fermi Energia OÜ – Maakri 25, Tallinn 10145 info@fermi.ee

Sisukord

Väikse moodulreaktori asukoha eeluuring *3*

Väikeste moodulreaktorite litsentsimismudel *8*

Litsentsimisprotsess **8**

Litsentsimismudel **10**

Litsentsimisuuringu peamised järeldused **11**

Väikse moodulreaktori ehitatavus Eestis *14*

Analüüsi alused **14**

BWRX-300 jaam **15**

Projekti rakendamine **16**

Litsenseerimine, rahastus ja Valitsus **17**

Kokkuvõte **17**

Väikeste moodulreaktorite hädaolukorra planeerimistsoonid *19*

Kiirguskaitse **19**

Regulatsioonid **20**

Riiklikud regulaatorid **21**

Reaktorid **22**

NuScale Power Module (NuScale Power LLC) 22

BWRX-300 (General Electric-Hitachi) 23

Integral Molten Salt Reactor (Terrestrial Energy Inc) 23

MMR (Ultra Safe Nuclear Company) 24

UK SMR (Rolls Royce) 25

Näide: Asukoha analüüs Tennessee Valley Authority väikereaktori projektis **25**

Kokkuvõte **27**

Kvalitatiivne geoloogilise valmisoleku hinnang Deep Isolationi puuraugulahendusele Eestis *28*

Kokkuvõte **28**

Sissejuhatus **29**

Kontekst 29

Deep Isolationi tehniline lahendus 31
Ülevaade 31
Järeldused meie Eesti uuringust 34
Metoodika 34
Ülevaade järeldustest 36
Ohutu valik Eestile 37
Taskukohane valik Eestile 37
Paindlik valik Eestile 38
Soovitused ja edasised tegevused 40
Lisa A. Kasutatud kirjandus 41
Vesiniku, ammoniaagi ja vedelkütuste tootmine tuumaenergia abil 44
Elektrolüüsitehnoloogiad 44
Vesiniku tootmine tuumaenergia abil 46
Ammoniaagi tootmine tuumaenergia abil 47
Vedelkütuste tootmine tuumaenergia abil 48
Kaugküttesoojus ja tööstusaur väiksest moodulreaktorist 50
Kaugküte 50
Potentsiaalsed tarbijad 50
Tõenäoline trass Rakvere linna 52
Tehnilised arvutused 53
Kaugküttesoojuse omahind 54
Tööstusaur 54
Potentsiaalsed tarbijad 54
Aurutorustiku trass 55
Tehnilised arvutused 55
Tööstusauru omahind 56
Kokkuvõte 57

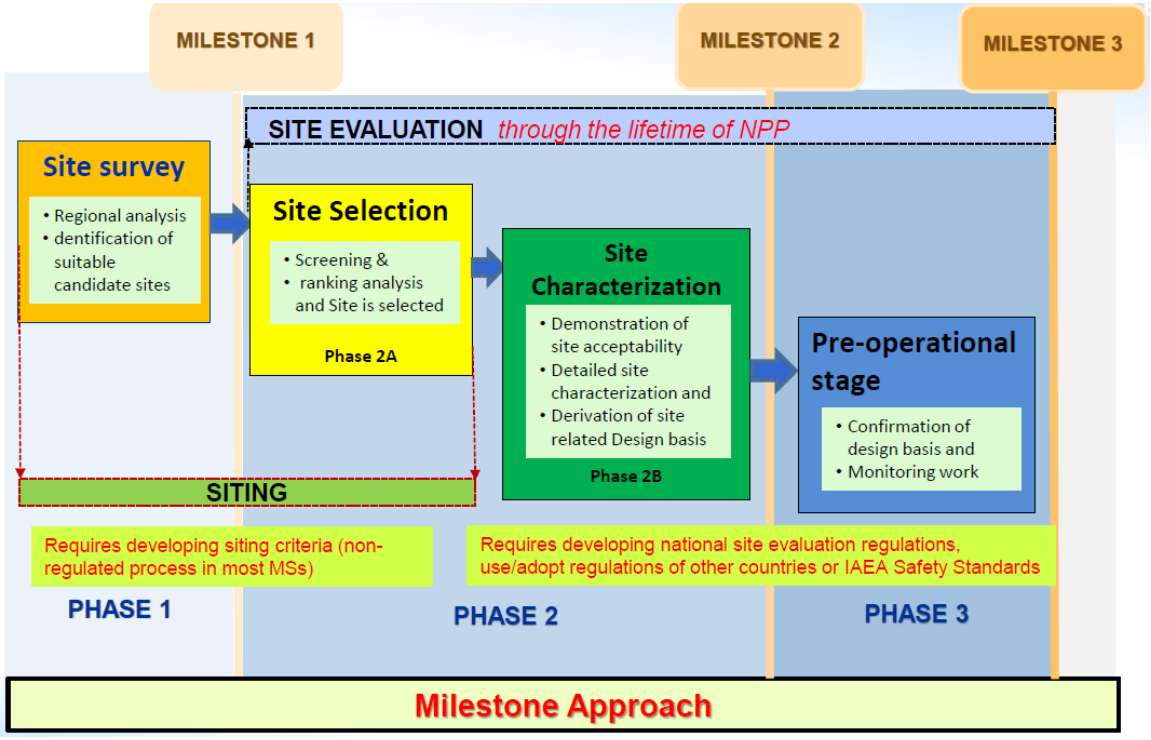
VÄIKSE MOODULREAKTORI ASUKOHA EELUURING

Teostaja: Tractebel ja Steiger OÜ

Väikse moodulreaktori (VMR) asukoha eeluuring on üks osa Fermi Energia poolt tellitud 2020. aasta teostatavusanalüüside (Teostatavusanalüüs väikse moodulreaktori (VMR) sobivusest Eesti energiavarustuse tagamiseks ja kliimaeesmärkide täitmiseks 2030+) programmist. Asukoha eeluuringu raames on Tractebel ja Steiger OÜ läbi viinud ulatusliku üleriigilise uuring potentsiaalsete asukohtade (IAEA terminoloogia järgi „potential site“) ja nende piires ka eelistatud asukohtade tuvastamiseks (IAEA terminoloogia järgi „candidate site“). Leitud eelistatud asukohad esindavad potentsiaalselt parimaid asukohti väikse moodulreaktori rajamiseks Eesti.

Antud uuring järgib nüüdisaegseid ja parimaid rahvusvahelisi tavasid. Antud uuringuks on kasutatud Rahvusvahelise Aatomienergiaagentuuri (IAEA) meetodit (IAEA Nuclear Energy Series NG-T-3.7, *Managing Siting Activities for Nuclear Power Plants*), mis hõlmab asukohavaliku kriteeriumide rakendamist etappidena. Asukohavaliku kriteeriumid on seotud välistamistingimustega, mis tuleneva keskkonnapiirangutest, ohutusaspektidest või majandus-tehnilistest kaalutlustest. Kriteeriumid on kas otseselt välistavad ehk välistamiskriteeriumid (nt Natura2000 loduskaitsealad) või valikulised kriteeriumid ehk kaalutluskriteeriumid, mida kohandatakse, et jõuda praktilise arvu (mitte liiga suur, mitte liiga väike) eelistatud asukohtadeni. Asukoha eeluuringu protsess on läbipaistev, dokumenteeritud ja faktidel põhinev.

Antud asukoha eeluuring on esimene samm IAEA kirjeldatud asukohavaliku protsessis (vaata Joonis 1 „Site survey“).



Joonis 1: IAEA asukohavaliku protsess (Allikas: IAEA NG-T-3.7 Rev.1).

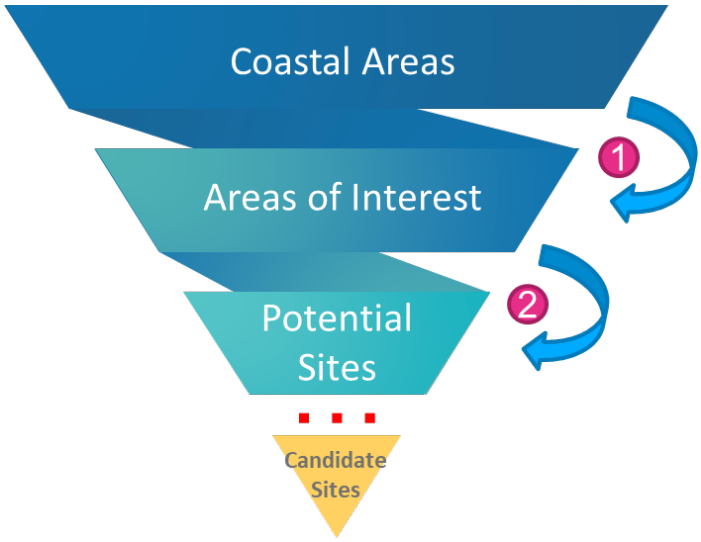
Töö viidi läbi kättesaadava teabe uuringuna (nn desktop reasearch), mis seisnes info kogumises ning kogu olemasoleva info üksikasjalikus analüüsisi, et asukohtadel piisava detailsusega vahet teha. Rakendati ranget andmete kogumise ja valideerimise protsessi, et toetada aukoha eeluuringu protsessi usaldusväärsete ning aktsepteeritavate andmetega. Koostati projekti andmebaas, mis hõlmab järgmisi valdkondi:

- keskkond,
- kultuuripärand,
- demograafia,
- murrangunihked,
- topograafia ja batümeetria,
- geoloogia ja hüdrogeoloogia,
- seismoloogia,
- rikked põhjakivimites,
- vulkanoloogia,
- geotehnilised ohud,
- pinnase geotehnilised parameetrid,
- inimtegevusest tingitud ohud,
- üleujutus,

- äärmuslikud ja harukordsed meteoroloogilised sündmused,
- elektrivõrk ja infrastruktuur, ja
- maakasutus.

Analüüsi eesmärk oli välja selgitada sobivad asukohad vähemalt 600 MWe koguvõimsusega tuumaelektrijaamale, mis võib koosneda mitmest väiksest moodulreaktorist. Sealjuures võeti arvesse eelvalitud potentsiaalsete reaktoritehnoloogiate vajadusi ning nõudeid asukohale. Erinevate eelvalitud reaktoritehnoloogiate maksimaalsete parameetrite kombineerimisel saadi nn tehnoloogiakriteeriumid (*ingl. k. Plant Parameter Envelope - PPE*), mis võeti asukohtade analüüsis arvesse. Potentsiaalsete reaktoritehnoloogiate valik võib tulevikus muutuda, sel juhul tuleb tehnoloogiakriteeriumid üle kontrollida ja vajadusel kohandada.

Potentsiaalsete asukohtade määramiseks järgiti kahe-etapilist protsessi, mis on kujutatud Joonis 2.



Joonis 2: Potentsiaalsete asukohtade määramise protsess.

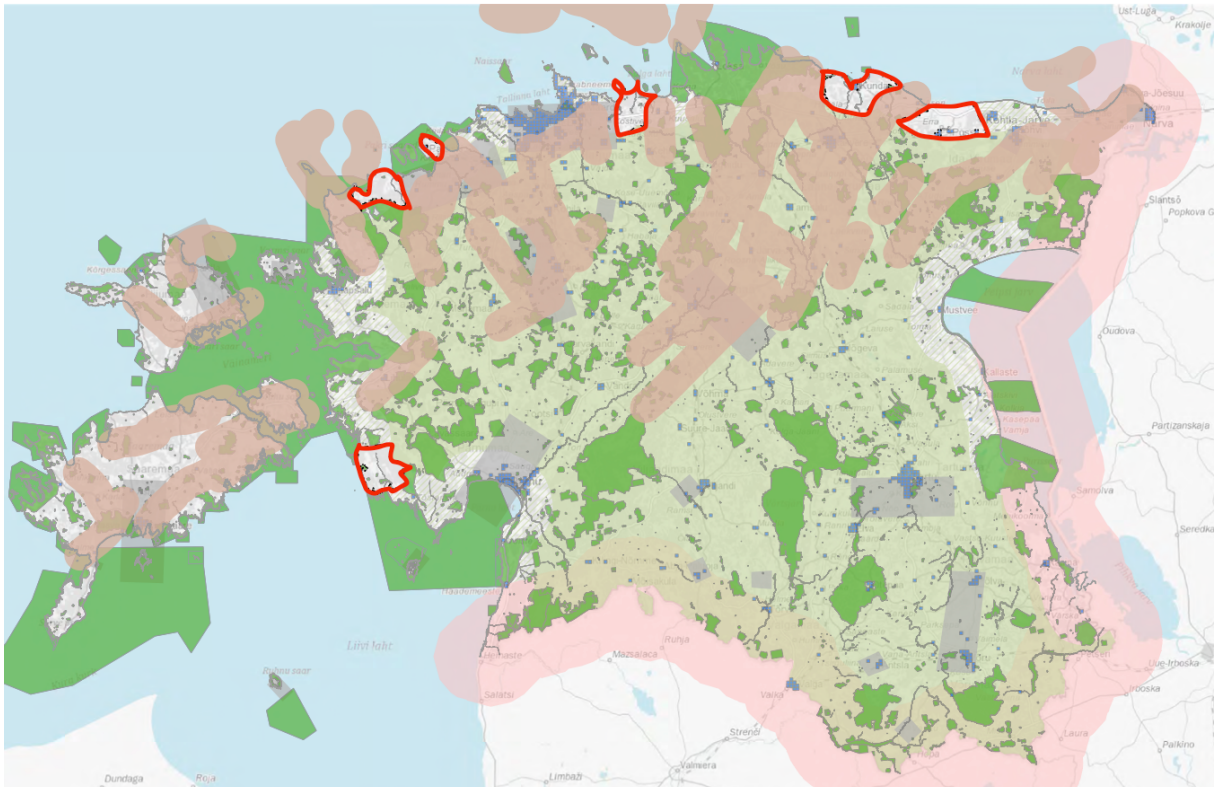
Esimeses etapis kohaldati asukohavaliku kriteeriume üleriigilisel tasandil, et teha kindlaks huvipiirkonnad. Kuigi IAEA soovitab alustada protsessi huvipakkuvate regioonide kogumist, mis on juba eelvalitud sotsiaalmajandusliku potentsiaali alusel, ei seatud selles töös esialgu mingeid piiranguid ning valiti alustuspunktiks kogu Eestimaa pindala. Kiiresti jõuti järeldusele, et huvipiirkonnad on põhiliselt rannikualad johtuvalt sisemaa jõgedele ja järvedele seatud keskkonnapiirangutest.

Huvipiirkonnad tuvastati kartograafilise välistamise põhjal ehk välistati erinevad looduskaitsealad, rahvuspargid; tihedasti asustatud piirkonnad; alad, kus leidub rikkeid põhjakivimites; alad, kus puudub ligipääs jahutusveele; riigi piiri lähedal asuvad alad; lennujaamade lähiümbrus; sõjalised objektid; inimtegevusest tingitud ohud.

Peale välistusprotsessi jäid huvipiirkondadeks alad järgmistes maakondades (vt. Joonis 3Joonis 3):

- Ida-Virumaa – Lüganuse,
- Lääne-Virumaa – Kunda,
- Harjumaa idaosa – Kaberneeme,
- Harjumaa lääneosa – Keibu, ja
- Pärnumaa – Haapsi.

Kaks viimast piirkonda osutusid hiljem vähem atraktiivseteks (põhjused on selgitatud aruandes).



Joonis 3: Huvipiirkonnad esimese etapi kartograafilise välistamise tulemusena.

Teises etapis koguti järele jäänud huvipiirkondade kohta üksikasjalikumat teavet ja rakendati detailsemaid asukohavaliku kriteeriume konkreetse piirkonna tasandil. Analüüsiti näiteks piirkondade topograafiat (madalad üleujutuse riskiga alad, merepinnast liiga kõrged alad), batümeetriat (merepõhja sügavus, jahutusvee tingimused), geoloogilisi iseärasusi ja võimalikke ohte, geotehnilist informatsiooni, maa kasutust ja piisavalt suure vaba maa olemasolu, keskkonnakaitseliselt tundlikke aspekte (nt ohustatud liikide elupaigad), kultuuripärandi objekte, maa omandiõigust, läheduses olevat taristut (maanteed, raudteed, sadamad, tööstus), ligipääsu elektrivõrgule (kõrgepingeliinid) jne. Selle tulemusena saadi **potentsiaalsed asukohad** igas huvipiirkonnas.

Lõpuks valiti potentsiaalsetest asukohtadest välja parimad ehk **eelistatud asukohad** (loetletud idast läände):

- Lüganuse – Moldova,

- Lüganuse – Aa,
- Lüganuse – Aidu,
- Kunda, ja
- Kaberneeme.

Sõelale jäänud eelistatud asukohad on näidatud Joonis 4.

Joonis 4: Eelistatud asukohad.

Vastavalt IAEA tuumajaama asukohavalikuprotsessile peab asukoha eeluuringu etapile järgnema asukohavaliku etapp, kus detailselt analüüsitakse, võrreldakse ja hinnatakse eelistatud asukohti ohutus-tehniliste, sotsiaalmajanduslike ja muude oluliste kriteeriumite põhjal. Eesti seaduste kohaselt tuumaelektrijaama kui suure riikliku huviga objekti asukohavalik toimub Riigi eriplaneeringu ja keskkonnamõju strateegilise hindamise kaudu, mida korraldab riik.

Kokkuvõtteks, antud üleriigiline asukoha eeluuring näitab, et Eestis leidub mitmeid sobivaid piirkondi, kus leidub mitmeid sobivaid asukohti väikse moodulreaktori rajamiseks. Parimad asukohad asetsevad Põhja-Eesti rannikul Tallinnast idas.

VÄIKESTE MOODULREAKTORITE LITSENTSIMISMUDEL

Teostaja: Fortum Power and Heat Oy ja GNE Advisory

Fermi Energia tellitud litsentsimisuuring kirjeldab üht võimalikku universaalset väikeste moodulreaktorite litsentsimise protsessi, mis võimaldaks tõhusat rahvusvahelist reaktoritehnoloogia kasutuselevõttu. Uuringus välja pakutud litsentsimise mudel kirjeldab detailsemalt, kuidas jõuda VMRi ehitusloani Eestis alustades nn „puhtalt lehelt“ nii legislatiivsest kui regulatiivsest aspektist.

LITSENTSIMISPROTSESS

Litsentsimisanalüüs kirjeldab nii Tuumaohutuse Konventsiooni (*ingl. k. Convention on Nuclear Safety ehk CNS*), mille lepinguline Eesti juba on, kui ka Euratomi Tuumaohutuse direktiivi (Nõukogu direktiiv 2014/87/Euratom, 8. juuli 2014), mis tuleb igal liikmesriigil oma siseriiklikku õigusesse üle võtta. Mõlemad dokumendid nõuavad iseseisva ja sõltumatu regulatiivorgani asutamist ja olemasolu, mis vastutaks regulatiivse raamistiku kasutuselevõtu ja järgimise eest. See raamistik peab sisaldama tuumakäitiste litsentsimist ja keelama litsentsimata tuumakäitiste kasutamise.

Rahvusvahelise Aatomienergia Agentuuri (*ingl. k. International Atomic Energy Agency ehk IAEA*) definitsiooni kohaselt tähendab litsents[1] „reguleeriva asutuse poolt väljastatav juriidiline dokument, mis annab loa tuumakäitise loomiseks ja kindlaksmääratud tegevuste teostamiseks“. CNS-i kohaselt on litsents määratletud kui „mis tahes luba, mille reguleeriv asutus on taotlejale andnud, et vastutada tuumakäitise asukoha, projekteerimise, ehitamise, kasutuselevõtmise, käitamise või dekomissioneerimise eest”.

Oluline tuumaohutuse põhimõte on, et sõltumatu reguleeriv asutus suudab litsentsimisprotsessi abil hoida pidevat kontrolli tuumakäitise üle terve elutsükli vältel. Praktikas on litsentsimisprotsesside struktuurid riigiti erinevad. Erinevate lähenemisviiside peamised erinevused võib kokku võtta järgmiselt:

- **Diskreetsete etappide litsentsimise lähenemine**, kus igale konkreetsele etapile tuumakäitise elutsüklis antakse eraldi load, näiteks asukohaluba, projekteerimise luba, ehitusluba, kasutusluba, käitamisluba ja dekomissioneerimise luba; ja
- **Kombineeritud litsentsimise lähenemisviis**, mille puhul võib anda ühise loa mitme tuumakäitise elutsükli etapi (näiteks ehitamine ja käitamine) jaoks või isegi ühe loa terve käitise elutsükli jaoks.

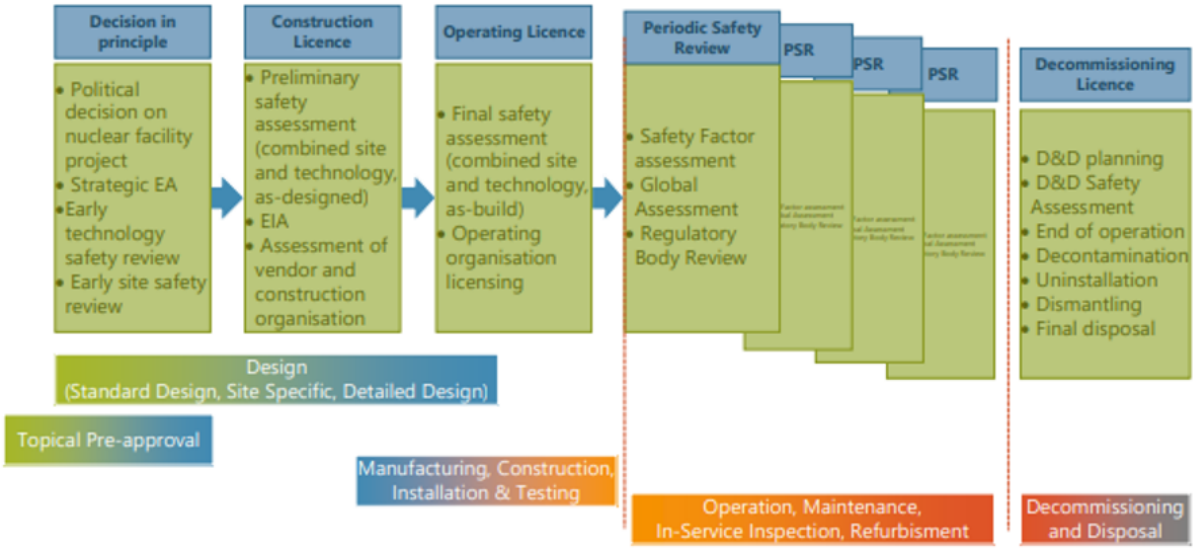
[1] Terminit „litsents“ kasutatakse sünonüümselt terminiga „luba“.

Kombineeritud litsentsimise lähenemist võib täiendada erinevate eellitsentsimise protsessidega, mis võivad hõlmata järgmist:

- **Varajane asukohaluba**, mille alusel taotleja saab enne tuumakäitise ehitamiseks, kasutuselevõtuks või käitamiseks taotluse esitamist heakskiidu konkreetse asukoha sobivuse kohta; ja
- **Tehnoloogia sertifikaat**, mis kinnitab reaktoritehnoloogia standardprojekti sõltumata ehitus- ja käiduloa või konkreetse asukoha olemasolust.

Litsentsimisanalüüs kirjeldab tuumarajatiste litsentsimispraktikaid ja erinevaid lähenemisviise Soomes, Ühendkuningriigis, Kanadas ja Ameerika Ühendriikides.

Litsentsimisprotsess, mida käesolevas uuringus Eestile sobivaks peetakse tugineb „diskreetsete etappide“ lähenemisel nagu kirjeldab alljärgnev Joonis 5.



Joonis 5: Üldine litsentsimisprotseduurika VMRi juurutamiseks Eestis.

Nagu Joonis 5 näidatud, sisaldab Eestile sobilik litsentseerimise protseduur järgmisi elemente:

- **Põhimõtteline otsus** (*ingl. k. Decision-in-Principle ehk DiP*). See on valitsuse tasandil tehtav poliitiline otsus (võimalik, et kinnitatud ka parlamendi poolt), millele eelneb Keskkonnamõjude Strateegiline Hinnang (KSH) ja esialgne ohutushinnang Eesti vastava regulatiivorgani poolt. Nii KSH kui esialgne ohutushinnang on oma mahult piiratud ja läbi viidud eesmärgiga tuvastada sobivate tehnoloogiate ja vähemalt ühe sobiva asukoha olemasolu. Põhimõttelise otsuse võimaldab saavutada kindlus poliitilise ja avalikkuse heakskiidu osas enne projekti detailsesse tööfaasi sisenemist ja mahukate investeeringute tegemist. Põhimõtteline otsus on osa litsentsimisprotsessist Soomes.

- **Temaatiline eelkinnitus** (*ingl. k. topical pre-approval*). Litsentsimise uuring soovitab, et Eesti õiguslik ja regulatiivne raamistik võimaldaks esitada taotlusi Eesti tuumaenergiat reguleerivale asutusele (kas samaaegselt põhimõttelise otsusega, või eelnevalt/järgnevalt põhimõttelise otsusega) tingimuslikeks temaatilisest eelkinnitusteks teatavate tehnoloogiliste aspektide kohta, mis võivad hõlbustada VMRi litsentsimist tulevikus.
- **Ehitusluba**. Ehitusloa väljastamine eeldab detailse ohutusanalüüsi läbiviimist Eesti loataotleja ja selle analüüsi hinnangut reguleeriva asutuse poolt, kes on ühtlasi ka ehitusloa väljastaja. Ehitusluba on litsensimisuuringu keskne element.
- **Käitamisluba**. Selles etapis on olulised tegelikule ehitatud käitisele vastav ohutusanalüüs, ja käitava organisatsiooni ohutusanalüüs, mis sisaldab juhtimissüsteemide ja -protsesside ning ressursside ja kompetentside hinnanguid. Käitamislitsents väljastatakse Eesti tuumaregulaatori poolt.
- **Perioodiline ohutushinnang**. Perioodilised ohutushinnangud teostatakse Eesti tuumaregulaatori poolt terve käitamise aja vältel.
- **Dekomissioneerimisluba**. Dekomissioneerimisloa väljastamine eeldab dekomissioneerimisplaanide ja radioaktiivsete jäätmete lõppkäitlemise, -ladestamise ohutusanalüüse ja -hinnanguid. Dekomissioneerimisluba väljastatakse Eesti tuumaregulaatori poolt.

LITSENTSIMISMUDEL

Litsentsimisuuring pakub välja optimaalse ja tõhusa litsentsimismudeli, mis võimaldaks väljastada ehitusluba 12 kuulise menetluse jooksul.

Käesolevas litsentsimisuuringus eeldatud, et Eesti loataotleja on valinud tehnoloogia, mille osas on olemas standardne VMRi projekt või referentsjaam, mis on kogenud ja aktsepteeritud välisriigi tuumaregulaatori poolt juba litsentsi saanud. Muudatused standardse VMRi projekti või referentsjaamaga peaksid olema minimaalsed, näiteks võiksid need piirduda muudatustega, mis tulenevad valitud asukohast ja keskkonnatingimustest Eestis. Loomulikult eeldatakse, et VMR-id põhinevad kõrgemal standardiseeritusel kui tavapärased suured reaktorid. Standardse VMRi projekti või referentsjaama heakskiidetud ohutusanalüüside ja -hinnangute kasutamise eesmärk on muuta litsentsimisprotsess nii Eesti loataotleja kui ka riikliku tuumaregulaatori jaoks maksimaalselt tõhusaks.

Litsentsimisuuring soovitab järgmist:

- **Eesti loataotleja** toimib kui „intelligentne klient“ ja rakendab maksimaalselt olemasolevat ohutuskirjeldust[2] ja esialgset ohutusanalüüsi raportit (*ingl. k. Preliminary Safety Assessment Report ehk PSAR*), mis on koostatud VMR tehnoloogia tarnija või välisriigi loataotleja poolt valitud standardse VMRi projekti või referentsjaama jaoks.
- **Eesti tuumaregulaator** rakendab ohutushinnangu läbiviimisel maksimaalselt valitud standardse VMRi projekti või referentsjaama jaoks välisriigi regulaatori poolt koostatud ohutushinnagut. Eesti tuumaregulaator peaks rakendama astmelist lähenemist oma ohutushinnangus. Seda eelkõige aspektides, milles esinevad erinevused/muudatused standardsest VMR projektist või referentsjaamast, mis on ohutuse seisukohalt olulised ning asukoha- ja loataotleja-spetsiifilistes asjades.

Litsentsimisuuringus koostatakse ja pakutakse välja võimalik astmelise lähenemise metodoloogia, mida rakendada ehitusloa taotleja poolt esitatud ohutusanalüüsi koostamisel ja hindamisel. Samuti kirjeldab litsentsimismudel Araabia Ühendemiraatide Föderaalse tuumaregulaatori (*ingl. k. Federal Authority for Nuclear Regulation ehk FANR*) poolt Barakah tuumajaama ehitusloa menetlemisel rakendatud astmelist ohutusanalüüsi koostamise ja hindamise meetodit.

Litsentsimisuuringus märgitakse, et kriitiline tegur olemasoleva ohutusanalüüsi ja -hinnangu rakendamisel on Eesti ja välisriigi tuumaregulatsiooni (regulatsiooni, kust olemasolev ohutusanalüüs ja/või -hinnang pärineb) sobivus. Litsentsimisuuringus tuvastati, et see on oluline element, mida arvestada ka Eesti tuumaregulatsiooni loomisel. Ühtlasi soovitab uuring seada ohutuskriteeriumid selliselt, et need vastaksid rahvusvahelistele nõuetele (nt Rahvusvaheline Aatomienergia Agentuur IAEA) ning et nõuete liiga detailset seadmist regulatsioonis tuleks vältida. Kirjeldatud lähenemine võimaldab piisavat paindlikkust välisriigi regulatsioonist tulenevate madalama taseme nõuete, juhendite ja standardite rakendamist.

Litsentsimisuuring soovitab samuti tihedat koostööd Eesti tuumaregulaatori ja valitud standardse VMRi projekti või referentsijaama päritoluriigi kogenud tuumaregulaatori vahel.

LITSENTSIMISUURINGU PEAMISED JÄRELDUSED

Litsentsimisuuringu tulemuste põhjal tehti järgnevad järeldused:

- Põhimõttelise otsuse etapis tehtavad tehnoloogia ja asukoha hinnangud peaksid olema mahult piiratud ja keskenduma sellele, et tuvastada üldiselt sobivad reaktoritehnoloogiad ja vähemalt üks potentsiaalne sobiv asukoht.

[2] Ohutuskirjeldus tähendab kogu ohutusega seonduv ja seda kirjeldavat dokumentatsiooni.

- Rahvusvaheline või Euroopa-ülene tehnoloogiasertifikaat on optimaalne võimalus tõhusa litsentsimisprotsessi rakendamiseks Eestis, kuid seda ei ole lähitulevikus oodata.
- Eesti loataotleja peaks maksimaalselt rakendama olemasolevat standardse VMRi projekti või referentsjaama ohutuskirjeldust. Kuna loa omanikul lasub peamine vastutus jaama ohutuse osas, siis peab loataotleja demonstreerima „intelligentse kliendi“ võimekust ja olema piisavalt kompetentne teostama sõltumatut ohutusanalüüsi ja esialgse ohutusanalüüsi ning muude litsentsimisdokumentide hinnanguid, mida Eesti tuumaregulaatorile esitada tuleb. Esialgse ohutusanalüüsi ja muu litsentsimisdokumentatsiooni sobivus (asukoha-spetsiifiliste tingimuste põhjal) ja kättesaadavus, mis võivad olla koostatud ja mida võib omada välisriigi loa omanik (ja mitte tehnoloogia tarnija) peab olema tagatud.
- Eesti tuumaregulaatori poolt kasutusele võetav litsentsimismudel peaks püüdma võimaldada välisriigi kogenud tuumaregulaatori poolt koostatud ohutushinnagu maksimaalset rakendamist. Selle hõlbustamiseks tuleb tagada, et võimalikult suur osa välisriigi regulaatori väljunditest on üle kantav ja kasutatav Eestis võttes arvesse konfidentsiaalsuspiiranguid (tuumaenergeetika kaitsemeetmed ja turvalisuse nõuded ning ka äriliselt tundlikud ja omandiõigusega seotud kaalutlused) ja ekspordipiiranguid.
- Hoolimata välisriigi kogenud tuumaregulaatori poolt koostatud ohutushinnangu maksimaalsest kasutamisest, on Eesti tuumaregulaatori poolne sõltumatu ohutushinnang vajalik. Eesti tuumaregulaator peab kontrollima ohutusanalüüside täielikkust ja adekvaatsust, et tagada kohalike ja asukoha-spetsiifiliste eripärade korrapärane arvesse võtmine ning hindama Eesti loataotleja kompetentse ja võimekust.
- Välisriigi tuumaregulaatori poolt koostatud ohutushinnangu kasutamine peaks toimuma astmelise lähenemise meetodil, kusjuures Eesti tuumaregulaatoripoolne ohutushinnang peab prioriteediks seadma erinevused/muudatused standardsest VMR projektist või referentsjaamast; ohutuse seisukohalt olulised elemendid; ning asukoha- ja loataotleja-spetsiifilistes asjad.
- Standardse VMRi projekti või referentsjaama esialgse ohutusanalüüsi ja välisriigi tuumaregulaatori ohutushinnangu maksimaalne rakendamine on võimalik siis, kui Eesti ja seotud välisriigi regulatsiooni alused ja ohutusstandardid on harmoniseeritud. Eesti legislatsioon ja regulatsioon peaks sätestama ohutusnõuded selliselt, et need oleksid kooskõlas rahvusvaheliste praktikatega (nagu IAEA), kuid seejuures tuleb vältida liiga detailsete ettekirjutuste kehtestamist.
- Eesti tuumaregulaator peab välja töötama metodoloogia (i) välisriigi tuumaregulaatori poolt koostatud ohutusanalüüside hindamiseks, ja (ii) astmeliseks lähenemiseks ehitusloa taotluse menetlemisel ja hindamise. Selleks võib kasutada olemasolevaid näited, nagu Araabia

Ühendemiraatide tuumaregulaatori FANR poolt välja töötatud ja rakendatud meetod, või luua uus meetoded.

- Eesti tuumaregulaatori ja välisriigi kogenud tuumaregulaatori vaheline koostöö on ülioluline ja hädavajalik. Vastavat koostööpõhimõtted ja rakendusmehanismid tuleks välja töötada ja kehtestada võimalikult varakult.

VÄIKSE MOODULREAKTORI EHITATAVUS EESTIS

Teostaja: Vattenfall AB

Käesolev analüüs hindab Väikse Moodulreaktori (VMR) ehitatavust Eestis. Analüüsi aluseks on võetud General Electric Hitachi (GEH) kergvee jahutusega tuumaelektrijaam BWRX-300 ning selle esmase ehituse projekti plaan ja ajakava Ameerika Ühendriikides. Analüüsi eesmärgiks on hinnata kas 36-kuuline ehitusgraafik on VMR-i ehitusprojekti jaoks Eestis saavutatav. Käesolev tekst on aruande lühikokkuvõte, täismahus aruanne on kättesaadav inglise keeles.

ANALÜÜSI ALUSED

Mitmes rahvusvahelises uuringus on jõutud järeldusele, et uute tuumaelektrijaamade kasutuselevõtt peab olema kulupõhine. Suured viivitused III-põlvkonna tuumaelektrijaamade ehitustel ja ehituskulude ületamine on tuumaenergia konkurentsivõime kahtluse alla seadnud. Uuenduslike VMR-disainidega seotud kulude vähendamise võimalused on seega oodatud ja vajalikud. Peamised järeldused EPRI, MIT, ETI ja NEA uuringutest tuumaenergia projektide ebaedu põhjustest võib kokku võtta nii:

- Jaama disaini valmimine - jaama projekti muudatuste vältimine hilisemas perspektiivis on prognoositava ehitusaja võtmetegur.
- Lihtsustamine - ehitatavus sõltub tugevalt disaini lihtsustamisest.
- Standardiseerimine - standardiseeritud disain ja tarneahel vähendavad teadmatusi ehituses ning ehitamiseks kuluvat aega.
- Modulariseerimine, tootmis- ja ehitusmeetodid - disaini ning selle tootmis- ja ehitusmeetodite optimeerimine aitab kaasa lühikese ja prognoositava ehitusaja saavutamisele.
- Projekti väljatöötamine - ettevalmistav töö enne lõplikku investeerimisotsust on projekti edukaks elluviimiseks ülioluline.
- Objekti arendus - ehitusplatsil tuleks kaaluda logistikaküsimusi mitme ühiku paralleelseks ehitamiseks.
- Lepingute sõlmimine - rollid, vastutus, kaalutud riskid ja huvi projekti edukuse vastu määratletakse lepingute sõlmimise kaudu.
- Projektijuhtimine - tõestatud projektijuhtimise tavadele toetumine suurendab ehitusprojekti elluviimise õnnestumise tõenäosust.
- Kvaliteedijuhtimine - kvaliteediprobleemide nõuetekohane haldamine tagab süsteemide, struktuuride ja komponentide vastavuse kehtivatele nõuetele, mis omakorda hoiab ära kulude ja ajakava negatiivse mõju.

- Litsenseerimine - tarbetute viivituste vältimiseks ehituses on oluline omaniku tõhus koostöös regulaatoriga.
- Rahastus - laenuandjate ja investorite veenmiseks on vajalik elujõuline ärimudel.
- Valitsus - projekti õnnestumiseks on vajalik poliitiline tahe ja tugev demokraatlik alus.

BWRX-300 JAAM

BWRX-300 jaam mahub 170 x 280 meetri suurusele maa-alale. Selle ala piiridesse jäävad nii võrguühendus, jahutustorn, kontor, parkla, ladu kui ka muud vajalikud abihooned. Eriolukorra planeerimise tsoon on hinnanguliselt umbes 8 hektarit. Mitme reaktori ehitamisel samasse asukohta lähtutakse sõltumatuse printsiibist. Reaktorid ei jaga omavahel tugifunktsioone ja on seega üksteisest sõltumatud (Joonis 6).

Joonis 6: Kahe BWRX-300 reaktoriga tuumajaama eskiis. (Allikas: GEH)

Jaamadel, mis ei ole esimesed omataolised (NFOAK) on paljudes aspektides standardiseeritud disain. Eelduseks on võetud, et jaama projekti võib käsitleda piisavalt küpsena ning et pärast vajalikke kohandusi saab seda Eestis hangete ja ehituse aluseks kasutada. BWRX-300 litsenseerimiseks USAs ja Kanadas on suur eeltöö tehtud ABWR ja ESBWR jaamade loataotlustega, mille tehnoloogia on küllaltki sarnane. Esmase omataolise BWRX-300 jaama litsenseerimine Põhja-Ameerikas annab aluse ohutushinnangu aruandele, mida saab kasutada litsentsimisprotsessis Eestis.

Jaama mastaap ja keerukus vähenevad tänu lihtsustatud protsessidele ja süsteemidele. Võrreldes ESBWR-iga on jaama ruumala ja betooni mahu vähenemine 90 protsenti. Saavutatud lihtsustustel ja suuruse vähendamisel on ehitatavusele suur mõju.

BWRX-300 on oma disaini poolest väga sarnane väiksele keevveereaktorile, mis kasutab standardset keevveereaktori kütust. GEH plaanib välja töötada BWRX-300 jaamast spetsiaalse Euroopa versiooni. Reaktorit ja selle ohutusega seotud süsteeme toodab GEHi ülemaailmne tarneahel vastavalt tuumastandarditele. Turbiinisaar koos kõigi peamiste komponentidega on samuti standardiseeritud ja selle integreerib tõestatud oskusteabega tarnija. Paljud ohutusega mitteseotud komponentide mõõtmed ja materjalid on valitud sellised, et neid oleks võimalik lihtsalt kaubanduslikult tarnida.

Modulariseerimise ja täiustatud ehitusmeetodite kasutamine on oluline komponent disaini optimeerimisel lühikese ja prognoositava ehitusaja jaoks. GEHi strateegia seisneb selles, et modulaarsus võetakse kasutusele majanduslikult tasuval määral. Esmane omataoline jaam (ja ka mitmed esmase omataolise järgsed jaamad) ehitatakse tõenäoliselt kohapeal suuremas mahus kui hilisemad jaamad.

PROJEKTI RAKENDAMINE

Projekti edukaks läbiviimiseks on vajalik reaktori arendaja, omaniku ja peamiste tarnijate tihe koostöö projekti algusfaasis, et välja töötada kohaspetsiifiline disain, kvaliteetne projekti ajakava ja usaldusväärsed kuluprognoosid. Lisaks võivad omanik ja GEH sõlmida eraldi lepingu, mille alusel hangitakse pika tarneajaga komponente. Projekti arendamise algfaas on eriti kriitiline ja selle jooksul tehtud tööd vähendavad projekti riske ja toovad kasu ehitusetapile. Seda eriti juhul kui ehitatakse mitu üksust, võttes arvesse konkreetse organisatsiooni ja tarneahela õppekõverat.

On eeldatud et objekti arendamisel võetakse arvesse mitme üksuse paralleelse ehitamise puhul tekkivaid transpordi- ja logistikaküsimusi. Samuti eeldatakse, et märkimisväärselt väiksem ja lihtsam elektrijaama konstruktsioon, võrreldes suure tuumaelektrijaamaga, kajastub objekti logistilistes parendustes ja aitab ehitusajas kokku hoida.

GEH soovitab Eestisse tuumajaama rajamisel kasutada EPC lepingut (Engineering, Procurement and Construction). Nende nägemusel sõlmiksid GEH ja mõni tunnustatud tuumaenergeetika alal tegutsev alltöövõtja konsortsiumilepingu, moodustades koos EPC töövõtja. Eeldatakse, et lepinguline vastutusjaotus peegeldab iga osalise võimet konkreetsete projektiriskidega toime tulla. Samuti eeldatakse, et võetakse kasutusele lepingute sõlmimise parimad tavad, nt. kõigi osapoolte hästi kooskõlastatud eesmärgid (jõuda jaama ehitamise ja kasutuselevõtmise lõpuleviimiseni) ja kulude hindamine (vältida seiskumist, kui läbirääkimiste tõttu teatatakse tõenäolistest muudatustest).

Projektijuhtimise tõhusus aitab vältida viivitusi ehituses. Eeldatakse et omaniku moodustatud organisatsioonil on piisavalt ressursse, et tagada lepinguliste kohustuste pädevat juhtimist aja-, kulu- ja kvaliteedipiiranguid arvestades. Üldiselt ei ole väiksema suuruse ja keerukusega VMR-projekt võimalike probleemide suhtes nii tundlik ja on seetõttu paremini valmis viivitustega seotud riskide käsitlemiseks.

Kvaliteediküsimuste nõuetekohane haldamine tagab süsteemide, struktuuride ja komponentide vastavuse kohaldatavatele nõuetele, mis omakorda väldib negatiivset mõju projekti maksumusele ja ajakavale. Eeldatakse, et pädev reaktori tarneahel ja GEH tõendatud kvaliteedijuhtimine vastavad nendele ootustele. Omaniku peamine vahend regulaatori nõuetele vastavuse tagamiseks on korralik kvaliteedi tagamise programm koos protsesside ja protseduuridega mis on juhtimisse sisse integreeritud. Tarneahela nõuetekohane juhtimine ja järelevalve on keskne ka ehitustööde käigus tekkivate mittevastavuste vältimisel.

LITSENSEERIMINE, RAHASTUS JA VALITSUS

Eeldatakse, et Eestis on õigeaegselt olemas regulaator ja luuakse vajalik seadusandlus. Asjaolu, et BWRX-300 põhineb tõestatud kergveereaktori konstruktsioonil, hõlbustab loa taotlust isegi siis, kui puudub VMR-i reguleeriv seadusandlus. Samuti eeldatakse, et regulaatori ja omaniku vahel toimib tõhus kommunikatsioon. See on eduka litsenseerimise võti ja maandab projekti muudatuste ajalise venimise riski. Lisaks rakendatakse loataotlus dokumentides tehtud muudatuste tagajärgede hindamise protsessi, et hõlbustada reguleeriva asutuse võimet disaini muudatustega toime tulla.

Laenuandjate ja investorite veenmiseks on vaja ehitusviivituste riski maandamist ja elujõulise projekti väljatöötamist. Tänu märkimisväärselt madalamale investeerimiskulule ühiku kohta, võrreldes suure tuumaelektrijaamaga, on oodata ka erasektori juhitavat kapitali, st realistlikud on muud investorid peale kommunaalettevõtete.

Tuumajaama ehitus Eestis viib uute strateegiate ja regulatsiooni väljatöötamiseni, et tagada kodumaise tuumatööstuse areng ja valmisolek jaama komponentide tarnimiseks.

KOKKUVÕTE

GEH BWRX-300 jaama kasutuselevõtt on lähiajal teostatav tänu projekti hilisele arengufaasile, kuid ehitusprojekti ei plaanita alustada enne, kui USA-s või Kanadas on esmane omataoline jaam valmis ehitatud.

BWRX-300 on oma olemuselt loodud olema kergesti ehitatav. Pikaajalisest kogemusest teada probleemid, mis on viinud tuumajaamade ehitusprojektide venimiseni on välja selgitatud ja vastavad muutused jaama disaini tehtud, et tagada lühem ehitusaeg. Jaama projekt tugineb lihtsustatud, kuid küpsele BWR-tehnoloogiale, mis põhineb tõestatud komponentidel.

GEH väidab, et esimese Eesti BWRX-300 ehitusaeg on 36 kuud. Järgmiste üksuste ehitusaeg peaks eeldatavasti vähenema. Aruande üldine hinnang ehitatavusele on see, et Eestis on võimalik planeerida BWRX-300 36-kuulist ehitusgraafikut. Usaldusväärse ehitusgraafiku saavutamiseks tuleb siiski arvestada käesolevas aruandes esitatud hindamise tingimusi ja sätteid.

VÄIKESTE MOODULREAKTORITE HÄDAOLUKORRA PLANEERIMISTSOONID

Teostaja: KBFI Tuumateaduse ja -tehnoloogia töörühm

Euroopa Liit on seadnud eesmärgiks saavutada aastaks 2050 süsinikuneutraalsus, mille üheks võtmeküsimuseks on energiasektori puhastamine. Praegu toodavad tuumareaktorid 40-60% madala süsinikuheitmega elektrist Euroopas.

Populaarsust on saavutamas väiksed moodulreaktorid, mis tänu oma väiksusele, ohutusele, modulaarsusele ning madalamale maksumusele on võimalikud alternatiivid traditsioonilistele suurtele reaktoritele. Just väiksel ja modulaarsel reaktoritehnoloogial põhineva elektrijaama rajamist kaalub ka Fermi Energia.

Tuumaohutuse tagamiseks ning vajadusel tagajärgede leevendamise huvides on olulisel kohal riiklikul tasemel sätestatud tegevuskava, millele hädaolukorra puhkedes tugineda.

Üheks oluliseks osaks tegevuskavas on ohutusraadiuste planeerimine. Ohutusraadiuste vajalikkus või suurus sõltub kiirguskaitse nõuetest, reaktori ja jaama asukoha parameetritest ning demograafilistest näitajatest (suurlinnade lähedus jne).

Selle uuringu eesmärgiks on tutvustada ohutusraadiuseid puudutavaid regulatsioone, tavasid ning metoodikaid. Kuna mitmed väikeste moodulreaktorite tootjad väidavad, et uute tehnoloogiate puhul ei ole ulatu ohutusraadiused elektrijaama alalt väljapoole, siis käesolevas uuringus kirjeldatakse, millel põhinevad tootjate väited.

KIIRGUSKAITSE

Kõik kiirguskaitse piirmäärad põhinevad Rahvusvahelise Radioloogilise Kaitse Komisjoni (ICRP) ekspertide seatud piirväärtustel ja referentstasemetel. ICRP soovitusi järgib Rahvusvaheline Aatomienergia Agentuur (IAEA), mille standardid on aluseks omakorda riiklike regulaatorite poolt seatud määrustele.

ICRP piirväärtuste järgi võib tsiviilelanik tavaolukorras saada efektiivdoosi kuni 1 mSv aastas ning hädaolukorra puhul 20 kuni 100 mSv aastas.

Eesti seadusandlus järgib Euroopa Komisjoni direktiivi 2013/59/Euratom, mille kohaselt võib radioaktiivses keskkonnas töötav isik saada viie aasta jooksul kumulatiivselt efektiivdoosi kuni 100 mSv, kusjuures ühe aasta jooksul saadav doos ei tohi ületada 50 mSv.

Vastavad piirväärtused ei kehti meditsiinilistel kaalutlustel neeldunud dooside puhul, kuna sellisel juhul on mõjutatud isik sellest teadlik ning kurssi viidud võimalike tagajärgedega. Seega võivad

meditsiinilised doosid ületada tavalisele elanikule ettenähtud piirmäärasid kuni kiiritusest saadav kasu ületab võimaliku kahju. Maailma keskmine inimeses neeldunud doos on 3 mSv, millest 2,4 mSv on looduslikku päritolu. Ülejäänud 0,6 mSv pärineb suurel määral just meditsiinist.

REGULATSIOONID

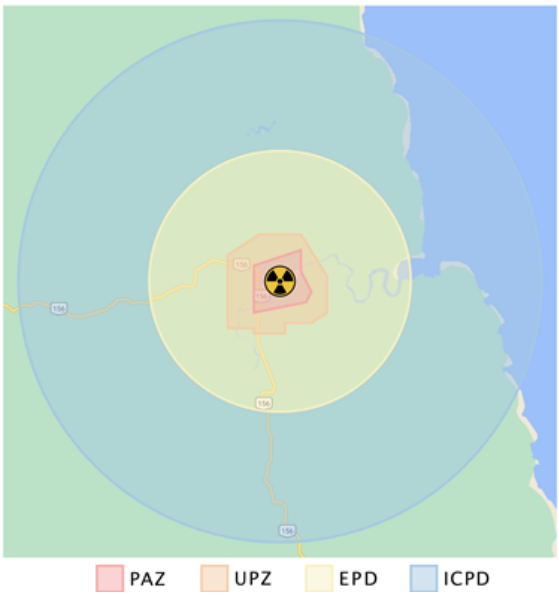
Rahvusvahelised hädaolukorra valmisoleku juhendmaterjalid põhinevad IAEA poolt sõnastatud juhenditel ning standarditel. Need ei ole kohustuslikud, vaid annavad ette raamistiku iga riigi vastutavale organisatsioonile.

IAEA poolt sõnastatud peamine ohutuseesmärk on “kaitsta inimesi ja keskkonda ioniseeriva radiatsiooni kahjulike efektide eest”. Selle eesmärgi saavutamise aluseks olev hädaolukorra valmisoleku ning reageerimise kava peab arvestama:

- hädaolukorra tekkimise tõenäosuse ning võimalike tagajärgedega,
- radiatsiooniga seotud riskide karakteristikutega,
- rajatiste ja tegevuste asukoha ning olemusega.

Iga riigi vastutav organisatsioon kujundab vastavalt IAEA kavale oma strateegia, mis arvestab riigi eripärasid, suurust ning muid faktoreid. Selle strateegia keskseks eesmärgiks on kiirgusdoosist tulenevate terviseriskide vältimine või minimaliseerimine.

IAEA kava üheks vahendiks on ohutusraadiused, mis defineerivad rajatisest määratud kaugusel hädaolukorra tekkides vajalike tegevuste kogumi. IAEA kirjeldab 4 erinevat regiooni (Joonis 7):



Joonis 7: IAEA poolt soovitatud hädaolukorra planeerimise tsoonid.

- Ettevaatusabinõu tsoon (*ingl. k. Precautionay Action Zone ehk PAZ*) - tsoonis peavad olema ettevalmistatud tegevused, mida saab alustada kohe pärast hädaolukorra väljakuulutamist ning enne ohtlike produktide lekkimist keskkonda.
- Kiireloomuliste ohutusmeetmete planeerimistsoon (*ingl. k. Urgent Protective action planning Zone ehk UPZ*) - tsooni ettevalmistatud tegevused võivad käivituda kas enne või pärast produktide keskkonda lekkimist, samas pidades silmas, et UPZ tegevustega ei kaasneks PAZ tegevuste edasilükkumine.
- Laiendatud planeerimiskaugus (*ingl. k. Extended Planning Distance ehk EPD*) - regioon, kus tuleb viia läbi monitooringuid saasteainete levimise osas, et tuvastada näiteks nn kiirguskolded.
- Allaneelamise ja toorainete planeerimiskaugus (*ingl. K. Ingestion and Commodities Planning Distance ehk ICPD*) - ala, kus tuleb eelnevalt planeerida tegevused, mille eesmärgiks on kaitsta ja analüüsida toidu- ja veevaru, et vältida kiirgusdoosi toiduainete tarbimise kaudu.

Kirjeldatud regioonidest kaks esimest (PAZ ja UPZ) defineeritakse hädaolukorra planeerimistsoonidena (ingl. k. Emergency Planning Zones ehk EPZ), mille määramise metodoloogia sõltub nii jaama kui asukoha omadustest.

Ehkki seni on EPZ-ide raadiused olnud määratud deterministlikult kõige raskema võimaliku õnnetuse järgi ehk pigem konservatiivselt, võimaldab IAEA soovitatud metodoloogia hinnata nende tsoonide suurusi ka tehnoloogia- ja riskipõhiselt, võttes arvesse erinevate reaktoritehnoloogiate eripärasid, kõrgendatud ohutust ja väiksemat kütusekogust. Ohuhinnagu riskipõhisus tähendab, et arvesse võetakse ka võimalike õnnetuste tõenäosuseid.

Euroopa tuumaenergeetika tööstust ja ohutust koordineerib Euroopa Aatomienergiaühendus ehk Euratom. Õiguslikult seisab Euratom Euroopa Liidust eraldi, kuid neil on ühised liikmesmaad ja ühendust administreerivad Euroopa Liidu institutsioonid. Ühendus koordineerib ohutust läbi üle-euroopaliste standardite, mis peavad olema vastu võetud kõikidel leppega liitunud riikidel.

RIIKLIKUD REGULAATORID

Riikliku regulaatori roll on tagada tuumaenergia ohutu, keskkonnasäästlik ning rahvusvahelistele standarditele vastav kasutamine. Regulaator teostab tuumarajatiste üle järelvalvet, kuid vastutus ohutuse eest lasub sellegi poolest tuumarajatise käitajal.

Eestis puudub riiklik regulaator, mistõttu pole ka juhendeid, millega määrata EPZ suuruseid. Olles aga liitunud Euratomi leppega, peab Eesti järgima Ühenduse direktiive ja standardeid, millest kõige tähtsam on juba “Kiirguskaitse” peatükis mainitud Direktiiv 2013/59/Euratom.

Ameerika Ühendriikide regulaator *United States Nuclear Regulatory Commission* ehk NRC on EPZ-idele seadnud kindlad väärtused lähtudes traditsioonilistest suurtest vesijahutusega reaktoritest. NRC regulatsiooni kohaselt kehtib praegu 10-miili suurune EPZ raadius, millele võib litsenseeritav taotleda erandi tegemist (gaasijahutusega või nimivõimsusega alla 250 MWth reaktorid). Kindlaksmääratud tsoonide suurused on sobivad riikides, kus on palju ühetaolisi reaktoreid ehk iga reaktori jaoks eraldi tsoonide analüüs oleks ebatõhus. Selline jäik lähenemine on aga ebasobiv riikides, kus kasutatakse erineva suuruse ja/või tehnoloogiaga reaktoreid.

NRC on välja töötamas uut hädaolukorra valmisoleku ning reageerimise kava, mis võtaksid arvesse väikeste moodulreaktorite ja teiste uudsete tehnoloogiate võimalusi. Uue kava kohaselt muutuks EPZ hinnang tehnoloogia- ja riskipõhiseks. See tähendab, et NRC kaotaks seni ettemääratud EPZ suuruste väärtused, vaid EPZ piiri määraks maksimaalne neeldunud doos (10 mSv) 96 tunni jooksul.

Kanada regulaator *Canadian Nuclear Safety Commission* ehk CNSC kasutab erinevalt NRC-le juba praegu riskipõhist metoodikat. CNSC raamistik määrab nõudmised ning juhendid, kuidas saavutada ettenähtud tulemust, kuid taotlejale jääb vabadus esitada seejuures oma nägemus lahendusest. CNSC ei määra üheselt EPZ-ide suuruseid. Tänu sellele on väikeste moodulreaktorite arendajatel juba täna võimalik tõestada tehnoloogiast tulenevate eeliste ülekandumist EPZ-ide määramisel, arvestades maksimaalset võimalikku neeldunud doosi.

Ühendkuningriigi regulaator *The Office for Nuclear Regulation* ehk ONR raamistik REPPIR uuendati aastatel 2019-2020 ja võtab arvesse arenevaid tehnoloogiaid. REPPIRi näol on tegemist hädaolukorra valmisoleku ning reageerimise kavaga, mis on riskipõhine ning ei sea tuumarajatiste EPZ-ide suurustele üheseid, eelnevalt kindlaks määratud väärtuseid. REPPIR võtab EPZ-ide suuruse hindamisel arvesse võimaliku õnnetuse tagajärgi ning tõenäosuseid. Tänu sellele on ONR-i raamistikust lähtuvalt võimalik ka teatud tingimustel jaama piiridest väljaulatuvate EPZ-ide ärajätmine.

REAKTORID

NuScale Power Module (NuScale Power LLC)

Ameerika firma NuScale Power poolt disainitud lahendus põhineb 77 MWe NuScale Power moodulil (NPM). Ühes jaamas võib olla 4-12 NPMi. Moodulid valmistatakse tehastes ning on transporditavad mistahes viisil.

NPM põhineb integraalsel surveveereaktori disainil, mille kõik komponendid jäävad ühe surveanuma sisse, et õnnetuse korral vältida radioaktiivsete heitmete sattumist keskkonda. Kõik NPMid asuvad basseinis, mis tagab õnnetuse korral pikaaegse jahutuse.

NuScale'i jaama kõrgem ohutus võrreldes olemasolevate jaamadega on saavutatud tänu passiivsetele süsteemidele, lihtsustatud disainile ja väiksemale kütusekogusele. Tänu integraalsele disainile ei ole

reaktoril vaja pumpasid. Tänu passiivsetele ohutussüsteemidele puudub hädaolukorras vajadus välise elektrivoolu või inimese sekkumise järele.

NuScale'i hinnangute kohaselt piirneb nende EPZ tänu kõrgendatud ohutusele ja madalamale allikatunnusele[3] tuumajaama alaga, mille raadiuseks on 0,5 kilomeetrit. NRC ei avastanud ka ülevaatuse käigus ühtegi tõenäolist olukorda, mis mõjutaks korraga mitut moodulit ja nõuaks niisiis modulaarsuse tõttu territooriumivälist EPZi.

NuScale reaktoritehnoloogia on ainus selles analüüsis käsitletud väike moodulreaktor, mis on läbinud sertifitseerimise ja saanud regulaatoripoolse heakskiidu.

BWRX-300 (General Electric-Hitachi)

GE-Hitachi Nuclear Energy väikene keevveereaktor BWRX-300 põhineb GE-Hitachi poolt arendatud ESBWR (NRC poolt litsenseeritud aastal 2014) disainil.

BWRX-300 ohutuse filosoofia põhineb olemuslikul passiivsel ohutusel. Seadmete suuruse ning hädaolukorraks kasutatava jahutusvee rohkuse tõttu puudub BWRX-300 vajadus välise elektrivõimsuse järele. Kui tavaolukorras töötab jaam küll aktiivsete süsteemide abil, siis vajadusel on tagatud ohutus ka täielikult passiivselt.

BWRX-300 litsenseerimise aluseks Ameerika Ühendriikides on ESBWRi olemasolev litsents. See tähendab, et GE-Hitachi esitab NRC-le suurimad erinevused juba litsenseeritud reaktoritehnoloogiast. Esimene litsentsi aktualiseerimine (LTR) esitati detsembris 2019 ning NRC kinnitas selle detsembris 2020. Praegu ootavad NRC kinnitust veel kolm LTRi. GE-Hitachi valmistab litsenseerimise avaldust ette ka Kanadas ja Ühendkuningriikides.

BWRX-300 disain ei ole lõplikult kinnitatud, mistõttu puuduvad ka allikatunnuse ning hädaolukorra planeerimise tsoonide suuruste hinnangud. Arendaja hinnangul on EPZ suurus sarnane USAs Tennesse Valley Authority varajase asukoha litsenseerimise protsessis nähtuga ehk vastab jaama perimeetrile.

Integral Molten Salt Reactor (Terrestrial Energy Inc)

Integral Molten Salt Reactor (IMSR) ehk Integraalne Sulasoolareaktor on disainitud Kanada firma Terrestrial Energy Inc (TEI) poolt. IMSRis kasutab aeglustina grafiiti ning see töötab aeglaste neutronite spektril. Reaktori võimsus on 195 MWe või 440 MWt. Disaini kohaselt on IMSR jaam ette nähtud

[3] Allikatunnus - tuumarajatisest lekkinud (või on postuleeritult lekkinud) radioaktiivse materjali kogus ja isotoopne koostis. Allikatunnus võib sisaldada selle aine hulka, koostist, väljavoolu kiirust ja viisi.

töötama kahe IMSR tuumaüksusega, mis on väljavahetatavad iga 7 aasta tagant. Ülejäänud jaam ei vaja väljavahetamist terve eluaja jooksul.

IMSR ohutus seisneb reaktori omases passiivsuses. See tähendab, et kuna kütusena kasutatav madala rikastusastmega (<5%) uraan on lahustatud sulasoola, siis konvektsiooni abil ülekanduva soojuse tagajärjel on temperatuurigradiendid võrreldes vesijahutusega reaktoritega tunduvalt madalamad. Lisaks töötab reaktor atmosfäärirõhul, mistõttu ei ole vaja ka kõrgrõhukindlaid ohutussüsteeme. Vedelas olekus fluoriidsoolad on väga kõrge keemistemperatuuriga, madala aururõhuga ning moodustavad tugevaid sidemeid radioaktiivsete lõhustumisproduktidega. Selle tagajärjel eralduvad sulasoolast ainult väärisgaasid nagu ksenoon ja krüptoon, mida töö käidus pidevalt välja filtreeritakse.

Kõige kaugemal on IMSR litsenseerimisprotsess Kanadas, kus on kolmest litsenseerimisetapist läbitud esimene (aastal 2017) ning teine on CNSC poolt ülevaatamisel. Ameerika Ühendriikides toimuvad ettevalmistused litsenseerimisprotsessiga alustamiseks.

Kuigi lõplikke allikatunnuseid ning hädaolukorra planeerimise tsoonide suuruste hinnanguid ei ole sõnastatud, siis usub TEI, et territooriumiväline EPZ ei ole vajalik lähtudes eelkõige oluliselt väiksemast allikatunnusest kui traditsiooniliste vesijahutusega reaktorite puhul.

MMR (Ultra Safe Nuclear Company)

Micro Modular Reactor (MMR) on heeliumjahutusega kõrgtemperatuuriline reaktor, mille arendajaks on Ultra Safe Nuclear Company (USNC). USNC arendab kaht madala võimsusega (15 MWt või 5 MWe ja 30 MWt või 10 MWe) MMRi.

MMR kasutab TRISO kütust, mille eelis seisneb tuumkütuse südamiku ümber olevates keraamilistes kihtides, mis peavad väga hästi kinni lenduvaid lõhustumisprodukte. USNC on arendanud kütusetehnoloogiat, seades TRISO osakesed ränikarbiidist koostusse, mida nad nimetavad *Fully Ceramic Micro-Encapsulated* (FCM) kütuseks.

MMRi ohutus seisneb FCMi omaduses minimaliseerida lõhustumisproduktide lendumist ning oluliselt väiksemas nimivõimsuses. Esmased ohutusanalüüsid näitavad, et kütuse, survepaagi ning reaktorihoone temperatuurid jäävad lubatud piiridesse nii tava- kui ka hädaolukordades.

USNC litsenseerimisprotsess on käimas Kanadas, kus kolmest vajalikust etapist on läbitud esimene. Seejuures on CNSC nõudnud täiendavat informatsiooni, kuna MMRi puhul on tegemist esimese omalaadse reaktoriga.

USNC ei ole veel MMRi litsenseerimisprotsessi käigus jõudnud anda lõplikke hinnanguid allikatunnuste ja EPZide suuruste kohta, kuid UNSC väitel näitavad senised arvutused, et jaama territooriumist väljaulatuv EPZ on mittevajalik.

UK SMR (Rolls Royce)

UK SMR on Briti tuumatööstuse-, inseneeria- ja taristufirmade koostööprojekt, mida juhib Rolls Royce. UK SMR on kolmekontuuriline 450 MWe võimsusega surveveereaktor. UK SMR kasutab kuni 4,95% rikastusega UO2 kütust. Tuumasüdamiku disain põhineb traditsioonilisel surveveereaktori tehnoloogial. Aeglustiks ja soojuskandjaks olev vesi liigub pumpade abil. Reaktor on täielikult modulaarne ning jaama ehitustähtajaks on eeldatud 4 aastat.

UK SMRi ohutus põhineb aktiivsete ja passiivsete ohutussüsteemide koostöös. Seejuures on suurem roll just passiivsetel ohutuslahendustel, mistõttu ei suurene õnnetuse risk inimfaktori või välise elektrivõimsuse puudumise tagajärjel. Esialgne tõenäosuslik ohutusanalüüs näitab, et tuumasüdamiku kahjustumise tõenäosus jääb alla 1 x 10^{-7} tööaasta kohta. See väärtus on rohkem kui 10 korda madalam, kui on ONRi poolt nõutud määr.

Praegusel hetkel ei ole veel hinnatud UK SMRi hädaolukorra planeerimise tsoonide ulatusi. Samuti ei ole tehtud ka allikatunnuste ja maksimaalsete võimalike dooside hinnanguid lähtudes UK SMRi disainist. Kuna disain põhineb traditsioonilisel surveveereaktoril, siis on praeguses faasis lähtutud esialgsete hinnangute tegemisel olemasolevate reaktorite kogemustest.

NÄIDE: ASUKOHA ANALÜÜS TENNESSEE VALLEY AUTHORITY VÄIKEREAKTORI PROJEKTIS

Kõige asjakohasem näide VMRide asukohavaliku protsessi kohta on USA regionaalse tööstus- ja energeetikaettevõtte Tennessee Valley Authority (TVA) plaan rajada tuumajaam Clinch River Nuclear (CRN) piirkonda. 2016.a. mais esitas TVA USA tuumaregulaatorile NRC avalduse asukoha eelloa (*ingl. k. Early Site Permit ehk ESP*) taotlemiseks kahe või enama väikse moodulreaktori rajamiseks. Taotluses kirjeldati mooduleid koguvõimsusega kuni 800 MWe (elektriline) või 2420 MWth (termiline).

Kuna asukoha sobivuse analüüsimise hetkeks konkreetset tehnoloogiat valitud ei ole, kasutas TVA nn tehnoloogia kriteeriumite põhist lähenemist (*Plant Parameter Envelope ehk PPE*). PPE määrab ääretingimused, mida asukoha uuringutes ja analüüsides kasutatakse ehk hinnatakse sisuliselt kõikide eelseatud kriteeriumitele vastavate reaktorite sobivust kaalutavasse asukohta. PPE kirjeldab reaktori ja jaama süsteemidest tulenevaid parameetreid, millele tulevikus rajatav tuumajaam peab vastama, ohutuse ja keskkonnamõjude hinnangute tegemiseks piisava detailsusega.

Küll aga peab TVA jaama ehitamiseks ja käitamiseks taotlema NRC-lt eraldi vastavaid lubasid juba ja saama neile heakskiidu kasutades juba konkreetse tehnoloogia andmeid (tehnoloogia valik hõlmab lisaks asukohale mitmeid muid kaalutlusi).

ESP taotlemise hetkel teatas TVA, et kaalumisel on neli kergvee tehnoloogial põhinevat VMRi:

- BWX Technologies, Inc. (BWXT) mPower™ (Generation mPower LLC arendus),
- NuScale (NuScale Power, LLC arendus),
- SMR-160 (Holtec SMR, LLC arendus), ja
- Westinghouse SMR (Westinghouse Electric Company, LLC arendus).

Kõiki nelja reaktorit iseloomustab suuremahuline passiivsete süsteemide kasutamine, mis vähendab või elimineerib jaamavälise elektritoite, veevarustuse või inimeste sekkumise vajaduse. Väikestele jaamadele omane kõrgendatud olemuslik ohutus ja väiksem allikatunnus (radioaktiivsete materjalide kogus ja kirjeldus) tähendab ka väiksemaid õnnetuste toimumise tõenäosusi ja tagajärgi. Sellest tulenevalt on ka projekteerimisel postuleeritavate õnnetusjuhtumite (*Design Basis Accident ehk DBA*) nimekiri lühem ning projekteerimisel mitte arvesse võetud olukordade (*Design Extended Conditions ehk DEC*) tõenäosus madalam.

TVA poolt esitatud andmete põhjal viis NRC läbi konservatiivse analüüsi (võttes arvesse suurimat riski PPEsse kuuluvate tehnoloogiate üleselt) jaama ümbritseva eraldustsooni (*Exclusion Area Boundary ehk EAB*) ja madala asustustihedusega tsooni (*Low Population Zone ehk LPZ*) suuruste osas. TVA soovis oma taotluses hinnata kahte erinevat võimalikku radioaktiivse aine levikuga seotud ohutustsooni suurust: i) jaama ümbritsev piire, ja ii) 2 miili raadiusega jaama ümbritsev ala. Need alad (EAP, LPZ) saab hiljem ehitus- ja käiduloa menetlemisel avariiplaneerimistsooni suuruse määramisel aluseks võtta.

Eraldustsoon (EAB) suuruse hindamisel lähtuti tingimusest, et õnnetuse korral ei tohiks EABs viibiv inimene saada kahe tunni jooksul üle 250 mSv efektiivdoosi. Tuginedes TVA andmetele, nõustus NRC TVA väitega, et eraldustsoon piirdub tuumajaama kinnistu piiridega.

Madala asustustihedusega tsooni (LPZ) suuruse hindamisel lähtuti elanikkonna jaotumisest uuritava ala läheduses, kusjuures võeti arvesse ka inimeste liikumist ning migratsiooni järgneva 40 aasta jooksul. NRC määruse kohaselt ei tohi LPZ alas olev inimene saada terve õnnetuse toimumise aja jooksul saada üle 250 mSv efektiivdoosi. NRC analüüsi tulemusena sõnastati, et LPZi raadiuseks piisab 1 miilist (1,6 km) tuumajaama keskpunktist.

KOKKUVÕTE

Hädaolukorra valmisoleku ning reageerimise kava on riiklikul tasemel vajalik, et tagada inimeste ja keskkonna kaitstus tööstuse võimalike negatiivsete efektide eest. Sellised kavad pole ainulaadsed vaid tuumasektoris, vaid on tähtsal kohal ka näiteks keemiatööstuses.

Kiirguskaitselisest seisukohast juhindutakse maailmas eelkõige ICRP soovitustest ning piirväärtustest. Vastavad määrad on omaks võtnud läbi IAEA ja Euratomi standardite ka Eesti.

Üheks oluliseks osaks hädaolukorra valmisoleku ning reageerimise kavas on hädaolukorra planeerimise tsoonide määramine sõltuvalt tsooni eesmärgist. Tsoone nimetatakse ning määratakse erinevates riikides küll erinevalt, kuid nende funktsioonid on sarnased. Uuritud riikide (USA, Kanada, UK) regulaatorid kõik on kas muutnud või muutmas vastavaid hädaolukorra valmisoleku ning reageerimise kava puudutavaid regulatsioone, et need võtaksid arvesse väikeste moodulreaktorite arenenud tehnoloogilisi võimalusi. Tuleb silmas pidada, et IAEA juhendid on suhteliselt paindlikud juba täna ning rakendatavad erinevatele reaktoritehnoloogiatele võttes arvesse nende eripära ja keskendudes riskide hindamisele.

Tuginedes teaduslikele tulemustele on territooriumiga piirnevad hädaolukorra planeerimise tsoonid realistlikud. Lõpliku hinnangu saab reaktoritehnoloogia kohta anda aga alles siis, kui on teada ka jaama kindel asukoht ja sellest sõltuvad muutujad.

KVALITATIIVNE GEOLOOGILISE VALMISOLEKU HINNANG DEEP ISOLATIONI PUURAUGULAHENDUSELE EESTIS

Teostaja: Deep Isolation

KOKKUVÕTE

Kontekst

Kuna Eesti on seisukohal, et arenenud tuumaenergia tootmine võib mängida riigi madala süsinikusisaldusega tuleviku saavutamisel olulist rolli, peavad kodanikud ja poliitikakujundajad olema kindlad, et Eesti jaoks on olemas ohutu ja taskukohane viis, kuidas ladustada tekkinud kasutatud tuumkütust. Nendest kaalutlustest teavitamiseks esitab see aruanne tulemused esialgsest uuringust Deep Isolationi süvapuurauk-lõppladustuse lahenduse sobivuse kohta Eesti geoloogias.

Deep Isolationi lahendus

Deep Isolation pakub süvahoidlasse lõppladustamise eeliseid, kuid ainult murdosaga mõne Euroopa riigi, näiteks Soome, Rootsi ja Prantsusmaa ehitatavate suurte kaevandatud hoidlate maksumusest. Deep Isolationi lahenduse puhul paigutatakse jäätmed korrosioonikindlates kanistrites sügavatesse puuraukudesse, mis on puuritud süvakivimitesse, mis on olnud biosfäärist eraldatud miljon või enam aastat. Jäätmeid saab vajaduse korral mitu aastakümmet välja võtta või jäädavalt ja ohutult maa alla jätta (s.t ladustada). Selline ladustamine võib toimuda jäätmeid tekitavas tuumaelektrijaamas või selle läheduses, mille puhul ei ole vaja jäätmeid transportida läbi elurajoonide.

Peamised eelised Eesti jaoks

Deep Isolationi lahendus on murranguline uuendus, mis muudab kogu maailma valitsuste ja avalikkuse arvamust tuumajäätmetest. Meie esialgne uuring viitab sellele, et Eesti jaoks on peamised eelised muu hulgas järgmised:

Ohutus: Eestis asuv Deep Isolationi hoidla paikneks kristallilises aluskivimis. Meie esialgsete arvutuste ja planeerimiste tulemus näitab, et lõpphoidla kasutatud tuumkütuse ladustamiseks sarnastes geoloogilistes oludes tagab kindla ohutuse. Selles mudelis liigub maksimaalne doos pinna biosfääri 1,3 miljoni aasta pärast ja umbes kolme suurusjärgu võrra madalamana kui seda nõuavad volitatud asutused.

Taskukohasus: kõrgtehnoloogiliste reaktorite (näiteks Eestis kaalutlusel oleva väikse moodulreaktori) kasutatud tuumkütuse ladustamise kulud moodustavad 24–31% traditsioonilise kaevandatava hoidla ladustamise kuludest[4].

[4] Põhineb hiljutistel USA turu-uuringutel, mille tegi Deep Isolation koostöös USA arenenud tuumaettevõtete ja Electronic Power Research Instituudiga. („Borehole Co-Location of Advanced Reactors for Onsite Management of Spent Nuclear Fuel“, EPRI, detsember 2020 / „Puuraugu ühiskasutatavus koos täiustatud reaktoritega kasutatud tuumkütuse kohapeal haldamiseks“, EPRI, detsember 2020).

Paindlikkus: selles esialgses uuringus leiti, et tuumajäätmete paigutamisel sügavale horisontaalsesse puurauku ei ole Eestis põhimõttelisi geoloogilisi piiranguid ning et on olemas lai valik asukohti, mille vastavust IAEA geoloogilise ladustamise ohutusnõuetele võib tõestada. Meie soovituste kohaselt oleksid optimaalsed alad, kuhu asukoha valikuprotsess keskenduda, Eesti kirdeosas (koos selle ranniku lähedal asuvate saartega). Nendes piirkondades on nii ohutuse seisukohalt eelistatud geoloogilised tingimused, varasemate puuraukude tõttu olemasolevad ulatuslikumad maa-aluse pinna andmed kui ka tõendid kulutõhusa puurimise kohta.

Lihtne ja etapiviisiline teostamine: Deep Isolationi lahenduse modulaarsus võimaldab järkjärgulist ladustamist. Võimalik on kasutada etapiviisilist lähenemist, alustades vaid ühest puuraugust. Meie teostusaeg võib olla palju lühem kui mitme kümnendi ajakava, mis on vajalik kaevandatud hoidla ehitamiseks.

Edasised tegevused

Vaja on ulatuslikku täiendavat tööd konkreetsete potentsiaalsete kohtade tuvastamiseks ja iseloomustamiseks ning potentsiaalsete ümbritsevate kogukondadega suhtlemiseks. Meie soovitused selle kohta, kuidas sellega Eestis kõige paremini jätkata, on esitatud aruandes ja loodame selleks teha koostööd sidusrühmadega üle Eesti.

SISSEJUHATUS

Selle uuringu eesmärk on hinnata Deep Isolationi horisontaalsesse puurauku ladustamise sobivust väikse moodulreaktori kasutatud tuumkütuse ladustamiseks Eesti tingimustes. Uuringu on teostanud Deep Isolation EMEA, keda on kohalikul tasandil toetanud inseneribüroo STEIGER OÜ (Eesti peamine geoloogia- ja puurimisettevõte) ning tellinud Fermi Energia.

See on meie aruande lühendatud versioon. Täisversioon koos täiendava analüüsi ja üksikasjalikumate soovitustega avaldatakse pärast seda, kui meil on olnud võimalus neid Eesti valitsusega arutada.

Kontekst

Eesti on pühendunud süsinikuneutraalsele tulevikule: riigi visioon aastaks 2035 on olla täielikult energiasõltumatu ning toota kogu elekter puhtalt, ohutult, taskukohaselt ja süsinikuneutraalselt.

Selle visiooni toetamiseks loodi 2019. aastal erasektori ettevõte Fermi Energia, et juhtida riiklikku elektritootmist viisil, mis toetab riigi kliimaeesmärke. Fermi Energia töötab välja ettepanekuid väikses moodulreaktoris vähese süsinikdioksiidiheitega tuumaenergia tootmiseks Eestis.

Nende ambitsioonikate eesmärkide realiseerimisel mõistab Fermi Energia, et Eestil peab olema selge, mõistlik ja teostatav lahendus tekkivate radioaktiivsete jäätmete ladustamiseks. Ajalooliselt ei ole paljud teised riigid üle maailma veel radioaktiivsete jäätmete ladustamist tõhusalt korraldanud. Hoolimata

kommertsliku tuumaenergia tootmisest juba 1950. aastatel, pole ühtegi ülemaailmset kasutatud tuumkütuse varu lõplikult ladustatud. Neid hoitakse ajutistes ladustamiskohtades, mille kasutamine on äärmiselt kulukas ja kohalike kogukondade jaoks jätkuvalt keeruline. Seetõttu on see õigustatud mure Eesti kodanike jaoks see, kui kaalutakse väikse moodulreaktori tehnoloogia rakendamist.

Üks on selge: valitsuste, volitatud asutuste, teadlaste ja tuumatööstuse vahel valitseb ülemaailmne üksmeel, et ainus ohutu lahendus nende jäätmete pikaajaliseks ladustamiseks on lõppladustamine süvahoidlasse (vt Joonis 8). See tähendab, et jäätmed suletakse mitmesse konteinerisse ja seejärel maetakse sügavale maa alla – kusjuures maa sees peituvad kivimid ise toimivad ülima ja parima barjäärina.

Joonis 8: Geoloogiline ladustamine on ohutu lahendus kõrgradioaktiivsete tuumajäätmetele.

Kuid peamine barjäär, mis pärsib sellel alal globaalset arengut, on maksumus: praegune süvahoidlasse lõppladustamise mudel, mis hõlmab massiivsete maa-aluste hoidlate kaevandamist, on keeruline ja kulukas. Ainult vähestel riikidel on nii ulatuslike ehitusprojektide osas kaugele väljatöötatud plaanid ja ükski selline rajatis ei tööta veel kusagil maailmas.

Sellest kontekstist lähtuvalt on Fermi Energia palunud Deep Isolationil teha uuringu meie alternatiivse madalama maksumusega süvahoidlasse lõppladustamise lahenduse sobivuse kohta Eesti geoloogilises keskkonnas.

DEEP ISOLATIONI TEHNILINE LAHENDUS

Ülevaade

Eesti jaoks väljatöötatud Deep Isolationi lahendusega paigutatakse korrosioonikindlad kanistrid, mis sisaldavad tuumajäätmeid, pikka horisontaalsesse puurauku 1–3 kilomeetri sügavusele maa alla[5].

Seda tehakse, ühendades kaks olulist tehnoloogilise innovatsiooni ja teaduse edendamise tõukejõudu, mis on nüüd kättesaadavaks saamas:

- **Uuenduslik puurimine**. Kasutades tõestatud suundpuurimistehnoloogiat, saab horisontaalsed puuraugud puurida settekivimitesse, tard- või moondekivimitesse. Miljard tonni kivimit pinna ja maetud jäätmete vahel (asuvad horisontaalses sektsioonis) moodustavad nii püsiva kui ka loodusliku barjääri, mis ületab inimeste tervise ja keskkonnamõju standardeid mitme suurusjärgu võrra ja mida meie lahenduses täiendatakse mitmekordsete ehitatud barjääridega.
- **Teaduslikud edusammud maa-aluste kihtide geofüüsikalises ja geoloogilises analüüsis**. Need võimaldavad meil leida sobivaid ümbriskivimeid erinevates geoloogilistes keskkondades ja näidata, et need on madala läbilaskvusega geoloogilised kivimimoodustised, mis on miljoneid aastaid püsinud stabiilsena ning inimestest ja keskkonnast isoleerituna.

Deep Isolationi tehnilise lahenduse põhiomadused on järgmised:

- **Ohutus on sügavuses:** 1–3 km sügavusele ladustamine pakub kaitset kliimamuutuste ja muude looduslike protsesside pikaajaliste mõjude eest, mis võivad hoidlat kahjustada. Suurem sügavus vähendab ka inimeste tahtmatute ja potentsiaalselt pahatahtlike sissetungidega seotud riske. Paljudele kivimimoodustistele omased sorptiivsed ja hüdroloogilised omadused piiravad enamiku radionukliidide liikuvust. Sobivalt paigutatud hoidlates aitab sorptsiooni ja pika tee kombinatsioon läbi geosfääri kuni pinnani (1–3 kilomeetrit) ning liikuvate radionukliidide (nt ^{129}I, ^{36}Cl, ^{79}Se) aeglane, sageli difusiooniga piiratud ränne kaasa madalate tipudooside tekkele pinnal. Meie mudelil on inimesele ligipääsetavas biosfääris tüüpilised tipudoosid mitme suurusjärgu võrra madalamad piirmääradest, mida volitatud asutused peavad ohutuks. Enamik radioaktiivseid jäätmeid kas

[5] Võttes arvesse ladustamiseks vajaliku inventari või konkreetset ladustamiseks määratud koha eripära, võime mõnel juhul soovitada vertikaalset puurauku. Enamikul juhtudel usume siiski, et meie aruande selles osas toodud põhjustel on horisontaalne jäätmete ladustamise variant optimaalne lähenemisviis.

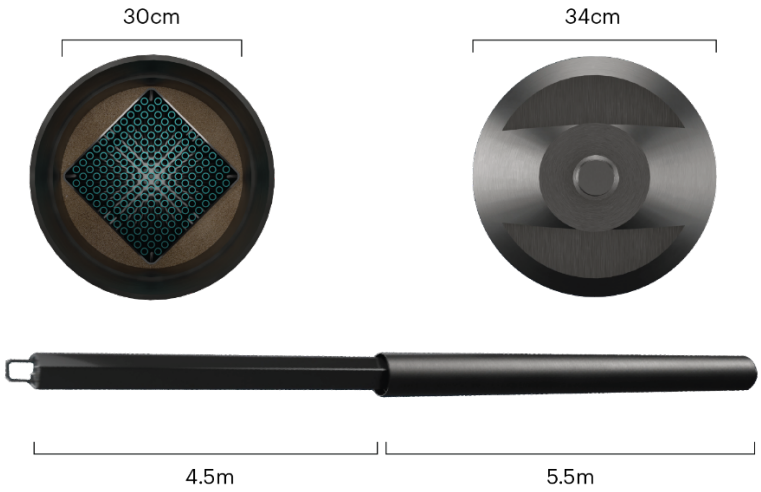
laguneb maa-aluses konstrueeritud barjäärisüsteemis (jäätmevorm ja kanister) või pika rände ajal jäätmesektsioonist ligipääsetavasse keskkonda või lukustatakse püsivalt geosfääri.

- **Väljakujunenud tehnoloogiad:** selle süvahoidla ohutuse tagame väljakujunenud tehnoloogiatega, mida kasutatakse laialdaselt kogu nafta- ja gaasisektoris ning mida oleme integreerinud ja täiustanud oma patenteeritud uuendustega. Suundpuurimistehnoloogia areng on muutnud sügavad horisontaalsed puuraugud usaldusväärseks, tavaliseks ja suhteliselt odavaks. USAs on ajavahemikul 2007–2018 puuritud enam kui 120 000 horisontaalset kaevu, mille tavalised sügavused on 0,5 kuni 3 kilomeetrit ning pikkused 4 kilomeetrit või rohkem[6].

Mitmekordsed ehitatud barjäärid: ehkki geosfääri omadused ja hoidlate suur sügavus on pikaajalise miljoni aasta pikkuse ohutuse jaoks kesksel kohal, on lahendusel mitmeid elemente, mis aitavad kaasa lühemaajalisele ohutusele. Need ehitatud barjäärid täidavad olulisi ohutusfunktsioone hoidla paigaldamise ja sulgemise eelses etapis ning tagavad täiendava pikaajalise kaitset pärast hoidla sulgemist. Need tagavad paigutamise ajal isolatsiooni ja kaitse ning eraldavad jäätmevormid geosfäärist aastatuhandeteks. Eeldatakse, et nikkel-kroom-molübdeenisulamid (sulam 22 – UNS N0622 ja sulam 625 –

[6] https://www.eia.gov/

UNS N06625) on soolalahuses väga stabiilsed, vähendades eeldatavaid tingimusi Eesti kristalses aluskorras[7].



Joonis 9: Standardne Deep Isolationi jäätmekanister[8].

- **Kättesaadavus**: puuraukudest kättesaamise tehnoloogia on kõrgelt arenenud ja soovi korral on võimalik jäätmekanistreid sulgemiseelses etapis kätte saada veel mitu aastakümmet. Puurimistööstuses on esemete kättesaamine süvapuuraukudest tavapärane, sealhulgas raskendatud kättesaamine. Deep Isolation tugineb sellele valdkonna kogemusele ja töötab välja täiendavaid kättesaamise tehnoloogiaid, mis on kohandatud just meie tehnoloogiale. Võimalus jäätmeid horisontaalsetest puuraukudest kätte saada on algusest peale olnud Deep Isolationi lahenduse osa, sealhulgas üldine patenteeritud horisontaalne puuraugulahendus ning meie paigaldus- ja väljavõtusüsteemid. Esmase põhimõttelise tõendina oleme näidanud, et väikeste ladustamiskanistrite kättesaamine on lihtne. Seda illustreerib lühivideo aadressil https://www.youtube.com/watch?v=3GZ4TC8ttbE.
- **Teostamise kiirus**: valitsused, kes tegelevad praegu kaevandatud geoloogiliste ladustamisrajatiste arendamisega, mõõdavad nende kavandamise ja ehitamise ajakava aastakümnetega. Osaliselt on see tingitud avalike arutelude ja volitatud asutuse järelevalve jaoks vajalikust pikast ajakavast, mis on üldjoontes sarnane nii kaevandatud rajatiste kui ka

[7] Oma praegustes kanistrite korrosioonianalüüsides ei ole me keskendunud mitte kristalsele aluskorrale, vaid „üldisele“ kiltkivi geokeemilisele keskkonnale, kus kaalutleme paljusid sulameid. Näiteks meie esialgne korrosioonianalüüs sulami 625 kohta näitab passiivse korrosiooni tingimustes eluiga, mis on pikem kui 40 000 aastat (Payer, J; Finsterle, S; Apps, J; Muller, RA Corrosion performance of the engineered barrier system in deep horizontal drillholes / Korrosiooni esinemine konstrueeritud tõkkesüsteemil sügavates horisontaalsetes puuraukudes. Energies 2019, 12, 1491). Värskem uuring sulami 22 kohta prognoosib rohkem kui 500 000 aasta pikkust ajavahemiku 1 cm paksuse kanistri passiivsele korrosioonile 1 km sügavusel nominaalses kiltkivikeskkonnas (Macdonald, Digby. „The general Corrosion of Alloy 22 / Sulami 22 üldine korrosioon“, Deep Isolationi sisearuanne, 2020).

[8] Vasakul üleval on kasutatud tuumkütuse koostu hoidmise ristlõiget. Paremal üleval on otsakork. All kuvatakse komplekti paigutamist kanistrisse.

puuraukude jaoks. Kuid ka pärast seadusliku heakskiidu saamist on kaevandatud rajatise ehitamine ja käikulaskmine väga pikk protsess. Näiteks näitab Kanada, Rootsi ja USA valitsuste avaldatud plaanide analüüs[9]:

- Keskmiselt 1 aasta seadusandliku heakskiidu ja ehituse alguse vahel.
- Keskmine ehitusperiood 8,3 aastat.
- Keskmine jäätmete paigaldamise periood 10 aastat.

Deep Isolationi lahendusega saab seevastu iga puuraugu puurida mõne nädalaga[10], mis võimaldab ladustamistoiminguid alustada vähem kui aasta pärast seaduslikku heakskiitu.

JÄRELDUSED MEIE EESTI UURINGUST

Metoodika

Koostöös kohalike geoloogiaekspertide ja Inseneribürooga STEIGER OÜ oleme teinud uurimistöö ja hindamise, viies läbi esialgse sõeluuringu selle kohta, millises ulatuses on Eestis Deep Isolationi jäätmehoidla jaoks sobivaid geoloogilisi tingimusi. Meie lähtepunkt oli kaaluda kogu Eesti ala, vaadates nii:

- **ohutust**: kuivõrd sügavuses eeldatavad geoloogilised ja hüdroloogilised tingimused toetavad radionukliidide eraldamist biosfäärist,
- **teostatavust**: mil määral soodustab geoloogia kulutõhusat puurimist ja Deep Isolationi hoidla ehitamist.

Allpool esitatud Joonis 10 illustreerib meie kõrgetasemelisi hindamiskriteeriume. Ohutusuuringu hindamiseks kasutasime kriteeriume, mis on kooskõlas IAEA ohutusstandarditega[11] sätestatud geoloogiliste ladustamiskohtade nõuetega: seismilisus, geotermiline soojusvoog / vulkanism, kliimamuutus ja paleohüdroloogia.

[9] Vt Deep Isolation: An introduction for policy-makers / Tutvustav sissejuhatus poliitikakujundajatele, mai 2020

[10] Üksikasjalik ajastus varieerub sõltudes geoloogiast ja kohaspetsiifilistest tingimustest. Viimased horisontaalsed puurimised avamerel Vietnami keerulises kristalses aluskorras, mis on sarnane, kuid noorem kui Eesti paleoproterosoikumi kivimid, mida sisaldab siinne kristalne aluskord, on näidanud, et 3000 m horisontaalse lõigu umbes 2 km sügavusel (nii pikem ja sügavam kui Deep Isolationi hoidlas) saab puurida vähem kui 45 päevaga.

[11] IAEA ohutusstandardid SSG-14; radioaktiivsete jäätmete geoloogilise ladustamise rajatised

Geoloogiliste sõeluuringute kriteeriumid

Ohutuse hindamine	Seismilisus	Kas sügav geosfäär on ajalooliselt stabiilne häirivate seismiliste sündmuste korral?
	Geotermiline soojusvoog/ vulkaanilisus	Kas on oht, et vulkaaniline tegevus võib sügavat hoidlat häirida?
	Kliimamuutus	Kas minevikus toimunud jäätumine ja eeldatavad pikaajalised tulevikutrendid viitavad biosfääriga kokkupuutumise riskile?
	Paleohüdroloogia	Kas sügavamal olev hüdroloogiline keskkond on miljoneid aastaid pinnaveest eraldatud?
Teostatavuse hindamine	Asukoha iseloomustus	Kas on olemas puuraukude kohta andmeid, et anda meile teavet kivimite tingimuste kohta ja takistustest, mis võivad edukat puurimist häirida?
	Puurimine	Kas me saame selles geoloogilises olus kulutõhusalt puurida?

Joonis 10: Kõrgetasemelised hindamiskriteeriumid.

Järgmisel lehel kirjeldatakse ohutuse hindamise tegureid, mida oleme iga hindamiskriteeriumi puhul arvesse võtnud (Joonis 11). Samuti näitab see skaalat, mida oleme oma hindamise tulemuste kokkuvõtmiseks kasutanud. Sellega hinnatakse iga piirkonna sobivust skaalal 0–3, kus 0 = sobimatu ja 3 = väga sobiv.

Seismilisus	Geotermiline soojusvoog / vulkaanilisus	Paleohüdroloogia
• Geoloogilise keskkonna tektooniline ajalugu ja raamistik kohalikul ja piirkondlikul tasandil ning selle ajalooline seismilisus • Tõendid aktiivsetest (kvaternaarsetest ja võib-olla ka hilistertsiaarsetest) neotektoonilistest protsessidest, näiteks tõus, vajumine, kallutamine, kurdumine ja murrangud • Murrangute olemasolu geoloogilises keskkonnas (nt nende asukoht. pikkus, sügavus ja teave viimase liikumise vanuse kohta) • Hinnang maavärina omaduste ja maksimaalse intensiivsuse kohta, mis oleks selle koha seismotektoonilise konteksti põhjal võimalik • Kohalik piirkondlik pingeväli	• Hinnangud geotermilise gradiendi kohta ja tõendid kuumaveeallikate kohta • Tõendid aktiivsest (kvaternaarne ja võib-olla hilis-tertsiaarne) vulkaanilisusest	• Mis on piirkondlik paleohüdroloogiline seisund • Veesoonte sügavus • Piirkondlik voolurežiim, taastumisaeg • Veesoonte koostoime sügavamate veeallikatega
	Kliimamuutus	**Teostatavus**
	• Kliima ajalugu (kohalik ja piirkondlik) ning eeldatavad pikaajalised tulevikutrendid piirkondlikul ja globaalsemal tasandil • Jäätumisest tuleneva isostaatilise tagasilöögi mõju • Magevee tungimine sügavatesse kivimitesse	• Asukohta iseloomustavate andmete kättesaadavus • Puurimise kulutõhusus

	0: Sobimatu	1: Potentsiaalselt sobiv	2: Sobiv	3: Väga sobiv
Ohutus	Märkimisväärsed riskid kogu regioonis: piirkond tuleb hoidlate paigutamiseks välistada	Märkimisväärsed riskid kogu regioonis, kuid lokaliseeritumal tasandil võib olla mõni sobiv kivimiliik	Piirkonna ulatuses olulisi riske pole, kuid võib olla lokaliseeritud probleemseid alasid, mida tuleb vältida	Puuduvad märkimisväärsed riskid kogu piirkonnas; suur tõenäosus leida palju sobivaid asukohti
Asukoha andmed	Aluspinna tingimuste kohta puuduvad põhiandmed	Väga vähe andmeid puuraukude kohta, mõned piirkondlikud geofüüsikalised andmed	Arvukad puurimisaugud võrreldavas kivimis koos mõne mõõteandmega. Piirkondlikud geofüüsikalised andmed	Ulatuslikud puurimisandmed eeldatava hoidla puuraugu sügavusel ja võrreldavates kivimites. Üksikasjalikud geofüüsikalised andmed
Puurimine	Piirkond ei paku tõenäoliselt ühtegi asukohta, kus saaksime kulutõhusalt puurida	Piirkond pakub tõenäoliselt mõnda asukohta, kus saaksime kulutõhusalt puurida	Piirkond pakub laia valikut potentsiaalseid asukohti, kus saaksime kulutõhusalt puurida, ehkki meie kuluvahemiku arvestuses kõrgemate kuludega	Piirkond pakub laia valikut potentsiaalseid asukohti, kus saaksime kulutõhusalt puurida ja oma jääksime seejuures oma kuluvahemikus alumisse osasse

Joonis 11: Üksikasjalikud hindamiskriteeriumid ja sellega seotud hindamisskaala[12].

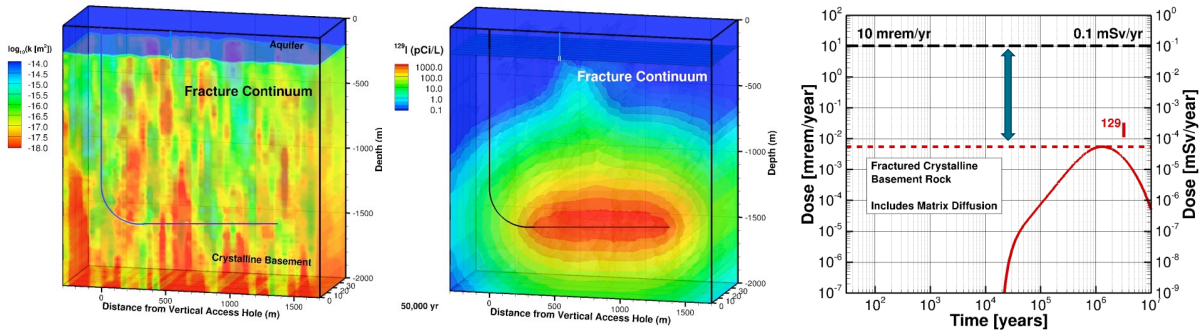
Ülevaade järeldustest

Meie üldine järeldus on, et kasutatud tuumkütuse ohutuks ladustamiseks sügavates horisontaalsetes puuraukudes pole Eestis põhimõttelisi geoloogilisi piiranguid ja on saadaval lai valik asukohti. Sügav horisontaalne puurauguhoidla on Eestile turvaline, taskukohane ja paindlik võimalus.

[12] Allikas: süvaladustamise analüüs, avaldamiseks ettevalmistamiseks ja partnerite kontrollitud ajakirja jaoks aastal 2021

Ohutu valik Eestile

Asukoht on kristalses aluskorras, kuna see on ainus piisava sügavusega ümbriskivim. Meie esialgsed ohutusarvutused üldise kristalses aluskorras asuva hoidla kohta näitavad, et on võimalik saavutada kõrge ohutustase. Joonis 12 näitab 1,5 km sügavuse horisontaalse hoidla näidisprojekteerimise tulemusi kristalses aluskorras heterogeensete subvertikaalsete lõhede võrgustikega, mis sarnanevad Eestis nähtutega ja millel on sarnane veesoone sügavus, nagu on leitud Põhja-Eestis. Radionukliidid on ohutult biosfäärist isoleeritud, tipudoosiga pinnasel, mis esineb pärast 1,3 Ma ja tasemel, mis jääb alla normatiivsete nõuete.



Crystalline Basement Host Rock
- 1.5 Kilometre Depth Repository
- Shallow aquifer at 200m depth
- Fracture + matrix continuums
- Heterogeneous fracture networks

Migration of 129I at 50,000 years
- 129I just reaches aquifer
- Deep water well pumps contamination to surface
- 5 bar overpressure driving force

Peak Dose Arrival at 1.3 Ma
- Peak dose at surface < 10^{-2} mSv/yr
- 1000x below dose standard
- Fracture and matrix affects modelled

Joonis 12: Esialgsed üldised ohutusarvutused horisontaalse hoidla jaoks kristalses aluskorras 1,5 km sügavuselALLIKASREF.

Taskukohane valik Eestile

Aruteludega arenenud tuumaenergia kasutusest Eestis ei ole veel reaktori tüübi osas otsusteni jõutud, mistõttu pole teada selle kasutatud tuumkütuse maht ja omadused. Sellest lähtuvalt ei ole meil praegu võimalik esitada üksikasjalikke kuluprognoose Deep Isolationi lahenduse juurutamiseks. Kulusid mõjutab ka hoidla jaoks valitud ala olemus ja valitud kütusetüüp, mida kasutatakse Eesti potentsiaalses väikses moodulreaktoris.

Siiski näitavad teadusuuringud, et Eesti kulud oleksid murdosa kaevandatud hoidla ehitamiseks vajalikest kuludest. Hiljuti lõpetasime projekti Electric Power Research Institute'iga (EPRI), mis käsitleb täiustatud reaktori[13] paigaldamist koos samas asuva jäätmehoidlaga horisontaalses puuraugus.

[13] Uuring oli üldine ja selles ei käsitletud spetsiifilist tüüpi täiustatud reaktorit või kasutatud kütust; eeldused tehti selleks, et tagada laialdane kohaldatavuse mitmesugustele arendatud reaktoritehnoloogiatele.

Tulemuseks saadi 69% kokkuhoid ühe reaktori kohta võrreldes kaevandatava hoidlaga. Kokkuhoid kasvas 76% ühe kahe reaktoriga objekti puhul.

Paindlik valik Eestile

Tõenäoliselt on kõikides Eesti piirkondades potentsiaalseid ümbriskivimi moodustisi, mis võimaldavad Deep Isolationi hoidla jaoks ohutuid ja kulutõhusaid asukohti. See toob Eesti jaoks kaasa olulise paindlikkuse, kui kaalutletakse asukoha valikut. Lisaks saab Deep Isolation hoidla puurida horisontaalselt rannajoonel asuva rajatise juurest rannikuvete alla, mis on Eesti jaoks üks võimalustest, arvestades Eesti rannikuäärset asukohta.

Selles osas on meie nõuanne, et eelkõige põhjapoolsed rannikupiirkonnad on kõige paremad oma sobivate ümbriskivimite omadustega.

Allpool olev Joonis 13 võtab kokku meie ohutushindamise ja teostatavuse hindamise tulemused. Horisontaaltelg näitab Eesti erinevate piirkondade keskmist punktisummat nelja ohutuskriteeriumi järgi; vertikaaltelg näitab keskmist punktisummat kogu teostatavuse kriteeriumide ulatuses; ja mullide suurus illustreerib suhtelist osakaalu, mida iga piirkond esindab, võrreldes Eesti kogu maismaa osaga.

See diagramm ei ole mõeldud suhtelise sobivuse täpse kvantifitseeritud võrdlusena[14], vaid lihtsalt selle illustreerimiseks, et meie hinnang on tuvastanud üldjoontes sarnaste sobivusprofiilidega piirkondade klastrid.

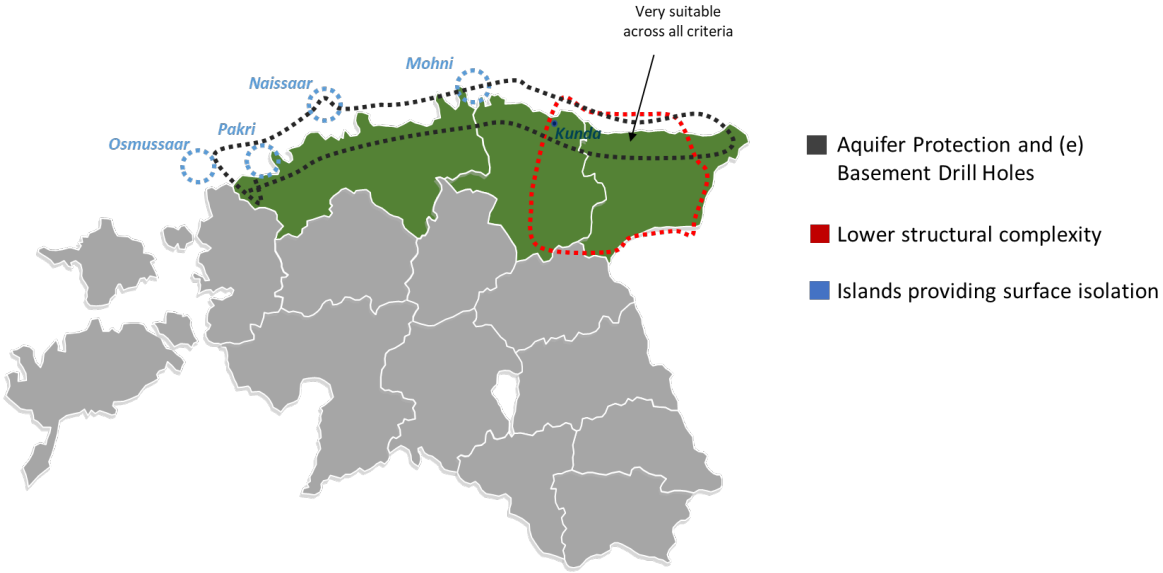
[14] Hinnang ei ole kvantitatiivne, sest skaala 0–3, mida kasutasime ise iga kriteeriumi puhul tähendab lihtsustatud kokkuvõtet kvalitatiivsetest hinnangutest, st ei tähenda empiirilist andmepunkti; ja kuna üksikasjaliku ohutuse korral ei oleks eelduse, et need erinevad kriteeriumid oleksid ühe kaaluga.

Joonis 13: Eesti piirkondade sobivuse kaardistamine.

Piirkonnad, kus on kõige suurem tõenäosus leida sobivaid ümbriskivimeid nii ohutuse seisukohast kui ka puurimise/projekti lõpuleviimise perspektiivist, on Harju maakond ja Ida-Viru maakond ning veidi vähemal määral Lääne-Viru, Eesti põhjarannik (koos selle rannikuäärsete saartega). Need piirkonnad ühendavad optimaalsed tingimused, sealhulgas:

- veesoone isolatsioon,
- rannikualad, mis hõlbustavad seismilisi uuringuid,
- olemasolevate baaskivimi puuraukude lähedus (hõlbustades ala iseloomustamist ja ohutuskava väljatöötamist.

Alloleval kaardil (Joonis 14) oleme toonud välja nende piirkondade geoloogia põhijooned, sealhulgas Kunda linn, kus Fermi Energia tegeleb praegu kohalikus kogukonnas selgitustööga selle kohta, et paik võib olla sobiv Eesti väikse moodulreaktori asukohana. See avab võimaluse tuumajaama ja jäätmehoidla koospaiknemisele, vähendades vajadust tuumajäätmete transpordi järele läbi mitme piirkonna.



Joonis 14: Sobivuse põhielemendid Põhja-Eestis.

SOOVITUSED JA EDASISED TEGEVUSED

Selle esialgse uuringu järeldused on järgmised:

- Süvapuurauk-lõppladustus kujutab endast ohutut, taskukohast ja paindlikku kasutatud tuumkütuse ladustamisvõimalust, juhul kui Eesti valitsus otsustab edasi minna võimalusega kasutada väikest moodulreaktorit potentsiaalse osana Eesti tulevases energiastrateegias.
- Üle Eesti on potentsiaalseid geoloogiliselt sobivaid keskkondi. Optimaalne ala, kuhu valik keskendada asub Eesti kirdeosas ja kirderanniku lähedal asuvatel saartel.

Need esialgsed järeldused põhinevad olemasolevatel andmetel, dokumentide uurimisel ning dialoogil ja läbivaatamisel Eesti geoloogia asjatundjatega; kohapealset tööd ega uusi väliuuringuid pole tehtud. Selle esialgse analüüsi täpsustamiseks ning konkreetsete alade, mis praktikas pakuksid sobivaid kivimimoodustisi, tuvastamiseks ja iseloomustamiseks on vaja teha märkimisväärset täiendavat tööd.

Seda arvesse võttes on meie peamine soovitus järgmine: **Eesti valitsus peab paralleelselt väikse moodulreaktori valiku kaalutlemisega välja töötama ka saadud kasutatud tuumkütuse haldamise strateegia**. See strateegia peab:

- põhinema süvapuurauk-lõppladustamisel,
- olema suunatud eesmärgile koostada selge rakenduskava tuumaelektrijaama tegevuslitsentsi andmise ajal või enne seda.

See teeb Eestist vastutustundliku ja jätkusuutliku energiatootmise eestvedaja maailmas: ainus riik maailmas, kes on loonud tuumajäätmete jaoks selge ladustamise tee enne jäätmete tootmist.

Maailma ainsa ettevõttena, mis koondab kõik tuumajäätmete süvapuurauk-lõppladustuse edutegurid, on Deep Isolation ainulaadses positsioonis, et toetada Eestit selles protsessis. Seetõttu soovitame Eesti valitsusel kaalutleda koostööd Deep Isolationiga, et töötada välja üksikasjalik äri- ja ohutuskava ning oma ladustamisstrateegia rakendusplaan. Selle protsessi alustamiseks on Deep Isolation välja töötanud üksikasjalikumad soovitused edasisteks tegevusteks, mille avaldame selle raporti pikemas versioonis pärast esialgseid arutelusid Eesti valitsusega.

LISA A. KASUTATUD KIRJANDUS

Artemieva, Irina M., and Hans Thybo. „EUNAseis: A seismic model for Moho and crustal structure in Europe, Greenland, and the North Atlantic region.“ *Tectonophysics* 609 (2013): 97–153.

Finsterle, S., R.A. Muller, J. Grimsich, J. Apps, and R. Baltzer, Post-closure safety calculations for the disposal of spent nuclear fuel in a generic horizontal drillhole repository, *Energies*, 13, 2599, doi: 10.3390/en13102599, https://www.mdpi.com/1996-1073/13/10/2599/pdf, 2020.

Finsterle, S., C. Cooper, R.A. Muller, J. Grimsich, and J. Apps, Sealing of a deep horizontal borehole repository for nuclear waste, Energies, 14(1), 91, doi: 10.3390/en14010091, https://www.mdpi.com/1996-1073/14/1/91/pdf, 2021.

Gascoyne, Mel. *Chlorine isotopes and their application to groundwater dating at Olkiluoto*. No. POSIVA-WR--14–38. Posiva Oy, 2014.

Gregersen, Soren, and Peter Voss. „Stress change over short geological time: the case of Scandinavia over 9000 years since the Ice Age.“ *Geological Society, London, Special Publications* 316.1 (2009): 173–178.

Hama, Katsuhiro, and Richard Metcalfe. „Groundwater dating applied for geological disposal of radioactive waste. A review of methods employed worldwide.“ *Nihon Suimon Kagaku Kaishi* 44.1 (2014): 39–64.

Hedin, Allan. *Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar-a first evaluation. Main Report of the SR-Can project*. No. SKB-TR--06-09. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., 2006.

Holland, Greg, et al. „Deep fracture fluids isolated in the crust since the Precambrian era.“ *Nature* 497.7449 (2013): 357–360.

Hurter, S. and Haenel, R. (eds) *Atlas of geothermal resources in Europe*, European Commission, 2002

International Atomic Energy Agency. *Isotope methods for dating old groundwater*. International Atomic Energy Agency, 2013.

Karro E, Marandi A (2003) Mapping of potentially hazardous elements in Cambrian-Vendian aquifer system, northern Estonia. *Bull Geol Soc Finland* 75: 17–27

Karro E, Marandi A, Vaikmäe R (2004) The origin of increased salinity in the Cambrian-Vendian aquifer system on the Kopli Peninsula, northern Estonia. Hydrogeology Journal 12:424–435. ISSN 1431–2174

Kietäväinen, Riikka, et al. „Noble gas residence times of Saline waters within crystalline bedrock, Outokumpu Deep Drill Hole, Finland.“ *Geochimica et Cosmochimica Acta* 145 (2014): 159–174.

Marandi, Andres. *Natural chemical composition of groundwater as a basis for groundwater management in Cambrian-Vendian aquifer system in Estonia*. Diss. 2007.

Marandi, A., Karro, E. & Puura, E. 2004. Barium anomaly in the Cambrian-Vendian aquifer system in Northern Estonia. *Environmental Geology*, 47 (1), 132–139.

Nirgi, Siim (2019). *Mineral exploration in crystalline basement rocks of Estonia*.

Olvmo, Mats (2010). *Review of denudation processes and quantification of weathering and erosion rates at a 01 to 1 Ma time scale* (SKB-TR--09-18), Sweden

Påsse, Tore. *The amount of glacial erosion of the bedrock*. No. SKB-TR--04-25. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., 2004.

Payer, J.H., S. Finsterle, J.A. Apps, and R.A. Muller, Corrosion performance of engineered barrier system in deep horizontal drillholes, *Energies*, 12(8), 1491, doi: 1020193390/en12081491, https://www.mdpi.com/1996-1073/12/8/1491/pdf, 2019.

Perens, R. and Vallner, L. (1997) Water-bearing formation. In: Raukas, A. & Teedumäe, A. (eds), Geology and mineral resources of Estonia, *Estonian Academy Publishers*, Tallinn, 137–145.

Puura, V. 1997. Basement features. In: Raukas, A. & Teedumäe, A. (eds). Geology and mineral resources of Estonia. *Estonian Academy Publishers*, Tallinn, 163–167.

Puura & Vaher, 1997. Deep structure. In: Raukas, A. & Teedumäe, A. (eds). Geology and mineral resources of Estonia. *Estonian Academy Publishers*, Tallinn, 163.

Puura, V. & Vaher, R. 1997b. Cover structure. In: Raukas, A. & Teedumäe, A. (eds). Geology and mineral resources of Estonia. *Estonian Academy Publishers*, Tallinn, 167–177.

Puura et al., 1997. Precambrian basement. In: Raukas, A. & Teedumäe, A. (eds). Geology and mineral resources of Estonia. *Estonian Academy Publishers*, Tallinn, 27–34.

Raidla, Valle, et al. „Geochemical evolution of groundwater in the Cambrian–Vendian aquifer system of the Baltic Basin.“ *Chemical Geology* 258.3-4 (2009): 219–231.

Simon, Karen M., et al. „The glacial isostatic adjustment signal at present day in northern Europe and the British Isles estimated from geodetic observations and geophysical models.“ *Solid Earth* 9.3 (2018): 777.

Tavast, E. (1997) Bedrock topography. In: Raukas, A. and Teedumäe, A. (eds) Geology and mineral resources of Estonia. *Estonian Academy Publishers*, Tallinn, 252–255.

Vaikmäe, R., Vallner, L., Loosli, et al. (2001) Palaeogroundwater of glacial origin in the Cambrian- Vendian aquifer of Northern Estonia. In: Edmunds, W.M and Milne, C. (Eds.), Palaeowaters in Coastal Europe: evolution of groundwater since the late Pleistocene. Geological Society, London, Special Publication, 189, 17–22.

Veikkolainen, Toni, Ilmo T. Kukkonen, and Timo Tiira. „Heat flow, seismic cut-off depth and thermal modeling of the Fennoscandian Shield.“ *Geophysical Journal International* 211.3 (2017): 1414–1427.

Warr, Oliver, et al. „Tracing ancient hydrogeological fracture network age and compartmentalisation using noble gases.“ *Geochimica et Cosmochimica Acta* 222 (2018): 340–362.

VESINIKU, AMMONIAAGI JA VEDELKÜTUSTE TOOTMINE TUUMAENERGIA ABIL

Teostaja: Rainer Küngas

Vesinik on võtmetähtsusega tooraine kütuste, väetiste, plastide ja teiste laiatarbekemikaalide valmistamisel. Globaalselt toodetakse 50-70 miljonit tonni vesinikku aastas ning selle valmistamiseks kulub suurusjärgus 2% kogu maailma energiatarbest. Valdav osa täna kasutusel olevast vesinikust on toodetud fossiilsetest kütustest: maagaasist, naftast ja kivisöest. Tavapärased vesiniku tootmise meetodid, nagu metaani aurreformimine ja kivisöe gasifitseerimine, on küll töökindlad ja odavad, kuid väga CO_2-mahukad: iga kilogrammi vesiniku tootmisel paisatakse atmosfääri umbes 12 kg CO_2.

Mida kõrgema tähelepanu alla satuvad tööstusettevõtete CO_2 emissioonid ning mida kõrgemaks muutub CO_2 kvootide hind, seda pakilisemaks muutub tööstuse jaoks küsimus: “Kust saada rohelist (madala CO_2 jalajäljega) vesinikku?”. Arvestades 1) Euroopa Liidu süsinikuneutraalsuse eesmärki aastaks 2050, 2) tasuta heitmekvootide lineaarset vähenemist nullini ja sellest tulenevalt heitmekvoodi hindade eeldatavat tõusu, muutub aurreformimise teel vesiniku tootmine Euroopa Liidus järjest kallimaks, roheline vesinik aga järjest atraktiivsemaks.

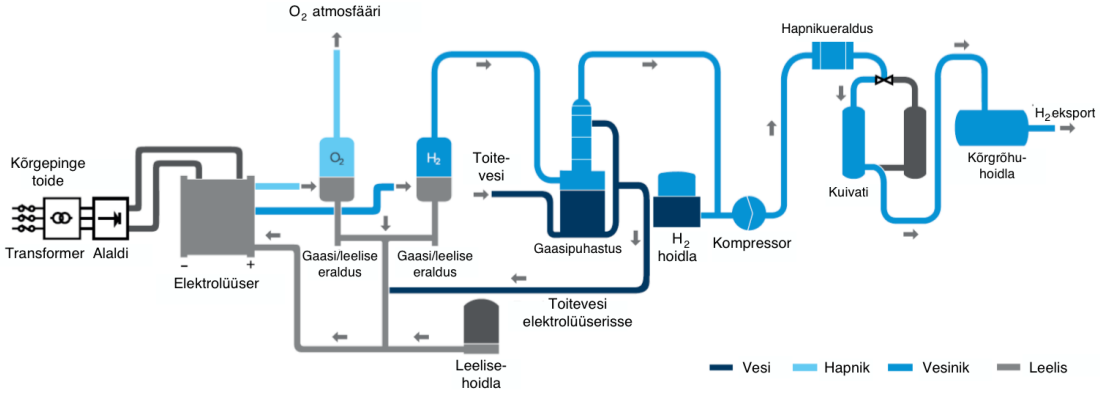
Elektrolüüs on protsess, kus vesi lagundatakse elektrivoolu toimel vesinikuks ja hapnikuks. Elektrolüüsiprotsessi kliimasõbralikkus sõltub ennekõike sellest, kust pärineb elektrolüüsiks kasutatav elektrienergia. Kui elektri tootmiseks on põletatud fossiil-kütuseid (nt põlevkivi), on elektrolüüsi teel toodetud vesinik kõrge CO_2 jalajäljega. Kui elekter pärineb madala CO_2 jalajäljega energiaallikatest (nt tuumajaamast), on elektrolüüsi teel toodetud vesinik samuti madala CO_2 jalajäljega ja seega kliimasõbralik.

Kliimasõbralikult toodetud vesinikku võib panna reageerima CO_2-ga, mille tulemusel tekib sünteesigaas ($CO + H_2$). Sünteesigaas on lähteaineks kõikides suures mahus läbiviidavates keemiatööstusprotsessides (nt ammoniaagi ja metanooli sünteesis), samuti võib sünteesigaasist toota vedelkütuseid, õlisid ja vaike. Sellisel teel saadud kemikaalid ja kütused on negatiivse CO_2 jalajäljega, st nende tootmise käigus seotakse süsihappegaasi, mis oleks muidu atmosfääri paisatud.

ELEKTROLÜÜSITEHNOLOOGIAD

Vesiniku tootmiseks sobivad kolm elektrolüüsitehnoloogiat: leeliseline elektrolüüs, happeline elektrolüüs ja kõrgtemperatuurne elektrolüüs. Leeliseline elektrolüüs (Joonis 15) on ennast tõestanud tehnoloogia: selliseid elektrolüüsereid kasutati vesiniku tööstuslikuks tootmiseks juba 1929. aastal, kui Norras Rjukanis alustas tööd Norsk Hydro (praegune NEL) hüdroelektril töötav elektrolüüser

võimsusega 135 MW (30 000 Nm^3 H_2/h). Leeliseliste elektrolüüserite kapitalikulud on teiste elektrolüüsi-tehnoloogiatega võrreldes madalad, sest neis ei kasutata enamasti haruldasi või väärismetalle. Samas on leeliselised süsteemid ebaefektiivsed: vesiniku tootmise protsessi läbiviimiseks vajalik pinge on teiste elektrolüüsitehnoloogiatega võrreldes kõrge ja seadmes saavutatav elektrivoolu tihedus madal.



Joonis 15: Leeliseline elektrolüüser. Süsteemis ringleb kaks teineteisest eraldatud leeliselahust. Katoodil (-) tekkiv vesinik juhitakse koos ühe lahusega elemendist välja ja eraldatakse gaasi/leelise eraldusmahutis. Anoodil (+) tekkiv hapniku ja leelise segu juhitakse teise mahutisse, kus hapnik eraldatakse. Allikas: NEL, 2019.

Happelised elektrolüüserid töötavad happelises keskkonnas 50-80 °C juures. Happelised elektrolüüserid on võimelised saavutama väga kõrgeid voolutihedusi ja on seega leeliseliste elektrolüüseritega võrreldes kompaktsemad. Seadmete kasutegur on leeliseliste elektrolüüseritega võrreldav. Happeliste elektrolüüserite peamiseks puuduseks on tõsiasi, et seadmetes kasutatakse märkimisväärsetes kogustes plaatina ja iriidiumit, mille hind ja kättesaadavus võib tugevasti ajas muutuda. Kui esimesed 100+ MW leeliselised elektrolüüserid alusid tööd rohkem kui 90 aastat tagasi, siis suurim happeline elektrolüüsijaam on täna võimsusega 6 MW. Air Liquide ja Hydrogenics on rajamas Kanadasse 20 MW võimsusega jaama.

Kõrgtemperatuursed elektrolüüserid põhinevad keraamilistel materjalidel ning nende töötemperatuur jääb vahemikku 600-800 °C. Eelpool toodud tehnoloogiatega võrreldes on kõrgtemperatuursete elektrolüüserite kasutegur oluliselt kõrgem. Kõrgem kasutegur alandab elektrolüüsijaama jooksvaid kulusid, sest sama koguse elektrienergia abil on võimalik toota suurem kogus vesinikku. Teise olulise eelisena saab kõrgtemperatuurses protsessis ära kasutada tuumareaktorist pärinevat termilist energiat, mille võrra langeb protsessi elektrivajadus umbes 15% võrra[15]. Võrreldes teiste elektrolüüsitehnoloogiatega on kõrgtemperatuurne elektrolüüs täna kallis

[15] Idaho National Lab. Summary report on solid-oxide electrolysis cell testing and development (2012) https://inldigitallibrary.inl.gov/sites/sti/sti/5394148.pdf

(peamiselt kõrgete kapitalikulude tõttu) ning suurimad rajatud võimsused on suurusjärgu võrra väiksemad kui happelistel elektrolüüseritel. Kõrgtemperatuurne elektrolüüser võimsusega 2,6 MW (60 kg H_2/h) rajatakse 2022. aastaks Rotterdami. Eestis tegeleb kõrgtemperatuurseks elektrolüüsiks sobivate elementide arendamise ja tootmisega AS Elcogen.

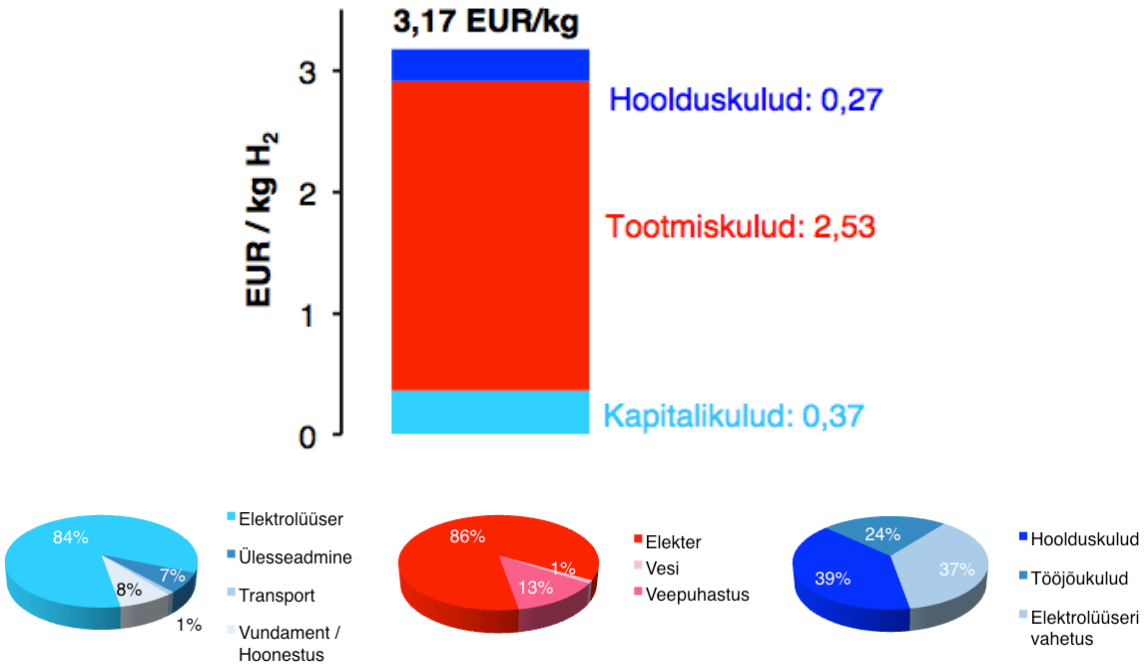
VESINIKU TOOTMINE TUUMAENERGIA ABIL

Vaatleme jaama, mille elektrilisest võimsusest kasutatakse 100 MW elektrolüüsi abil veest vesiniku tootmiseks. Kui vesiniku tootmiseks kasutada leeliselist elektrolüüsi, mis on tänase seisuga kõige laialdasemalt kasutusel olev ja kapitalikulude poolest kõige odavam elektrolüüsitehnoloogia, saab 100-MW elektrilise võimsuse abil toota umbes 1700 kg vesinikku tunnis (57 MW (LHV), H_2 @10 bar), vt. Joonis 16.

Joonis 16: Roheline vesinik tuumajaamast.

Kui palju maksaks kilogramm sellisel teel toodetud vesinikku? Tootmiskulude hindamiseks tuleb teha rida lähte-eeldusi, millest olulisemad on: 1) elektrihind tuumajaamast 35 €/MWh, millele ei lisandu võrgutasusid, 2) elektrolüüser töötab 8 000 tundi aastas, 3) süsteemi tarneaasta: 2028, 4) kapitalikulude tagasimakse tingimused: 0% intress, 15 aastat. Arvutustes on võetud arvesse elektrolüüserite omaduste halvenemist ajas (st aja jooksul langevat kasutegurit)[16], samuti mastaabisäästust tingitud elektrolüüserite järkjärgulist odavnemist[17]. Toodud lähte-eelduste korral on tuumaenergia abil toodetud rohelise vesiniku tasandatud hinnaks 3,2 €/kg H_2. Vesiniku hinna jaotumine kapitali-, tootmis- ja hoolduskulude vahel on näidatud Joonis 17.

[16] Enapter. Calculating the cost of green hydrogen (2020)
https://www.h2-view.com/story/exclusive-calculating-the-cost-of-green-hydrogen/
[17] Store&Go, 2018. Innovative large-scale energy storage technologies and Power-to-Gas concepts after optimization, Report on experience curves and economies of scale (2018)
https://www.storeandgo.info/fileadmin/downloads/deliverables_2019/20190801-STOREandGO-D7.5-EIL-Report_on_experience_curves_and_economies_of_scale.pdf



Joonis 17: Vesiniku tasandatud hind ja selle komponendid baas-stsenaariumi korral.

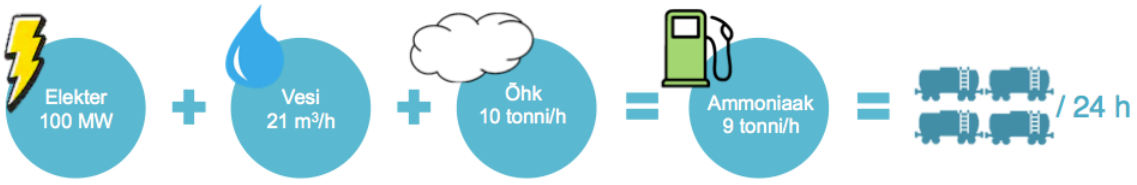
Kapitalikulud, tootmiskulud ja hoolduskulud saab omakorda jagada alam-komponentideks. Kapitalikuludest moodustab üle 80% elektrolüüseri soetamise kulu. Seadme ülesseadmise, kohaletoimetamise ja elektrolüüsijaama asukoha ettevalmistustöödega seotud kulud on suhtelises plaanis vähemolulised. Tootmiskuludest moodustab üle 85% elekter, ülejäänud kulud on seotud vee ja selle puhastamisega.

Fossiilkütustest toodetud vesiniku omahind on Euroopas umbes 2 €/kg, USA-s ja Lähis-Idas umbes 1 €/kg. Ilma täiendavate CO_2 maksudeta ei ole elektrolüüsi teel toodetud vesinik seega aurreformimise teel toodetud vesinikuga konkurentsivõimeline. Küll aga on tuumaenergia abil toodetud vesinik võimeline hinna poolest konkureerima taastuvate energiaallikate abil toodetud vesinikuga, kuid erinevalt ilmastikuoludest sõltuvatest päikese- ja tuuleenergiast saab tuumaenergia abil toota vesinikku aastaringselt ühe ja sama hinnaga. Selleks, et saavutada tuumajaama abil (elektrihind 35 €/MWh ja koormusfaktor 91%) toodetud vesinikuga võrreldav hind tuule- või päikeseelektri abil (koormusfaktor 25%), peab aasta keskmine elektrihind olema madalam kui 6 €/MWh.

AMMONIAAGI TOOTMINE TUUMAENERGIA ABIL

Vesiniku salvestamine ja transport on kallis ning energeetiliselt ebaefektiivne. Üheks võimaluseks toodetud vesiniku transportimise vältimiseks on selle kasutamine *nn* vesiniku derivaatide (näiteks ammoniaagi või sünteetiliste kütuste) tootmiseks. Ammoniaak (NH_3) on väga hea vesinikukandja. Ammoniaaki on kerge veeldada ning vedel ammoniaak sisaldab oluliselt rohkem vesinikku (118 kg vesinikku 1 kuupmeetri kohta) kui veeldatud vesinik (71 kg vesinikku 1 kuupmeetri kohta). Ammoniaagi

suuremahuliseks transportimiseks ja ladustamiseks on taristu juba täna olemas: 120 sadamat (sh Sillamäe sadam) ja 170 tankerlaeva käitlevad seda regulaarselt[18]. Kliimasõbralikul ammoniaagil on suur turupotentsiaal merenduses: ainuüksi selleks, et asendada 30% laevakütustest NH_3-ga, on vaja 150 miljonit tonni CO_2-vaba ammoniaaki aastas, mille tootmiseks kulub umbes 150 TWh jagu CO_2-vaba elektrit. Täna toodetakse maailmas 180 miljonit tonni NH_3, peamiselt maagaasist ja kivisöest [iv]. 100 MW elektri abil on võimalik toota hinnanguliselt 9 tonni NH_3 tunnis ehk umbes nelja raudteetsisterni jagu NH_3 ööpäevas (joonis 4). Baas-stsenaarumis on tuumaelektri abil toodetud ammoniaagi omahinnaks 815 €/tonn. See on ammoniaagi tänasest turuhinnast mitu korda kõrgem hind, mistõttu ei ole roheline ammoniaak täna turul ilma täiendavate toetusteta konkurentsivõimeline.



Joonis 18: Roheline ammoniaak tuumajaamast.

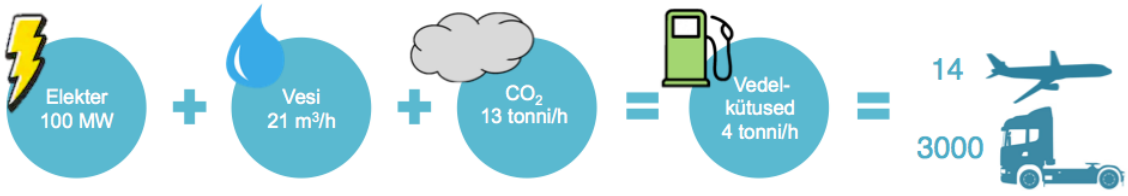
VEDELKÜTUSTE TOOTMINE TUUMAENERGIA ABIL

Madala CO_2 jalajäljega vedelkütuste tootmiseks on välja töötatud mitmeid erinevaid meetodeid. Üheks võimaluseks on vedelkütuste tootmine bioetanoolist, taimsetest õlidest või toiduainetööstuse jääkproduktidest. Teiseks võimalukseks on *nn* elektrokütused, st kütused, mis on toodetud CO_2-st, veest ja elektrist. Biokütustega võrreldes on elektrokütustel rida olulisi eeliseid: 1) väga kõrge energiatihedus, mõõdetuna energiasisaldusena vajaliku põllu- või muu maa pindala kohta; 2) madal veemahukus (vesiniku ja kütuste süntees vajab kokku 1 kuni 3 liitrit puhast vett iga toodetud kütuseliitri kohta, st tuhandeid kordi vähem kui biokütused), 3) väga väike CO_2 jalajälg (kui elekter pärineb CO_2-vabast allikast). Elektrokütused on atraktiivseks lahenduseks sellistes valdkondades nagu rasketransport, laevandus ja lennundus, kus kütuse energiatihedus (energiasisaldus ruumala või massi kohta) on määrava tähtsusega ning mida on akude madala energiatiheduse tõttu raske elektrifitseerida. Eriti helge näib elektrokütuste tulevik olevat lennunduses muude *nn drop-in* alternatiivide puudumise tõttu.

Sünteetiliste kütuste tootmiseks tuleb elektrolüüsi abil toodetud vesinik panna reageerima õhust või mõnest kontsentreeritud CO_2 allikast pärit süsihappegaasiga. 100 MW abil on võimalik toota 4 tonni

[18] Alfa Laval, Hafnia, Haldor Topsoe, Vestas, Siemens Gamesa. Ammonfuel – an Industrial View of Ammonia as a Marine Fuel (2020) https://www.topsoe.com/hubfs/DOWNLOADS/DOWNLOADS%20-%20White%20papers/Ammonfuel%20Report%20Version%2009.9%20August%203_update.pdf

vedelkütuseid tunnis ehk 36600 tonni aastas (Joonis 19). Selle koguse vedelkütusega saab reisilennuk läbida umbes 14 miljonit kilomeetrit ja keskmine veoauto 131 miljonit kilomeetrit. Tuumaelektri abil toodetud vedelkütuse omahind baas-stsenaariumis on 1,6 €/liiter. Sarnaselt biokütustele ei suuda elektrokütused täna fossiilkütustega pelgalt hinna alusel konkureerida. Jaama kasumlikkuse huvides tuleks sünteesiprotsessis soosida kõrgemate süsivesinike (vahade, õlide) tekkimist.



Joonis 19: Vedelkütuste tootmine tuumaenergia abil.

Tuumaenergia abil toodetud vesiniku suureks eeliseks tuule- või päikeseenergia abil toodetud vesiniku ees on tootmismahtude ennustatavus ja tarnekindlus – tuumaenergiast toodetud vesinik sobib kõige paremini rakendusteks, kus on oluline, et vesiniku tootmise võimsus ei varieeru ilmastikuoludest tingituna tundide või päevade jooksul väga suurtes vahemikes. Sellisteks rakendusteks on näiteks suurem osa keemiatööstuse protsesse, sh sünteetiliste vedelkütuste, metanooli ja ammoniaagi tootmisprotsessid. Kemikaalide tootmisprotsessid on kapitalimahukad pidevprotsessid, kus ühtse tootmistsükli ja madala omahinna saavutamiseks tuleb tagada pidev toormesisendi (sh vesiniku) voog. Tuumaenergia kasutamine elektrolüüsiprotsesside käitamiseks aitab tagada tarnekindlust valdkondades nagu transport (eriti lennundus, laevandus, raskeveondus) ja tööstustooted (keemiatooted, tsement, metallid, klaas).

KAUGKÜTTESOOJUS JA TÖÖSTUSAUR VÄIKSEST MOODULREAKTORIST

Teostaja: Allan Vrager

Põhiline toodang, mille jaoks tuumareaktoreid majanduslikel põhjustel ehitatakse on läbi ajaloo olnud elekter. Lisaks elektrile on veel rida väljundeid, mida tuumareaktori abil toota saab, millest põhilisemad on kaugküttesoojus ja soojus tööstustarbijatele (tööstusaur).

Tuumaenergiast toodetakse küttesoojust näiteks Venemaal, Ukrainas, Tšehhis, Slovakkias, Ungaris, Bulgaarias ja Šveitsis. Venemaa on suurim tootja, kus paigaldatud küttevõimsus on ligi 4,5 GW ja soojuse toodang tuumajaamadest aastal 2005 oli 3,17 TWh. Rootsis, Stockholmi eeslinnas Farstas töötas 1964-1974 Ågesta tuumareaktor, mis oli mõeldud peamiselt ümberkaudse piirkonna kütteks, ent tootis lisaks ka elektrit (12 MW elektrit ja 80 MW soojust). Hiina alustas sellel sügisel esimest korda tuumareaktoris toodetud soojusega Shandongi provintsis Haiyang tuumajaama läheduses asuvate asumite kütmist.

Tööstuse jaoks soojuse tootmist on tuumareaktorites kasutatud väiksemal määral. Seoses kõrgtemperatuursete reaktorite arendamisega kavandatakse nendes tekkinud soojuse kasutamist ka vesiniku tootmiseks ja mujal keemiatööstuses. Kasahstanis asuvas Aktau tuumaelektrijaamas toodeti aastatel 1973 kuni 1998 lisaks elektrile ka Kaspia merest magestatud vett jaama ligidal asuvale linnale.

Seoses kavatsusega Eestisse väikestel moodulreaktoritel põhinev tuumaelektrijaam ehitada sai teostatud uuring, milles otsiti vastust küsimusele, kas oleks mõttekas lisaks elektrile toota ka kaugküttesoojust ja soojust tööstusele.

Saamaks reaalseid usutavaid tulemusi sai uuringu aluseks võetud rida eeldusi, mis on kirjeldatud järgnevalt. Asukohaks sai valitud Viru-Nigula vallas asuv kinnistu Kunda lähedal asuvas Lontova külas, sest see oli uuringu läbiviimise ajal (kevad 2020) tõsiselt kaalumisel olnud asukoht. Reaktori tüübiks oli arvutustes valitud GE Hitachi BWRX-300, sest selle tehnoloogia kohta oli kättesaadaval kõige enam konkreetseid arvutusteks vajalikke parameetreid ning hea kontakt reaktori arendajaga. Ehituse ja vajalike lisaseadmete maksumuse osas sai koostööd tehtud firmadega AS Merko Ehitus Eesti, Estanc AS ja FW-Fernwärme-Technik GmbH.

KAUGKÜTE

Potentsiaalsed tarbijad

Lisaks lähimal asetsevale Kundale on kauguselt järgmiseks suuremaks asustatud punktiks Rakvere linn. Muud suuremad asulad paiknevad juba märgatavalt kaugemal ning neid ei vaadeldud käesolevas uuringus kui perspektiivikaid asulaid, mida kaugküttetorustikuga ühendada.

Rakvere linn. Rakvere Soojus AS andmetel on võrgu temperatuurirežiim 90/50 °C ja ühenduspunktiks sobiks Lembitu 7 katlamaja. Enamus soojusest Rakveres toodetakse biomassist ning gaasikatelde näol on olemas 100% reservvõimsus juhuks kui biomassi katlad seiskuvad. Arengukavas perspektiivseteks liituvateks piirkondadeks on paljud linnas asuvad väiksed eraldiseisvad võrgud ja Näpi. Rakvere Soojus AS kuulub 51% ulatuses Rakvere linnale ja 49% ulatuses Advenile.

AS Rakvere Lihakombinaat. Hinnanguliselt on tarbitav võimsus 3 MW, mis on tänasel hetkel eeldatavasti kaetud gaasikatlaga ning millest enamus kasutatakse eeldatavasti tarbevee soojendamiseks nagu toiduainetööstuses tüüpiline.

Põllumeeste Ühistu Kevili. Kevilis kuivatatakse vilja, võimsusega hinnanguliselt 7 MW. Viljakuivatuse periood algab suvel ja lõppeb sügisel. Vilja kuivatamisel ei tohi kuivatusõhu temperatuur olla suurem kui 60-70°C. Seega sobib 90 kuni 100°C vesi kuivatusõhu soojendamiseks hästi.

Kunda linn. Kunda linna ei ole arvutustes arvesse võetud, sest kaugküttevõrk koos katlamajadega kuulub 100% Adven Eesti AS-ile ja neil valmis seal just uus hakkpuitu põletav katlamaja, mistõttu puudub neil eeldatavasti motivatsioon tuumajaamast soojust hankida. Samas on tuumajaamast soojuse ostmise huvi korral oluliselt odavam ehitada toru jaamast Kundasse kui Rakverre ehk sooja omahind oleks oluliselt mdalam.

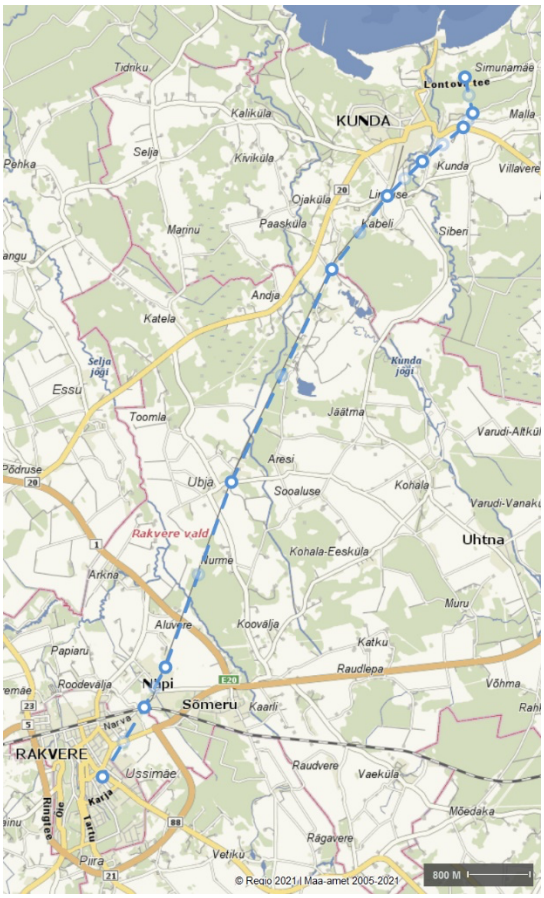
Samuti uuriti võimalusi uute potentsiaalsete tarbijate leidmiseks, kes alustaksid oma projektiga kui konkurentsivõimelise hinnaga soojus oleks kättesaadav. Vestlusest ühe potentsiaalse tarbijaga selgus, et maksimaalselt oleks tarvis uues ettevõtmises 21 MW ning seda peamiselt suveperioodil. Erinevate tarbijate vajalikud tarbimisvõimsused on esitatud Tabel 1. Tänu potentsiaalsetele tarbijatele, kes tarbiksid soojal aastaajal saab ehitatud torustiku potentsiaali paremini ära kasutada, kui ainult talvel külmaga hooneid küttes.

Tabel 1: Potentsiaalsed tarbijad.

Tarbija	Tarbimine aastas [GWh]	Maksimaalne võimsus [MW]	Tarbimisaeg
Rakvere linn	42	18	Põhiliselt talvel
Arengukavas liituvad Rakvere linna alad	8,7	4,6	Põhiliselt talvel
Kevili	26,5	7	Suvi, Sügis
Uus projekt	79,5	21	Mai-September
Rakvere Lihakombinaat	26	3	Aasta vältel ühtlaselt
Mitte arvestatud			
Kunda linn [2]	14,8	7	Põhiliselt talvel

Tõenäoline trass Rakvere linna

Rakveresse suunduva kaugküttetorustiku trass tõuseb Lontovas klindi peale ning möödub seejärel Estonian Celli tehasest ida poolt. Edasi keerab trass edelasse ning möödub Kunda tsementitehasest lõunas ning jõuab Rakvere-Kunda raudtee otsa juurde tsementitehase piiril. Võimalikult otse ehitades oleks kogupikkus 4,5 km. Trassi täpne marsruut selguks läbirääkimistel kohaliku omavalitsuse ja kinnistute omanikega. Edasi liigub trass raudtee kõrval kuni Rakvereni (mööda ühte kinnistut) ja selle pikkus on 15,5 km. Rakvere linnas peab trass minema mööda tänavaid ja täpne asukoht saab selguda projekteerimise käigus kooskõlastades linnavalitsusega. Rakvere linnas on toru pikkuseks hinnatud 2 km, lisaks tuleb ehitada harud Rakvere Lihakombinaati, Kevilisse ja uue kavandatava tarbija juurde. Ühtekokku on analüüsitud trassi kogupikkus umbes 24 km (vt marsruuti Joonis 20).



Joonis 20: *Kaugkütte toru trass elektrijaama ja Rakvere vahel.*

Väikse moodulreaktori asukohas oleks trassi kõrgus merepinnast 3-3,5 m, Klindi peal 37 m. Trassi pikkus 0,5 km. Raudteekinnistu algus Kunda tsementitehase piiril asub 52 m üle merepinna. Rakverre jõudes on kõrgus 73 m üle merepinna, kusjuures linnas ulatub kõrgus kohati üle 80 m merepinnast kõrgemal.

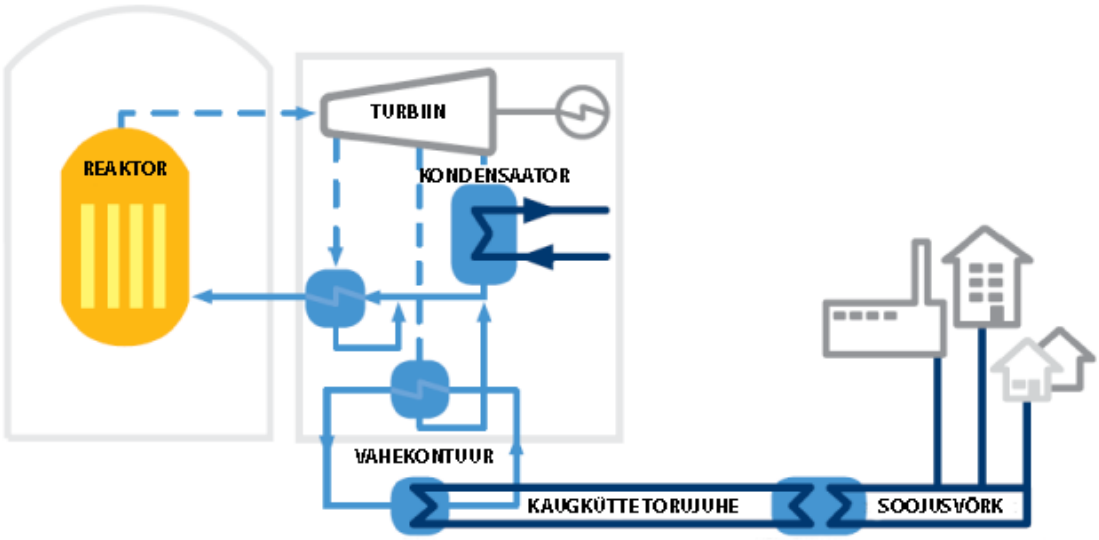
Tehnilised arvutused

Arvutustes sai valitud kaugkütte torustiku torudeks erinevad reaalselt eksisteerivad tehases eelisoleeritud torud. Torud taluvad rõhku 25 bar, aga kaugküttesüsteemid on lisatavate komponentide (ventiilid, mõõtesõlmed, pumbad ja soojusvahetid jm) tõttu tavaliselt projekteeritud taluma rõhku 16 bar. Toru läbimõõdu valimisel on aluseks võetud, et maksimaalse soojuskoormuse korral ehk ka maksimaalse vooluhulga korral on vee kiirus torus veidi üle 1 m/s. Arvutuste põhjal sobib maksimaalse kavandatud tarbimise korral 0,5 m (DN500) läbimõõduga toru. Ilma tööstustarbijateta sobib toru läbimõõduks 0,45 m (DN450).

Arvutustel võeti aluseks jaamast lahkuva vee temperatuuriks 100 °C ja jaama naasva vee temperatuuriks 60 °C. Kuigi tarbijate juures vajalik temperatuur on madalam (90-95 °C) sai kõrgem temperatuur valitud mitmel põhjusel. Tänu suurele kõrguse vahele süsteemis (~80 m) on mõistlik panna süsteemi soojusvahetiga pumbajaam, sest pumpamisel genereerivad pumbad rõhu, mis tõuseb elektrijaamas üle 16 bar ja seadmed võivad puruneda. Sellises pumbajaamas väheneb vee temperatuur kuskil 3-4 °C (see temperatuuri lang antakse ette soojusvaheti valimisel). Lisaks jahtub vesi torus paar kraadi tänu soojuskaole läbi toru seina.

36 MW soojusliku võimsuse korral tuleb selliste andmete korral vooluhulgaks jaamast lahkudes 919 m^3/h ja voolukiiruseks 1,32 m/s. Küttevõimsuse vähenedes väheneb nii vooluhulk kui ka kiirus. Pumpasid juhitakse sagedusmuunduritega ja maksimaalse koormuse juures on pumpamise koguvõimsus alla 0,5 MW. Soojuskadu torustikus on õhukese isolatsiooniga toru kasutamise korral 2 MW ja parima isolatsiooniga toru kasutades 1,06 MW. Torustiku ehitamise maksumuse hindas AS Merko Ehitus Eesti.

Kaugküttesoojus saadakse tuumajaama turbiini vaheltvõtu aurust. Turbiini aur on keevaveereaktoril kergelt radioaktiivne peamiselt tänu N-16 tekkimisele reaktoris. N-16 kiirgab lagunemisel gammakiirgust, poolestusaeg on 7 s ja 70 s pärast on radioaktiivsus vähenenud 1000 korda ning vees ei teki pikaajalist radioaktiivset kiirgust. Tänu auru radioaktiivsusele peab kaugküttevõrgu vee soojendamiseks olema auru ja vee vahel veel üks soojuskandja ehk aurukontuur (Joonis 21). Lisandub kaks soojusvahetit ning vahekontuuri pumbad, dearaator jm abiseadmed ning torustik. Jaama paigaldatavad soojusvahetid on manteltorusoojusvahetid. Nende valmistamise maksumuse koos deaeraatori ja vajalike lisaseadmete ning torudega arvutas Estanc AS.



Joonis 21: Keevavee reaktori põhimõtteskeem koos kaugküttesoojuse tootmise seadmetega.

Kaugküttesoojuse omahind

Kaugküttesoojuse omahinna arvutamise aluseks on partnerite (Merko ja Estanc) hinnatud ehitusmaksumused, pumpamise kulud, hoolduskulud ja tootmata jäänud elektri omahind. Elektri omahinnaks on võetud GE Hitachi hinnatud 35 USD/MWh ehk 32 EUR/MWh. Selle hinna alusel on arvutatud turbiini vaheltvõttudest ära võetud auru poolt tootmata jäänud elektri maksumus ja pumpamiseks kuluva elektri maksumus.

Ehitusmaksumusest suure osa võtab Merko andmetel torustiku jaoks süvendi kaevamine, sest torustik asub piirkonnas, kus paekivi on maapinnale lähedal ning sellesse kanali rajamine on kulukas. Hind on konservatiivne, sest puudub teadmine trassi täielikust geoloogiast ning arvestatud on suurima keerukusega.

Aastaseks hoolduskuluks võetud 1% ehituskuludest. Finantskulu sai arvutatud võttes laenu 20 aastaks, intressiks 4,2% ning tagasimakse võrdsetes summades iga kuu.

Arvutustulemused näitasid, et väikse moodulreaktoriga on võimalik toota kaugküttesoojust konkurentsivõimelise hinnaga võrreldes maagaasist ja hakkpuidust toodetava soojusega.

TÖÖSTUSAUR

Potentsiaalsed tarbijad

Hetkeseisuga kindlaid huvilisi tööstusauru tarbimiseks ei ole, aga soodsa hinna puhul on eeldatav, et suure potentsiaalse auruvajadusega ettevõtted oleks huvitatud oma tehaseid ehitama väikeste moodulreaktoritega tuumaelektrijaama lähedusse.

Uuringus kasutatava reaktori BWRX-300 korral oleks 200 °C kõrgeim auru temperatuur, mida on võimalik saavutada kasutades auru turbiini esimesest vaheltvõtust. Auru absoluutne rõhk 200 °C juures küllastuskõveral on ligikaudu 15,5 bar. See on kõrgem kui enamuses Eesti tööstustes (põhiliselt toiduainetööstus) kasutatavast auru rõhust ja temperatuurist. 200 °C temperatuuriga auru korral on lihtne soojendada vajalikku töödeldavat materjali või teist soojuskandjat 180 °C juurde, mis tähendab, et seda saab kasutada ka puidutööstuses puidu kuivatamiseks õhu soojendamiseks. Kui valituks osutuvad sulasoolareaktorid, siis jaamast väljuva soojuskandja (aur, termaalõli, sool ja muud) temperatuurid võivad tõusta 500-600 °C juurde.

Väikse moodulrektoriga toodetud soojus tööstusele peab olema konkurentsivõimeline praegusel ajal Eestis põhiliselt kasutatavate tehnoloogiatega, nagu tööstusauru tootmine maagaasi ja puidu põletamisel saadud soojusest.

Aurutorustiku trass

Aurutorustiku trassi täpset asukohta ei saa praegu kindlaks määrata, sest ei ole teada kindlaid tarbijaid, ei ole valitud tuumajaamas kasutatavat reaktoritehnoloogiat ega ka veel tuumajama täpset asukohta krundil. Kaarti vaadates on ruumi Kunda ümbruses uute tööstuste rajamiseks klindi peal Kundast itta, kagusse ja edelasse raudteest põhja poole, mis teeb aurutorustiku pikkuseks vahemiku 1 kuni 5 km. Elektrijaam asub 3 kuni 3,5 m üle mere pinna ja potentsiaalsetes asukohtades on maapinna kõrguseks maksimumis veidi üle ~50 m. Auru puhul ei oma kõrguste vahe suurt tähtsust.

Tehnilised arvutused

Aur voolaks mööda FW-FERNWÄRME-TECHNIK GmbH valmistatud terasest toru-torus (aur sees kahe toru vahel mineraalvill ja vaakum) aurutoru. Sellisel torul on väike soojuskadu (108 W/m) ja pikk eluiga. Hea soojusisolatsiooni tagamiseks kasutatakse vaakumpumpa, mis pidevalt pumpab torude vahele sattunud gaase välja. Arvutustes lähtusime, et tööstusesse mineva auru kondensaat tuleb 100% ulatuses tagasi elektrijaama ning vee ettevalmistus (pehmendamine) tehase sees tarbitava auru tootmiseks toimub tehases kohapeal paiknevas süsteemis. Peale kondenseerumist tehase soojusvahetites voolab kondensaat tagasi elektrijaama kaugküttevõrgu eelisoleeritud toru mööda alla mäge ilma pumba abita. Soojuskadu aastas hinnanguliselt 1 GWh/km.

Soojus toodetava auru jaoks saadakse turbiini esimese vaheltvõtu aurust. Sarnaselt kaugkütte jaoks kasutatava aurule tuleb kasutada aurude vahel veel ühte soojuskandjat ehk lisada aurukontuur. Lisandub kaks soojusvahetit ning vaja on vaheahelale pumpi, dearaatorit ja muid abiseadmeid ning torustikku. Vajalike manteltorusoojusvahetite valmistamise maksumuse koos deaeraatori ja vajalike lisaseadmete ning torudega. Seadmete maksumuse arvutas Estanc AS.

Elektrijaamas on vaja pumpasid mis tõstavad vee rõhu üles enne soojusvahetit ning kompenseerivad rõhukao soojusvahetis, lisaks on vaja pumpasid vahekontuurile. Pumpasid peab olema vähemalt nii palju, et üks pump oleks täisvõimsuse korral reservis. Energia kogus pumpamisele on auru omahinnas väga väikse osakaaluga.

Tööstusauru omahind

Tööstusauru omahinna arvutamise aluseks on partnerite (Merko ja Estanc) hinnatud ehitusmaksumused, saksa ettevõtte poolt tehtud aurutorustiku hinnapakkumine, pumpamise kulud, hoolduskulud ja tootmata jäänud elektri omahind. Tootmata jäänud elektri omahind ja finantskulud on võetud sarnaselt kaugkütte arvutusele.

Arvutused näitasid, et soojuse tootmine väikse moodulreaktoriga tööstuse jaoks, mille aastane energiatarve on suurem kui mõnisada gigavattundi, on majanduslikult tasuv ning atmosfääri jääb paiskamata suures koguses CO_2. Torustiku pikkus vahemikus 1 kuni 5 km ei oma suurt mõju toodetava soojuse omahinnale.

KOKKUVÕTE

Käesolevas uuringus on kirjeldatud 2020. aastal Fermi Energia meeskonna ja partnerite ühises koostöös läbiviidud uuringuid erinevates väikse moodulreaktori rajamisega seonduvates küsimustes.

Uuringute tulemustest selgus, et Eestis on mitmeid VMRi jaoks sobivad asukohti erinevates piirkondades. VMRi on võimalik ehitada kiiremini kui tüüpilisi suuri tuumajaamasid, kuid hoolikalt tuleb tegelda suurimate reaktorikomponentide (ette)tellimisega, kuna nende valmistajate hulk on maailmas piiratud ja seetõttu viiteajad pikad. Litsenseerimismudeli analüüsis leiti olulisi protsessi tõhustamise kohti ning pakuti välja VMRidele sobiv rahvusvahelisel koostööl põhinev litsenseerimismudel. Lisaks selgus, et hetkel turul olevad Eestisse sobivad tehnoloogiad on piisavalt väiksed, et põhjendada tulevikus jaamaväliste hädaolukorra planeerimisalade mittevajalikkust. Ühe alternatiivina jäätmete lõppladestamiseks uuritud süvapuuraukude tehnoloogia tundub Eesti geograafiasse sobiv olevat. Samuti on tegemist potentsiaalselt veelgi ohutuma ja kulutõhusama lahendusega kui alternatiivid allmaakaevandustesse rajatud lõppladestuhoidlad.

Reaktori soojusenergia rakendamise osas vaadeldi vesiniku, ammoniaagi, vedelkütuste ning kaugkütte ja tööstusauru tootmist. Selgus, et tuumajaamas toodetud energia abil on võimalik vesinikku, ammoniaaki ja vedelkütuseid konkurentsivõimeliselt toota. Samuti on jääksoojuse kasutamine kaugküttes ja auru rakendamine tööstusettevõtetes majanduslikult mõttekas teatud distantsidel ja kasutusmustrite puhul.

Fermi Energia jätkab VMRide teemalisi uuringuid ka 2021. aastal, mil fookuses on nii reaktoritehnoloogiad, kui ka kompetentside ja regulatsiooni arendamine.

Fermi Energia tänab!