

Mikael Ahtonen

**PIENYDINREAKTOREIDEN KÄYTTÖ-  
MAHDOLLISUUDET KAUKOLÄMMÖN  
TUOTANNOSSA**  
Tampereen alueen mallinnus

Kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Tarkastaja: Seppo Syrjälä  
Syyskuu 2022

# TIIVISTELMÄ

Mikael Ahtonen: Pienydinreaktoreiden käyttömahdollisuudet kaukolämmön tuotannossa – Tampereen alueen mallinnus  
The potential of Small Modular Reactors in district heat production – Tampere case study  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Tekniikan ja luonnontieteiden TkK-ohjelma, ympäristö- ja energiatekniikka  
Syyskuu 2022

---

Ydinvoima tulee olemaan yksi tulevaisuuden energiajärjestelmien kulmakivistä sen vähäisten päästöjen vuoksi. Sen kokonaispäästöt tuotettua energiaa kohden ovat alhaisimpia kaikista energiantuotantomuodoista. Vähähiilisiä tuotantomuotoja tarvitaan huomattavasti enemmän ilmastomuutoksen ja -lämpenemisen hillitsemiseksi. Pelkät aurinko- ja tuulivoima eivät riitä niiden tuotantovaihteluvuoksien takia vaan tarvitaan myös tasaista energiantuotantoa. Niillä ei myöskään pystytä tuottamaan kaukolämpöä suoraan vaan joudutaan käyttämään joko sähkövastuksia tai lämpöpumppuja lämmöntuotantoon.

Työn tavoite on selvittää modulaaristen pienydinvoimaloiden (engl. Small Modular Reactor, SMR) käyttömahdollisuutta kaukolämmöntuotannossa. Selvitys tehdään teknistaloudellisella vertailulla, jossa verrataan eri lämmöntuotantomenetelmiä pienydinvoimaloihin. Verrattavaksi SMR:ksi valikoitui kahden eri valmistajan SMR-konseptit, jotka kummatkin ovat kevytvesireaktoreita. Nämä valikoituivat tarkasteltavaksi niiden luvittamisvaiheiden sekä tiedon runsauden takia. Kyseiset voimalat ovat olleet eniten mediassa esillä sekä niiden tyyppihyväksynnät eri maiden ydinsäätelylaitoksilla ovat pisimmällä kaikista SMR:stä.

Työ jakautuu kolmeen pääosaan. Ensimmäisessä osassa käydään läpi kaukolämpöön liittyviä teknologioita ja erilaisia SMR-konsepteja, jotka on valittu niiden teknologisen kypsyysasteen perusteella. Kyseinen osa on pääasiallisesti kirjallisuustutkimusta. Toisessa osassa käydään läpi lainsäädännöllistä puolta ydinvoimasta kaukolämmönlähteenä. Lainsäädäntö tällä hetkellä aiheuttaa jonkin verran ongelmia ydinkaukolämpöön, sillä nykyiset ydinvoimaan liittyvät lait ja säädökset ovat pääosin laadittu suurille ydinvoimaloille 1980-luvulla. Varoalueet ja -määräykset aiheuttavat sen, että nykyisellä lakipohjalla minkäänlaisia ydinvoimaloita, ei voida suurien kaupunkien välittömään läheisyyteen. Edes SMR:iä jotka pääosin omaavat sisäiset turvajärjestelmät ydinkatastrofien estämiseksi ei voida rakentaa nykyisellä lakipohjalla. Lakiuudistusta ydinvoimaan liittyen on alettu valmistelemaan Työ- ja elinkeinoministeriön toimesta vuonna 2019.

Tämän tutkimuksen tuloksena saatiin, että pienydinvoimala voi olla taloudellisesti kannattava vaihtoehto kaukolämmöntuotantoon muuttuvassa yhteiskunnassa. Tuloksessa on kuitenkin huomattava määrä epävarmuutta, sillä SMR:ien hinnoista ja kustannuksista ei ole varmaa tietoa. Myös SMR:ien normaalia kaukolämpökattilaa suurempi lämmöntuottopotentiaali voi aiheuttaa kannattavuusongelmia riippuen siitä, että minne pienydinvoimala sijoitetaan.

Avainsanat: Pienydinvoima, SMR, kaukolämpö, uudet energiajärjestelmät, vähähiilinen energiamuoto, ydinvoiman lainsäädäntö

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. TEKNOLOGIAT .....	2
2.1    Kaukolämpö ja -verkot.....	2
2.2    NuScale SMR .....	4
2.3    GE Hitachi BWRX-300 .....	5
2.4    Muut reaktorityypit.....	6
2.4.1 Kairos Power KP-FHR .....	7
2.4.2 HTR-PM.....	8
3. LAINSÄÄDÄNTÖ .....	9
4. TAMPEREEN ALUEEN MALLINNUS JA KUSTANNUSARVIOINTI.....	11
4.1    Laskentamenetelmät.....	11
4.2    Ydinvoimaloiden kustannukset.....	12
5. TULOKSET .....	14
5.1    Mallinnus.....	14
5.2    Mallinnuksen virhearvio.....	19
6. YHTEENVETO.....	21
LÄHTEET .....	22

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

SMR	engl. Small modular reactor, modulaarinen pienydinreaktori
CHP	engl. Combined heat and power, lämmön ja sähkön yhteistuotanto
HOB	engl. Heat only boiler, lämpökattila pelkästään lämmön tuotantoon
LOCA	engl. Loss-of-coolant accident, jäähdytysaineen menetyksen hätätilanne
NRC	Yhdysvaltain ydinsäätely komissio
STUK	Säteilyturvakeskus
NPM	NuScale Power Module. NuScale yhtiön nimitys omasta SMR-konseptistaan

# 1. JOHDANTO

Ilmastonmuutos sekä ilmaston lämpeneminen on yksi suurimmista globaaleista uhkista nyt ja tulevaisuudessa. Energiasektori pois lukien liikenne kattoi vuonna 2016 noin 55,3 % globaaleista hiilidioksidipäästöistä. Tässä luvussa on mukana teollisuuden, rakennusten sekä hajapäästöt sähkön- ja lämmöntuotannosta. (Ritchie & Roser, 2020) Ilmastokatastrofin hidastamiseksi ja pysäyttämiseksi koko energiasektorin päästöjä pitäisi laskea huomattavasti tulevina vuosikymmeninä, jonka vuoksi vähähiilisiä energiantuotantomenetelmiä kehitetään jatkuvasti.

SMR:ien (Small Modular Reactor) eli modulaaristen pienydinreaktoreiden hyödyntäminen energiantuotannossa on yksi parhaimmista keinoista päästä eroon fossiilisia energianlähteitä käyttävästä sähkön- ja lämmöntuotannosta. Ydinvoima on tällä hetkellä yksi suurimpia vähähiilisiä primäärienergian tuotantomenetelmiä kattaen vuonna 2019 noin 4,28 % koko maapallon energiantuotannosta. Kokonaisuudessaan ydinvoima kattoi hieman yli kolmasosan vähähiilipäästöisten energiantuotantomenetelmien tuotantomäärästä. ('bp Statistical Review of World Energy', 2021)

Vaikka monet uutistoimistot ja jopa asiantuntijatkin sanovat SMR:iä uusiksi hienoiksi teknologioiksi, on tekniikkaa ollut jo olemassa 1960-luvulta asti. Yhdysvallat ja Neuvostoliitto ovat kummatkin käyttäneet laivastojensa laivoissa ydinvoimaloita sähkön ja työntövoiman kehittämiseen ja etenkin Venäjä käyttää suurissa määrin ydinvoimaa laivojen voimanlähteenä. Laivapohjaiset ydinvoimalat ovat hyvin pitkälle standardisoituja ja yhteneviä, minkä vuoksi Venäjän omat SMR-konseptit pohjautuvat jo laivoissa käytettäviin reaktoreihin.

Nykyisiä suurten- ja keskikokoisten kokoluokan hiilivoimaloita on mahdollista jälkikäteisennuksilla päivittää käyttämään SMR:iä. Qvist et al. (2021) ovat tehneet tutkimuksen Puolassa olevien hiilivoimaloiden jälkikäteisasennuksien ja päivityksien mahdollisuuteen. Tutkimuksessa todettiin, että jälkikäteisasennukset ovat mahdollisia, mutta investoinnin kannattavuus riippuu todella paljon valitusta SMR:stä.

Luvussa 2 käsitellään kaukolämpöverkostoja ja SMR:ien tekniikkaa. SMR:ien tekniikassa keskitytään pääosin reaktorin sopivuuteen kaukolämmön tuotantoon ja missä vaiheessa reaktorin luvitus on. Luvussa 3 käsitellään SMR:iin liittyvää lainsäädäntöä ja esitetään lakipykälä, jotka saattavat olla este hyödylliseen kaukolämmön tuotantoon SMR:illä. Luvussa 4 esitetään menetelmät, joilla Tampereen alueen mallinnus tehdään, jonka jälkeen luvussa 5 esitetään mallinuksen tuloksia ja virhearviota. Luvussa 6 esitetään johtopäätökset mallinuksen tuloksista.

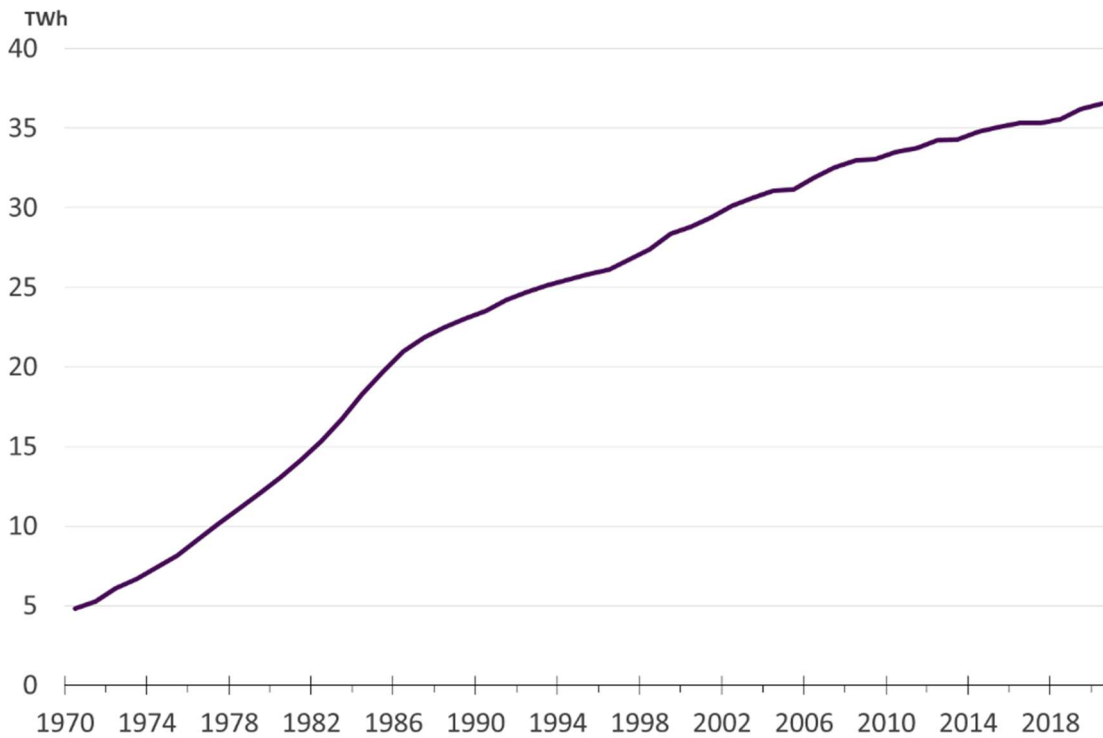
## 2. TEKNOLOGIAT

SMR:ksi luokitellaan IAEA:n (International Atomic Energy Agency) mukaan edistykselliset alle 300 MW sähkötehon reaktorit, jotka on suunniteltu rakennettavaksi tehtaissa ja rahdattavaksi laitospaikalle. Koska SMR:t ovat edistyksellisiä ydinreaktorikonsepteja, ne omaavat luontaiset ja passiiviset turvallisuusominaisuudet. Lisäksi SMR:t sopivat huomattavasti paremmin sähkön ja lämmön yhteistuotantoon sekä muihin kuin sähkötekniisiin sovelluksiin. Perinteisiin suuren kokoluokan ydinvoimaloihin verrattuna SMR:t sopivat myös paremmin alueille, joilla on vähemmän kehittynyt infrastruktuuri. (Reitsma et al., 2020)

### 2.1 Kaukolämpö ja -verkot

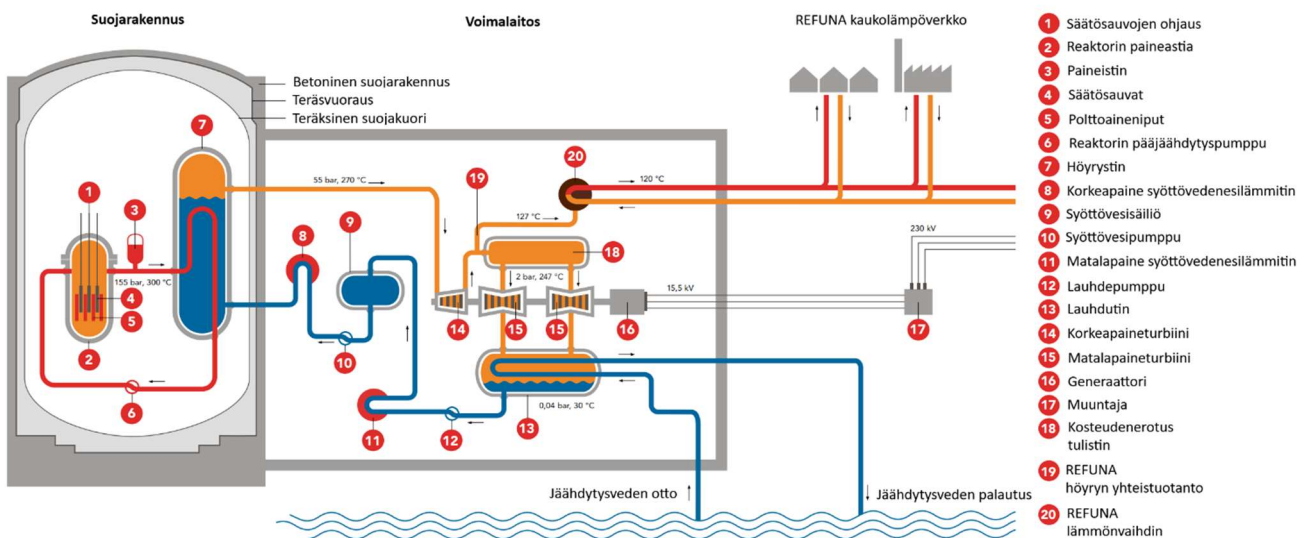
Kaukolämpö on yksi keino lisätä voimalaitoksen hyötysuhdetta huomattavissa määrin. Kaukolämpö tuotetaan joko suoraan lämmittämällä vettä lämpökattiloilla tai hyödyntämällä sähkövoimalaitosten hukkalämpöjä, kuten lauhde- tai savukaasulämpöjä. Suurin osa Suomen kaukolämmöstä tuotetaan CHP-voimalla, eli hyödyntämällä sähköntuotannon lauhde-/vastapainelämpöjä. Vuonna 2019 Suomen kaukolämmöstä 66,6 % tuotettiin vastapainelämmöillä tai muilla vastaavilla tekniikoilla (Energiateollisuus ry, 2020).

Kaukolämpö on ylivoimaisesti yleisin lämmitysmuoto asuintaloissa Suomessa. Vuonna 2019 kaukolämmitettyjen asuntojen asukasluku oli yhteensä 2,94 miljoonaa henkilöä ollen 53% vuoden 2019 Suomen asukasluvusta (Energiateollisuus ry, 2020). Kaukolämmön käyttö on ollut jatkuvassa kasvussa Suomessa. Kaukolämmön lämpötilakorjattua käyttöä havainnoi kuva 1. Lämpötilakorjaus tarkoittaa sitä, että käytön määrissä on huomioitu lämpötilan vaikutus ja vaikutuksista on tehty suhdelukuja.



**Kuva 1 Kaukolämmön lämpötilakorjattu käyttö (Energiateollisuus ry, 2021)**

Ydinvoimaa käytetään tällä hetkellä pienissä määrin kaukolämmön tuotantoon. Esimerkiksi Sveitsissä Refuna AG tuottaa Beznaun ydinvoimaloista maksimissaan noin 75 MW kaukolämpöä lähialueiden asukkaille (Handl, 1998). Vuonna 2020 Beznaun ydinvoimalayksiköt tuottivat yhteensä 159 GWh kaukolämpöä (Refuna AG, 2021).



**Kuva 2 Beznaun ydinvoimalan kaavio (muokattu lähteestä Beznau nuclear power plant, 2022)**

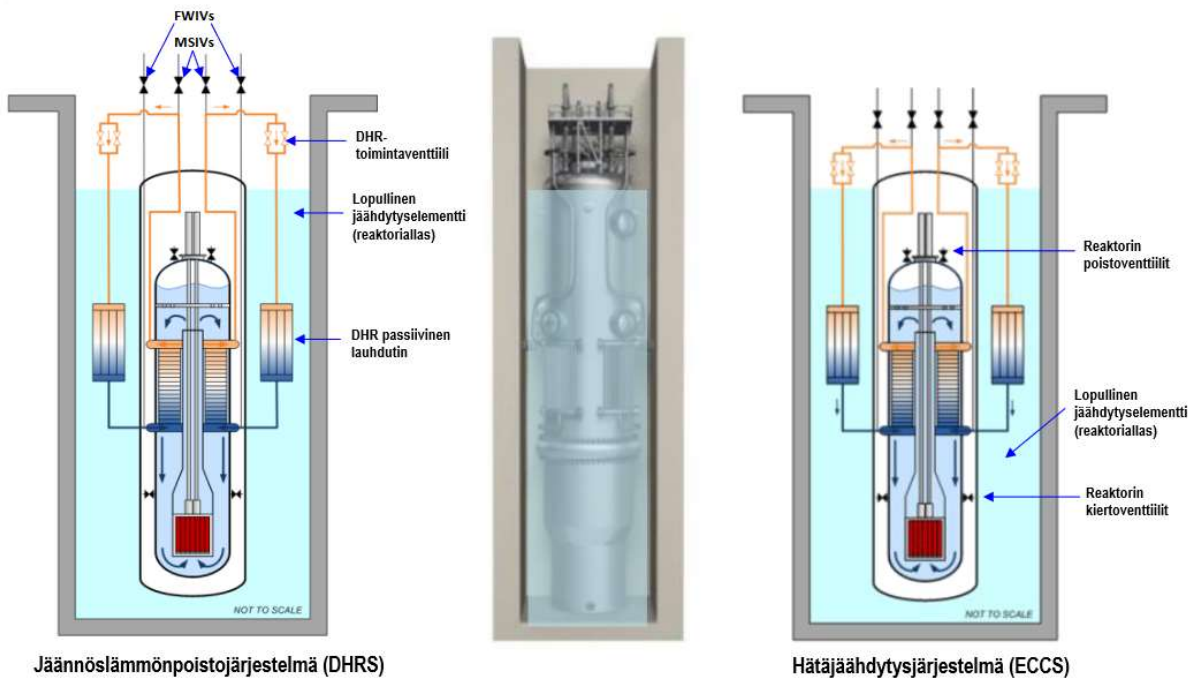
Kiina on myös havainnut ydinvoiman hyväksi vaihtoehdoksi kaukolämmön tuotantoon. Hiilivoimalat ovat Kiinan itärannikon kaupungeissa aiheuttaneet monia ongelmia, kuten muun muassa usvaa ja hengitysilman epäpuhtautta. Yanlong DHR-400 ydinreaktori on Kiinan kansallisen ydinvoimayhtiön (CNNC) pilottiprojekti, joka tuottaa 400 MW lämpötehoa. Reaktorilla ei tuoteta ollenkaan sähköä. DHR-400 on CNNC:n ehdotus uusien hiilivoimaloiden rakentamisen tilalle päästöttömyyden ja Kiinan energiatuotantotavoitteiden vuoksi. Lisäksi reaktori on suunniteltu olemaan kustannustehokas. Lämmöntuotannon hinta on kaavailtu olemaan samaa luokkaa hiiltä polttavan kattilan kanssa. DHR-400-laitoksen on tarkoitus aloittaa kaupallinen lämmöntuotanto lähiaikoina Pekingin alueella noin 500000 asukkaalle. (Li Nan, 2018)

## 2.2 NuScale SMR

NuScalen NPM (NuScale Power Module) SMR-konsepti on tämänhetkisistä kaupallisten reaktoreiden projekteista pisimmällä. Se on saanut NRC:n (Yhdysvaltain ydinsäätely komissio) tyyppihyväksynnän ensimmäisenä SMR:nä maailmassa (U.S.NRC, 2021a). NuScalen tavoitteena on saada reaktorimoduulit kaupalliseen tuotantoon vuoteen 2030 mennessä ja vuonna 2020 NuScale alkoi Carbon Free Power Projectin (CFPP) ja Utah Associated Municipal Power Systemsin (UAMPS) kanssa rakentamaan pilottivoimalaa Idaho Fallsiin Yhdysvalloissa. Lokakuussa 2020 pilottiprojekti sai Yhdysvaltain energiaministeriöltä 1,355 miljardin Yhdysvaltain dollarin rahoituksen. (NuScale Power, 2021a)

NuScalen reaktorimoduuli perustuu jo pitkän aikaa energiantuotanto käytössä olevaan painevesireaktoritekniikkaan ja käyttää samalla hidastinaineena vettä, josta on poistettu epäpuhtaudet. Painevesireaktorissa reaktoriytimen jäähdytysvettä ei kiehuteta suoraan vaan sitä pidetään niin korkeassa paineessa, että vesi ei kiehu. Painevesireaktoreissa on kaksi eri piiriä, jotka ovat primääripiiri eli jäähdytyspiiri ja sekundääripiiri eli höyrypiiri. NuScalen reaktorimoduulin tapauksessa jäähdytysvettä pidetään primääripiirissä 138 barin paineessa ja jäähdytysvesi tulee reaktoriyttimeen 265 °C lämpötilassa ja poistuu 321 °C lämpötilassa. Primääripiiri toimii luonnonkierrolla. NuScalen SMR tuottaa 200 MW lämpöteho ja 60 MW sähkötehoa. (Reitsma et al., 2020) NuScale mainostaa omilla nettisivuillaan 77 MW sähkötehoa ja 250 MW lämpötehoa, mutta nämä lukemat ovat tyyppihyväksynnän saaneen reaktorin evoluutiomallille NPM-20. Teknisesti NPM-20 ei eroa tyyppihyväksytystä mallista vaan NuScale on edistyksellisen testaamisen ja mallinnuksen käyttämisen ansiosta todennut, että reaktorimoduuli pystyy tuottamaan enemmän sähkö- ja lämpötehoa. (NuScale Power, 2020)

NuScalen edistyksellinen reaktorikonsepti omaa huomattavan määrän passiivisia turvajärjestelmiä. Koska primääripiiri toimii luonnonkierrolla, eli se ei käytä pumppuja reaktoriytimen jäähdyttämiseen, pystyy se jäähdyttämään ydintä käytännössä loputtomiin hätätilanteissa. Lisäksi reaktorimoduulit on suunniteltu upotettavaksi vesialtaaseen, mikä antaa Loss-of-coolant accident (LOCA) tapauksissa passiivisen jäähdytys-elementin lämmönpoistoon. (NuScale Power, 2021b) (IAEA, 2020)

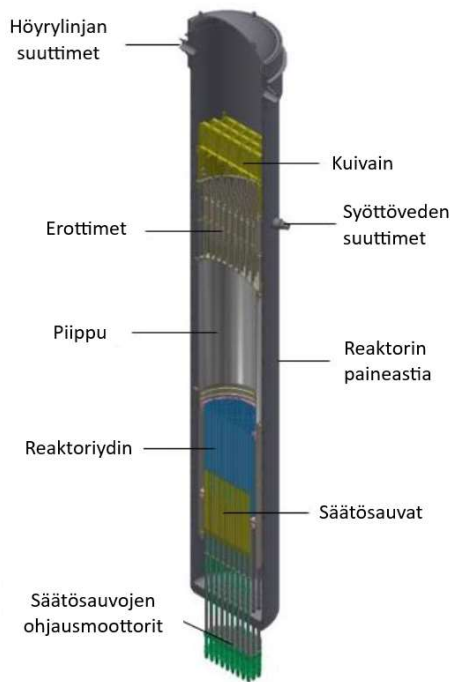


**Kuva 3 NuScale SMR:n lämmönpoisto turvajärjestelmät (muokattu lähteestä IAEA, 2020)**

NuScale SMR:n uudelleenlatausväli on 24 kk ja reaktorissa käytettävä uraani on maksimissaan 5% rikastettua  $UO_2$  (IAEA, 2020). Reaktorimoduuli on kooltaan 23,2 m korkea ja halkaisija on 4,6 m. Koossa on mukana reaktori, sekä höyrystin osa. NuScalen mukaan yksi reaktori moduuli painaa noin 700 tonnia ja ne on suunniteltu rahdattavaksi kolmessa osassa tehtaalta. (NuScale Power, 2021b)

## 2.3 GE Hitachi BWRX-300

GE Hitachin BWRX-300 reaktori perustuu jo NRC:n tyyppihyväksymään 1520 MW sähkötehon Economic Simplified Boiling Water Reactor (ESBWR) reaktoriin. Kuten suuremman luokan reaktori johon BWRX-300 pohjautuu, on se myös kiehumisvesireaktori. Reaktori siis kiehuttaa vettä suoraan energiantuotantoa varten eikä käytä lämmönvaihtimia. Reaktorin jäähdytys toimii NuScalen tapaan luonnonkierrolla, mutta tekniikka perusteisesti kuitenkin aivan eri tavalla reaktortyyppin takia. NuScale SMR:n tapaan BWRX-300 käyttää reaktorin hidastinaineena ja samalla jäähdytysaineena vettä. Reaktorimoduulissa on reaktoriytimen jälkeen piippuosa, johon reaktoriytimestä syntyvä höyry johdetaan luonnonkierrolla. Piipussa on vesihöyryn ja reaktorimoduulin paineastiaan syötetyn jäähdytysveden seosta. Piipun yläosassa on höyrynerotin kokonaisuus, jossa höyry erotetaan seoksesta, jonka jälkeen vesihöyry johdetaan höyryn kuivaimeen. Kuivaimesta höyry lähtee höyrylinjaan energiantuotantoa varten (IAEA, 2019).



**Kuva 4 BWRX-300 Painesäiliö kokonaisuus ja sen osat (IAEA, 2019)**

BWRX-300 on suunniteltu peruskuormatuotantoon, 50–100 % kuorman seuraustuotantoon, sekä teollisuus- ja kaukolämmön tuotantoon. Reaktorimoduuli pystyy tuottamaan 300 MW sähkötehoa ja 870 MW lämpötehoa. Moduulista on mahdollista saada 100–200 °C prosessihöyryä teollisuuskäyttöön. (IAEA, 2019)

BWRX-300 uudelleenlatausväli on sama kuin NuScalella eli 12–24 kuukautta ja käyttää samanlaisen rikastusasteen polttoainetta. BWRX-300 on myös hyvin samankokoinen NuScalen NPM:n kanssa. Yksi BWRX-300 moduuli on kooltaan 26 metriä korkea ja halkaisijaltaan 4 metriä. Koko on moduulin paineastialle, joka kokonaisuudessaan painaa 485 tonnia. (IAEA, 2019)

Vaikka BWRX-300 pohjautuukin jo tyyppihyväksynnän saaneeseen reaktoriin, tarvitsee se kuitenkin myös oman tyyppihyväksynnän. GE Hitachi aloittikin lisensiointi- ja tyyppihyväksyntäprosessin U.S NRC kanssa joulukuussa 2019. (GE Hitachi, 2020) Tällä hetkellä BWRX-300 voi saada tyyppihyväksynnän jo tammikuussa 2022 (U.S.NRC, 2021b), joka sopisi GE Hitachin tämänhetkiseen kaupallistamisen aikatauluun hyvin. GE Hitachi tähtää tällä hetkellä siihen, että he alkaisivat rakentamaan ensimmäistä BWRX-300 reaktoria vuoden 2022 aikana. GE Hitachi pyrkii saamaan SMR:nsä kaupalliseksi vuoteen 2027/28 mennessä.

## 2.4 Muut reaktortyypit

SMR:iä kehitetään tällä hetkellä myös muilla ytimen hidastinaine- ja jäähdytysmenetelmillä. Menetelmiä ovat mm. korkean lämpötilan kaasujäähdytys, sulasuolajäähdytys ja nestemäinen metallijäähdytys. (Reitsma et al., 2020) Tekniikat ovat hyvin eriäviä, mutta monessa eri reaktorikonseptissa on

muutamia yhteisiä pääpiirteitä. Reaktorit voivat toimia niin sanottuina ”breeder” reaktoreina, eli reaktorit voivat uudelleen rikastaa itselleen polttoainetta. Tämän tyyppiset reaktorit käyttävät pääosin toriumia polttoaineena, koska se muodostaa fissiiliä uranium-233:sta beetahajoamisella absorboidessaan neutroneita. (Singh et al., 2017)

Monet kaas-, sulasuola- sekä metallijäähdytteiset reaktorikonseptit ovat kuulareaktoreita. Niissä polttoaine ei ole tutummassa sauvamaisessa muodossa, vaan polttoaine on noin tennispallon kokoinen kuula. Kuulien määrä reaktorissa vaihtelee reaktorin mukaan, mutta yhteistä niillä on se, että kuulia syötetään reaktoriin ja poistetaan reaktorista jatkuvasti. Kuulia voidaan syöttää uudelleen reaktoriin, mikäli niiden reaktiivisuus on vielä tarpeeksi korkea. (Reitsma et al., 2020; Blandford et al., 2020)

Muilla kuin vesireaktori tyyppisillä reaktoreilla on myös luontainen etu siinä, että niiden toimintalämpötilat ovat huomattavasti korkeammat. Esimerkiksi Olkiluoto 3 painevesireaktorin jäähdytysveden lämpötila on maksimissaan noin 328 °C ja sekundääri- eli höyrypiirin lämpötila on 290 °C (TVO, 2010). Verrattaessa esimerkiksi jo Kiinassa energiantuotannossa olevaan HTR-PM kaasujäähdytteiseen SMR:ään jää vesireaktoreiden toimintalämpötilat erittäin alhaisiksi. HTR-PM toimintalämpötila on noin 750 °C ja laitoksen höyrypiiri toimii 566 °C (Zhang et al., 2009). Korkeammat rankine prosessin lämpötilaerot johtavat prosessihyötysuhteen kasvamiseen. Tämän takia Olkiluoto 3 hyötysuhde jää vain 37%:in (TVO, 2010) verrattuna HTR-PM:n 42%:in (IAEA, 2011).

### **2.4.1 Kairos Power KP-FHR**

Kairos Power on yhdysvaltalainen yritys, jonka suunnittelema KP-FHR reaktorikonsepti hyödyntää sulasuolajäähdytystä. Konseptin käyttämä noin 20 % rikastusasteen polttoaine on kuulamaisessa muodossa ja sitä syötetään jatkuvalla syötöllä reaktoriin. Kuulat kulkevat reaktorin läpi vain kerran. Reaktorin lämpöteho on 320 MW ja sähköteho 140 MW. (Reitsma et al., 2020)

KP-FHR sulasuolareaktorin etuna verrattuna kevytvesireaktoreihin on se, että sen käyttölämpötilat ovat paljon korkeammat. Reaktori käyttää jäähdytysaineena FLiBe:ä eli fluoridi suolaseosta ( $\text{Li}_2\text{BeF}_4$ ). Seoksen sulamispiste on 460 °C ja kiehumispiste 1430 °C. Lisäksi polttoainekuulat kestävät jopa 1600 °C asti. Jäähdytinaineen sekä polttoaineen korkeiden lämpötilojen kestämisominaisuuksien ja reaktorin alhaisen 2 baarin toimintapaineen ansiosta reaktorin mahdolliset polttoainevahinkoskenaariot ovat suhteellisen pienet. (Blandford et al., 2020)

Kairos Power tähtää ensimmäiseen KP-FHR reaktorin valmistumiseen ja käynnistämiseen vuoteen 2030 mennessä (Reitsma et al., 2020). Kairos Power sai Yhdysvaltojen energiaministeriöltä seitsemän vuoden ja 303 miljoonan dollarin rahoituksen joulukuussa 2020 demonstraatio ydinreaktoria

varten. Yritys aikoo vuonna 2023 aloittaa Hermes nimisen 35 MW lämpötehon demonstraatioreaktorin rakentamisen. (Kairos Power, 2021b) Marraskuussa 2021 US N.R.C otti Hermeksen rakennuslupahakemuksen käsittelyyn (Kairos Power, 2021a).

## **2.4.2 HTR-PM**

Jo aikaisemmin mainittu HTR-PM (High Temperature Gas-Cooled Reactor – Pebble-bed Module) on Kiinan valtion omistaman sähköyrityksen China Huaneng Groupin, kansallisen ydinvoimayhtiön China Nuclear Engineering Corporationin, sekä Tsinghuan yliopiston ydinteknologian ja uuden energian teknologian instituutin yhteisprojekti. Osapuolien vastuut projektista ovat 47.5, 32.5 ja 20 prosenttia samassa järjestyksessä. Tsinghuanin yliopisto on projektin johtava tutkimus- ja kehitystoimija. (World Nuclear News, 2021)

HTR-PM on KP-FHR tapaan kuulareaktori, mutta polttoaineen rikastusaste on huomattavasti alhaisempi 8.5 %. Reaktori koostuu kahdesta moduulista, joiden yhteinen lämpöteho on 500 MW ja tuotama sähköteho yhdelle turbiinille on 210 MW. (Zhang et al., 2016) HTR-PM kiinnitettiin Kiinan sähköverkkoon joulukuussa 2021 (World Nuclear News, 2021).

### 3. LAINSÄÄDÄNTÖ

Säteilyturvakeskus hallinnoi Suomessa ydinvoimalaitoksien sijaintipaikkoja. Sen tehtävänä on Ydinergialain (990/1987) 7 r §:n mukaan asettaa lain mukaisen turvallisuustason toteuttamista koskevat yksityiskohtaiset turvallisuusvaatimukset. Samassa artiklassa sanotaan myös, että jos luvanhaltija vakuuttavasti osoittaa, että esitetty menettelytapa tai ratkaisu toteuttaa lain mukaisen turvallisuustason, voi Säteilyturvakeskus hyväksyä sen.

Ongelmana lainsäädännöllisesti SMR:iä kohtaan on tällä hetkellä se, että niitä arvioidaan turvallisuuden kannalta samalla lailla kuin suuremman luokan ydinreaktoreita. Lisäksi lainsäädäntö ja ohjeet pohjautuvat hyvin pitkälti vain tällä hetkellä oleviin kevytvesireaktoreihin. Esimerkiksi monet SMR-konseptit voivat olla monireaktorisia, kuten NuScale, ja nykyinen lainsäädäntö ohjeistaa siten, että jokaiselle reaktorille joudutaan tekemään oma rakentamislupa. Lainsäädännöllistä ongelmaa lisää myös se, että SMR tekniikka kehittyä tällä hetkellä nopeammin, mitä lainsäädäntö pysyy perässä. (Ahonen et al., 2020) Työ- ja elinkeinoministeriölle tehdyssä ydinlaitosten elinkaaren sääntelyn kehittämiseen liittyvässä raportissa todettiin, että ydinenergiaan liittyvät säännökset ja lait ovat osin päällekkäisiä ja vaikeasti lähestyttäviä (Liukko et al., 2020). Esimerkiksi Olkiluodon kolmannen voimalayksikön toimittajalle Arevalle tuli yllätyksenä Suomen vaatimustasot lainsäädännöllisesti. Areva ei ollut kohdannut ennen muissa projekteissaan yhtä tarkkaa seurantaa ja arviointia, minkä vuoksi ohjeet ja säädökset ovat olleet yksi syy Olkiluoto kolmosen viivästymiseen. (Laaksonen, 2010)



**Kuva 5 Ydinlaitosten vaatimusten sääntelykokonaisuus (Liukko et al., 2020)**

Tällä hetkellä lainsäädäntö vaatii ydinlaitoksilta viiden kilometrin suojavyöhykettä (STUK, 2018). Suojavyöhykkeellä tarkoitetaan aluetta, jossa ei sijaitse huomattavan ihmiskävijämäärän kohteita, ei sijaitse yhteiskunnallisesti merkittäviä toimintoja, pysyvien asukkaiden määrä on rajattu niin, että kyseiselle alueelle voidaan laatia ja toimeenpanna tehokas pelastussunnitelma. Lisäksi suojavyöhykkeen maankäytön ja rakentamisen ratkaisuisa säilytetään pysyvän ja vapaa-ajan väestön määrä sillä tavalla, että se ei kasvaisi ydinvoimalaitoksen rakentamisen ja käytön aikana. (STUK, 2019) Suojavyöhykkeen määräys on ongelmallinen kaukolämmön tuotannon kannalta, sillä kaukolämpö on hyvin usein tuotettu isojen asutuskeskusten välittömässä läheisyydessä. SMR:illä kaukolämmön tuotto olisi haastavaa kasvavissa kaupungeissa, koska kaavoituksissa jouduttaisiin huomioidaan ydinvoimalaitos ja sen suojavyöhyke. Mikäli kaukolämpöä tuottava ydinvoimalaitos taas sijoitettaisiin huomattavan etäisyyden päähän suuremmista asutuskeskuksista, tarvittaisiin kaukolämpöverkoston lisälämmöntuottajia, jotta menolämpötila ei tippuisi liian alhaiseksi verkoston ääripäissä putkien lämpöhäviöiden takia (Martikainen, 2013).

Mikäli Ydinenergialakia uudistettaisiin siten, että SMR voimalaitoksille ei tarvitsisi erillisiä suojavyöhykkeitä, voisi ydinvoimalaitoksen asettaa esimerkiksi Naistenlahden voimalaitosalueelle jonka välittömässä läheisyydessä on Näsijärvi isona jäähdytysveden lähteenä ja alue on kutakuinkin keskipiste Tampereen kaukolämpöverkostossa (Tampereen Sähkölaitos Oy, 2017).

## 4. TAMPEREEN ALUEEN MALLINNUS JA KUSTANNUS-ARVIOINTI

Teknitaloudellinen vertailu tehdään Tampereen kaupungin alueelle. Vertailussa verrataan SMR:ien tuotantoa nykyiseen tuotantoon. Vuonna 2019 94.5 % kaupungin asukkaista asui kaukolämmöllä lämmitetyissä taloissa. Kyseisenä vuonna kaukolämpöä kulutettiin 2232.5 GWh. Tampereen sähkölaitos omistaa 21 lämpökattilaa ja voimalayksikköä Tampereen alueella. Niiden yhteenlasketut sähkö- ja lämpötehot ovat 348 MW ja 1102 MW vastaavasti. (Energiateollisuus ry, 2020) Tampereella kaukolämpö maksoi 66.6 €/MWh 1.1.2022 (Energiateollisuus ry, 2022).

### 4.1 Laskentamenetelmät

Teknitaloudelliseen vertailuun käytettävät kaavat ovat varsin yksinkertaistettuja. Kaavat perustuvat pitkälti jo tehtyjen tutkimuksien laskukaavoihin.

Kaukolämmön kysynnän mallintamiseen käytetään kaavaa 1, (Värri, 2018)

$$D_H(t) = \begin{cases} (17 - T(t))f_H & , (17 - T(t))f_H \geq D_{HB} \\ D_{HB} & , (17 - T(t))f_H \leq D_{HB} \end{cases} \quad (1)$$

missä  $D_H(t)$  on lämmöntarve tunnissa,  $D_{HB}$  on peruslämmönkulutus,  $T(t)$  on kyseisen tunnin lämpötila,  $f_H$  on lämmön skaalauskerroin ja  $t$  on vuoden tuntimäärät 1–8760.

Luku 17 kaavassa 1 on lämmitystarveluku eli astepäiväluku. Luku kuvastaa rakennusten lämmitysenergian tarvetta. Luku on yleisesti käytetty ja se lasketaan 17 °C:ksi oletetun sisä- ja ulkolämpötilan vuorokausikeskiarvon erotuksen perusteella. (Ilmatieteen laitos, 2022b) Peruslämmönkulutuksella tarkoitetaan lämpimän veden käyttöä esimerkiksi suihkuveden lämmittämiseen. Käyttö muodostaa tasaisen lämmöntarpeen riippumatta siitä, mikä on vallitseva ulkolämpötila.

Lämmön skaalauskerroin kaavaan 1 saadaan ratkaistua yhtälön 2 avulla, (Värri, 2018)

$$\sum_{t=1}^{8760} D_H(t) = D_{HA} \quad (2)$$

missä  $D_{HA}$  on vuotuinen lämmöntarve.

Ydinvoimalaitoksen kannattavuuden tarkastelemiseen käytetään yksinkertaistetun takaisinmaksuajan menetelmää:

$$\text{Takaisinmaksuaika} = \frac{\text{Investoinnin kulut}}{\text{Vuotuinen nettotulo}} \quad (3)$$

## 4.2 Ydinvoimaloiden kustannukset

NuScale arvioi 3600 \$/kW ”overnight capital cost” hinnaksi 60 MWe reaktorille ja 2850 \$/kW 77 MWe reaktorille (NuScale Power, 2020). GE Hitachi arvioi, että BWRX-300 pääsisi 2250 \$/kW elinkaari-kustannuksiin. Luku on n:än kappaleen reaktoreille ja yrityksen mukaan se lähentelee maakaasukombivoimalaitoksen elinkaarikustannusta. GE Hitachi tavoittelee reaktorilleen kombivoimalaitoksen kustannushintaa, sillä se näkee suuren markkinapotentiaalin alhaisen kustannuksen SMR:ille. (GE Hitachi, 2021)

NuScalen 12-moduulisen voimalaitoksen kokonaiskustannus on jaettu osiin taulukkoon 1. Lähteenä käytetään Konsta Värri ja Sanna Syrin tekemää tutkimusta NuScale SMR:n käyttömahdollisuudesta Helsingin kaupungin kaukolämmön lähteenä. Tutkimuksessa oli käytetty kustannusten jakamisen lähteenä NuScalen tiedotetta voimalaitoksen kilpailukyvystä markkinoilla ja sen rahoitettavuudesta. Tiedotetta ei ollut enää tämän työn kirjoitushetkellä saatavilla.

**Taulukko 1 NuScalen 12-moduulin voimalaitoksen kustannusjakelu (Värri & Syri, 2019)**

Voimalaitoksen osa	M€
Voimalaitosmoduulit (Moduulin hinta, sekä kuljetuksen ja kokoonpanon hinta)	763
Tekniikkatuki	130
Kohteen infrastruktuuri	54
Reaktorirakennus (Rakennus, jätevarastointi ja pääkomponenttien vaihto)	484
Turbiinirakennukset (2 rakennusta, joissa 6 turbiinia jokaisessa)	315
Voimalaitoksen muut rakennustarpeet (lisärakennukset, jäähdytystornit jne.)	203
Jaettavat kulut (Tilapäiset rakennukset, henkilöstö, rakennustarvikkeet jne.)	491
Muut kulut	167
<b>Kokonaiskustannus</b>	<b>2606</b>

NuScale HOB-voimalaitoksessa voidaan jättää turbiinirakennus kokonaan pois kustannusjaottelusta ja korvata se mahdollisilla lämmönvaihtimien kustannuksilla. Tämä alentaa voimalaitoksen hintaa huomattavasti, kun oletetaan lämmönvaihtimien kustannukseksi 5 miljoonaa euroa.

Koska laskentaa varten käytetään vain yhtä NuScale moduulia voidaan olettaa, että taulukossa 1 oleva voimalaitosmoduulit osa voidaan jakaa 12. Tähän hintaan lisätään 25% lisä, sillä voidaan olettaa, että tuotteesta ei saada paljousalennusta mikä todennäköisesti taulukon hinnassa on. Lisäksi

voidaan olettaa, että reaktorirakennuksen hinnan laskevan 30% sekä muiden rakennustarpeiden poistuvan kokonaan, koska ei tarvitse rakentaa jäähdytysaltaita ja paikkoja 12 moduulille. CHP-voimalan tapauksessa voidaan olettaa, että turbiinirakennuksia tarvitaan vain yksi kappale ja turbiineja kaksi kappaletta. Voidaan myös olettaa, että kaikki muut kulut jakautuvat 1/12 suhteessa CHP- sekä HOB-voimaloiden tapauksessa. CHP-voimalan tapauksessa muihin kuluihin lisätään kuluja siten, että kokonaiskustannukset ovat 5% korkeammat kuin pelkästään sähköä tuottavan voimalaitoksen tapauksessa.

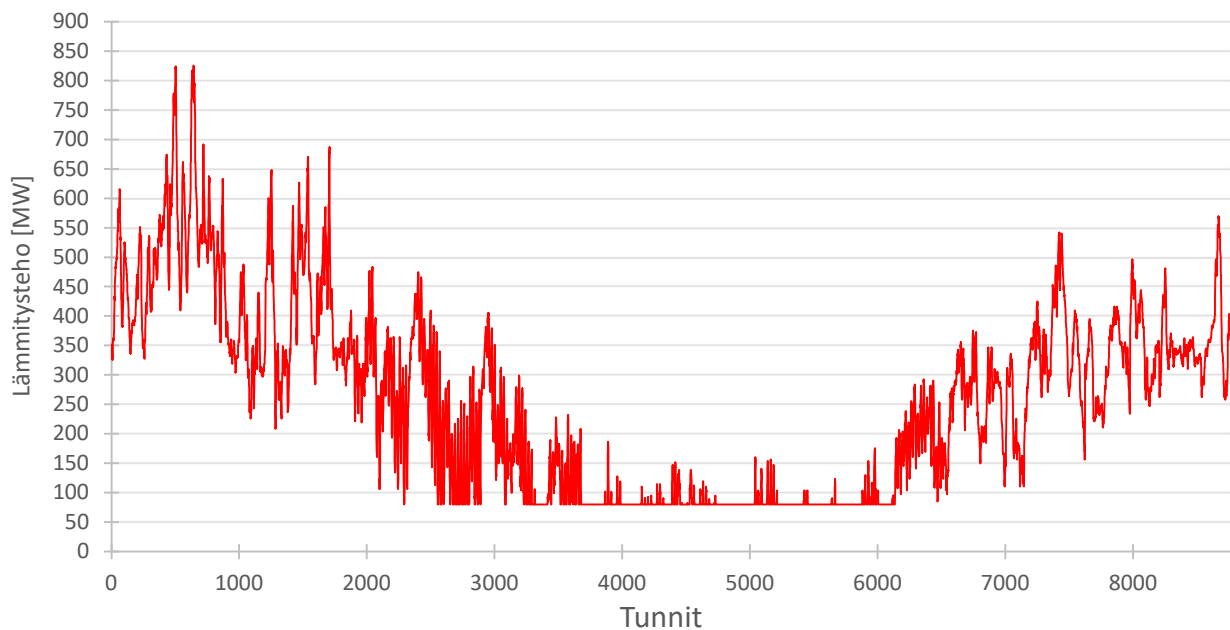
Ydinvoimaloiden polttoaineiden hintojen arvioissa on suurta vaihtelua. Esimerkiksi World Nuclear Association arvioi ydinpolttoaineen keskiarvohinnaksi noin 0.5 Yhdysvaltain senttiä kilowattitunnilta, mikä vastaisi 11.4.2022 vaihtokurssilla 4.58 €/MWh hintaa (World Nuclear Association, 2021). Värri ja Syri käyttivät heidän Helsingin case tutkimuksessa 2.05 €/MWh hinta-arviota ydinpolttoaineelle. Hinta perustuu Fortumin sisäisiin keskusteluihin ja tutkimuksen tekemishetkellä oleviin rikastetun uraanin markkinahintaan, polttoaineen tuottamishintaan, polttoaineen kulumiseen sekä polttoaineen käytöstä poiston kuluihin (Värri & Syri, 2019). Tässä työssä arvioidaan ydinpolttoaineen hinnaksi 3.2 €/MWh. Muut muuttuvat kustannukset oletetaan olevan 1.5 €/MWh. Työssä oletetaan, että voimalaitos ostetaan lainalla, jonka maksuaika on 40 vuotta. Laskennan yksinkertaistamiseksi oletetaan laina korottomaksi.

## 5. TULOKSET

Mallinnus ja laskenta tehtiin NuScale SMR ja GE-Hitachi BWRX-300 reaktoreille. Muista luvussa 2 esittelyistä reaktoreista ei ollut tarpeeksi tietoa saatavilla. Reaktorit ovat pääosin vain tutkimusreaktoreita, joten esimerkiksi kustannusarvioita reaktoreista ei ollut saatavilla.

### 5.1 Mallinnus

Kuva 5 on laskettu kaavojen 1 ja 2 avulla käyttäen Excel taulukkolaskentaohjelmaa. Laskentaan arvioitiin peruslämmönkulutukseksi 80 MW perustuen VTT:n tutkimukseen SMR kaukolämpöön liittyen (Tulkki et al., 2017). Tutkimuksen mallinnus tehtiin Espoon kaupunkiin, jonka kaukolämmönkulutuksen tunnusluvut ovat hyvin samanlaiset kuin Tampereella. Kaukolämpöä käytettiin Espoossa vuonna 2019 2370.9 GWh (Energiateollisuus ry, 2020). Lämpötilahavainnot on saatu Ilmatieteen laitoksen verkkosivuilta ajalle 1.1.2019, klo 0.00 – 1.1.2020, klo 0.00. Lämpötilahavainnot on tehty Tampereen Tampellan havaintoasemalla.

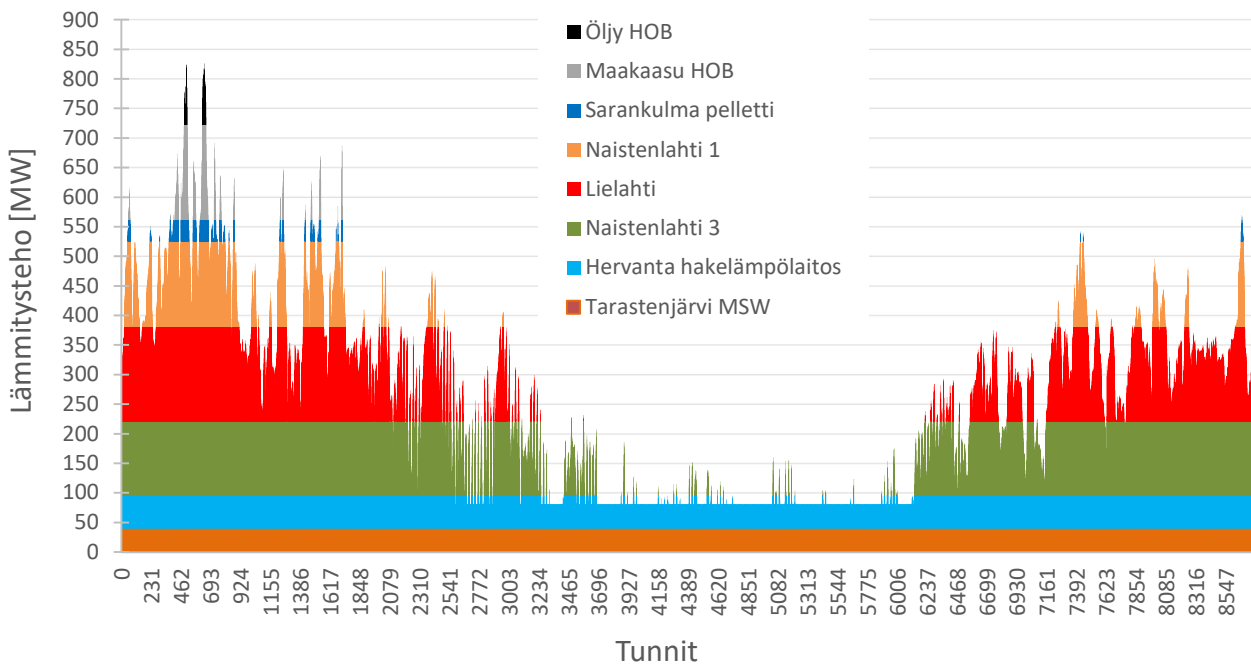


**Kuva 6 Tampereen tunnittainen lämmöntarve vuodelle 2019 (Ilmatieteen laitos, 2022a; Värrä, 2018)**

Lämmöntarpeen tuloksista voidaan päätellä, että GE-Hitachin BWRX-300 reaktorikonsepti on liian suuri Tampereen kaupungin alueelle. Vuoden 2019 aikana alueella oli yhteensä vain 1220 tuntia, jolloin tarvittiin lämmitystehoa yli 435 MW. BWRX-300 pystyy seuraamaan kuormaa vain puoliteholle asti eli noin 435 MW lämpötehoon (IAEA, 2019). Reaktorin käyttötunnit jäisivät kyseisessä tilanteessa niin alhaiseksi, ettei sen rakentaminen olisi suoraan HOB tai CHP voimaan millään tavalla

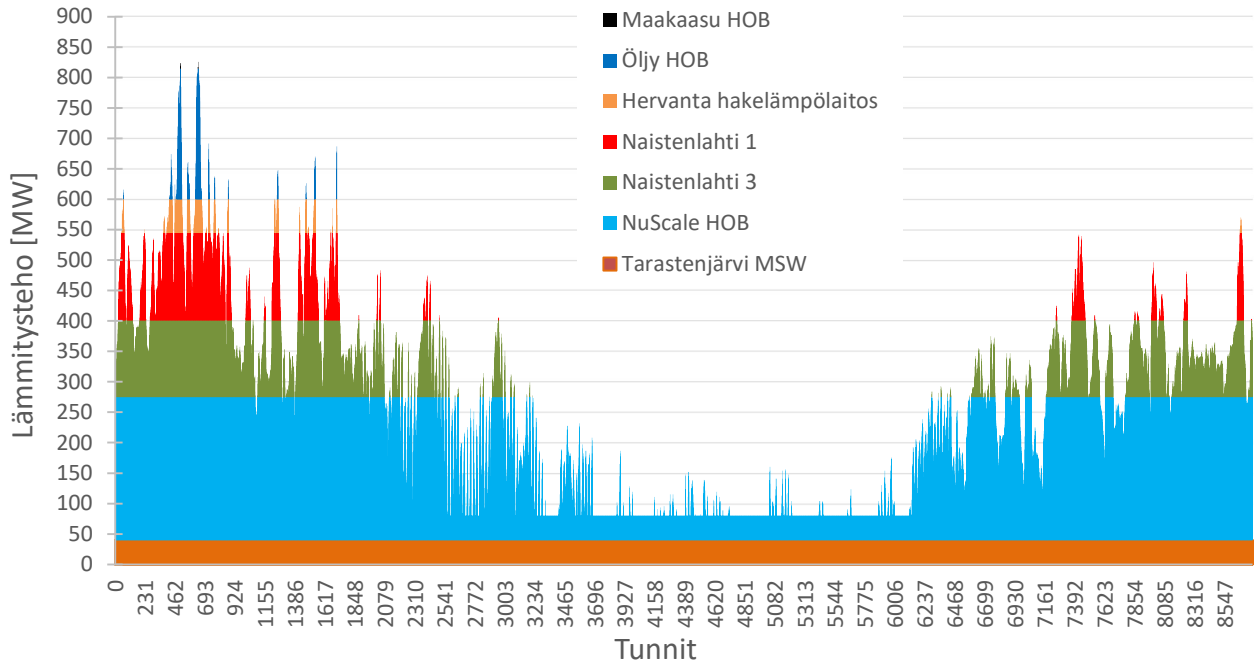
kustannustehokasta. Mikäli kuitenkin BWRX-300 haluttaisiin Tampereen lähistölle sähköntuotantoa varten, voitaisiin todennäköisesti SMR:ään rakentaa samanlainen väliotto kuin Beznaun ydinvoimalalla on tällä hetkellä. Näin voitaisiin tuottaa tarvittava lämpö, jotta katettaisiin peruslämmöntarve Tarastenjärven jätteenpolttolaitoksen kanssa. Jätteenpolttolaitos on tärkeä osa Pirkanmaan jätehuoltoverkostoa ja sinne tuodaan jätettä jopa Jyväskylästä asti. Noin 600000 asukkaan jätteet hyödynnetään energiaksi Tarastenjärvellä. (Tammervoima Oy)

Peruskenaariona toimii kuvan 7 mukainen tilanne. Kyseisessä tilanteessa Naistenlahti 2 voimalaitos on korvattu 2022 loppuvuodesta valmistuvalla Naistenlahti 3 biovoimalaitoksella. Tilanteessa on valittu varavoimalämpökattilat niiden valmistumisvuoden perusteella. Näin minimoidaan kattiloiden mahdolliseen ikään liittyviä ongelmia. Lisäksi Lielahden maakaasukombivoimalaitos on laitettu tärkeysjärjestyksessä ennen modernimpaa Naistenlahti 1 kombivoimalaitosta, sillä Naistenlahti 1 toimi Fingridin tehoreservissä kesäkuuhun 2022 asti. (Tampereen Sähkölaitos Oy, 2020; Fingrid Oyj, 2021).



**Kuva 7 Lämmöntuotanto Tampereella peruskenariossa**

Kun NuScale SMR:llä korvataan kaukolämmöntuotantoa, tarvitsee varavoimalaitoskantaa muuttaa. SMR:n lämpöteho on varsin korkea, jolloin tarvitaan enemmän nopean säädön tuotantokapasiteettia. Kyseisissä tapauksissa Sarankulman pelletti lämpökattila poistetaan käytöstä, vaikka laitos onkin suhteellisen uusi ja myös Lielahden kombivoimalaitos poistettiin käytöstä. Lisäksi tuotantojärjestystä muutettiin öljy ja maakaasu HOB laitosten välillä, koska öljyllä on suurempi tuotantokapasiteetti ja maakaasu HOB:ien säätönopeus on hieman öljyä nopeampi. Tällöin turvataan riittävä lämmöntuotanto mahdollisiin äkillisiin lämmönvaihteluihin



**Kuva 8 Lämmöntuotanto Tampereella NuScale HOB-voimalaitoksella**

Vuoden 2019 lämpötila- ja lämmöntarvekäyrästä NuScale HOB-voimalana huipunkäyttöaika on noin 5851 tuntia lämmönvuosituotannon ollessa 1375 GWh. Kaukolämmönnhinnan ollessa 66.6 €/MWh, tulisi HOB lämmöntuotannosta tuottoa 91.6 miljoonaa €.

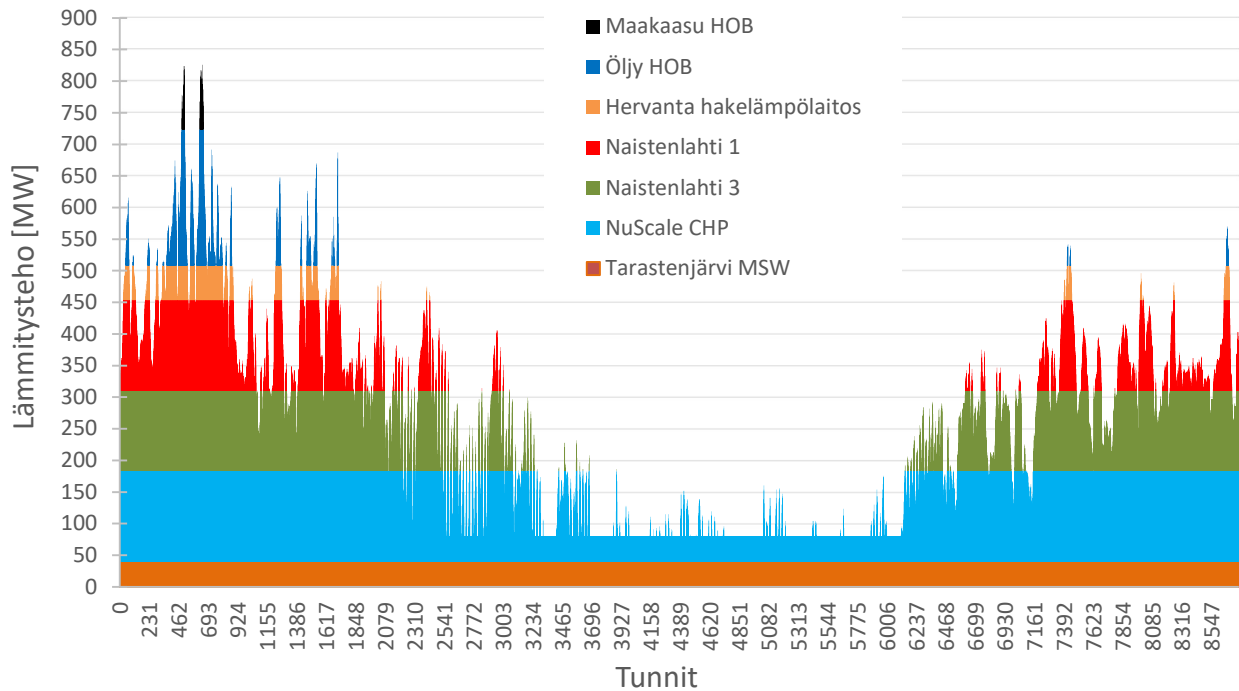
Taulukkoon 2 on koottu HOB NuScale SMR kustannukset. Kustannusjakelun laskemiseen on käytetty kappaleessa 4.2 esitettyä menetelmää. Kustannusjaossa on huomattavaa epävarmuutta ja on vain suuntaa antava, sillä hintojen skaalautuvuudesta ei ole varmuutta. Tämän myötä laskentaan on tehty huomattavia oikaisuja ja oletuksia.

**Taulukko 2 NuScale HOB-voimalaitoksen kustannusjako**

Voimalaitoksen osa	M€
Voimalaitosmoduuli (Moduulin hinta, sekä kuljetuksen ja kokoonpanon hinta)	79
Tekniikkatuki	11
Kohteen infrastruktuuri	5
Reaktorirakennus (Rakennus, jätevarastointi ja pääkomponenttien vaihto)	339
Lämmönvaihdinkokonaisuus	5
Voimalaitoksen muut rakennustarpeet (lisärakennukset, jäähdytystornit jne.)	0
Jaettavat kulut (Tilapäiset rakennukset, henkilöstö, rakennustarvikkeet jne.)	41
Muut kulut	14
<b>Kokonaiskustannus</b>	<b>493</b>

Kustannusjaon perusteella saadaan HOB-voimalan kiinteiksi kustannuksiksi 15.33 miljoonaa euroa vuodessa, kun lainavähennyksiin lisätään 3 miljoonaa muita kiinteitä kustannuksia. Muuttuvat kustannukset ovat yhteensä 4.7 €/MWh, kun polttoaineen 3.2 €/MWh hintaan lisätään 1.5 €/MWh muita muuttuvia kustannuksia. Muut kustannukset kattavat kiinteissä ja muuttuvissa kustannuksissa mm. palkat, huollot ja järjestelmien modernisoinnit.

Yksinkertaistettu takaisinmaksuaika on HOB-voimalan tapauksessa 7.07 vuotta. Investoinnin takaisinmaksuaika on ydinvoimalan noin 40–50 vuoden käyttöikään todella lyhyt, joten voidaan päätellä investoinnin olevan kannattava.



**Kuva 9 Lämmöntuotanto Tampereella NuScale CHP-voimalaitoksella**

Vuoden 2019 lämpötila- ja lämmöntarvekäyrästä NuScale CHP-voimalana huipunkäyttöaika on noin 6602 tuntia lämmönvuosituotannon ollessa 948 GWh ja sähkönvuosituotannon ollessa 421.9 GWh. Kaukolämmöhinnan ollessa 66.6 €/MWh ja sähkön ollessa 150 €/MWh, tulisi CHP lämmöntuotannosta tuottoa 63.1 miljoonaa € ja sähköstä 63.3 miljoonaa €, eli yhteistuottoja 126.4 miljoonaa €.

Taulukkoon 3 on laskettu NuScale CHP-voimalan kustannusjako. HOB-voimalan tapaan kustannusjakoon on käytetty kappaleessa 4.2 esitettyä tapaa.

**Taulukko 3 NuScale CHP-voimalan kustannusjako**

Voimalaitoksen osa	M€
Voimalaitosmoduuli (Moduulin hinta, sekä kuljetuksen ja kokoonpanon hinta)	79
Tekniikkatuki	11
Kohteen infrastruktuuri	5
Reaktorirakennus (Rakennus, jätevarastointi ja pääkomponenttien vaihto)	339
Turbiinirakennus (rakennus ja kaksi turbiinia)	53
Voimalaitoksen muut rakennustarpeet (lisärakennukset, jäähdytystornit jne.)	17
Jaettavat kulut (Tilapäiset rakennukset, henkilöstö, rakennustarvikkeet jne.)	41
Muut kulut	42
<b>Kokonaiskustannus</b>	<b>586</b>

Kustannusjaon perusteella saadaan CHP-voimalan kiinteiksi kustannuksiksi 18.64 miljoonaa euroa vuodessa, kun lainavähennyksiin lisätään 4 miljoonaa muita kiinteitä kustannuksia. Muuttuvat kustannukset pysyvät samana kuin HOB-voimalan tapauksessa eli 4.7 €/MWh.

Yksinkertaistettu takaisinmaksuaika on CHP-voimalan tapauksessa 5.67 vuotta. Kuten HOB-voimalan tapauksessa, on CHP-voimalan takaisinmaksuaika lyhyt verrattaessa ydinvoimalan käyttöikään. Investointi on siis CHP-voimalan tapauksessa kannattava.

## 5.2 Mallinnuksen virhearvio

Tehty laskenta on hyvin yksinkertaistettu ja suuntaa antava. Tarkkaa nykyhintaa NuScalen SMR:lle ei ole tiedossa ja oletetut kustannushinnat laskennassa ovat hyvin pitkälti omaavalintaisia ja spekulatiivisia. Laskennassa käytetty yksinkertaistetun takaisinmaksuajan menetelmä ei ole parhain tapa arvioida investoinnin kannattavuutta. Takaisinmaksuajan menetelmä ei ota huomioon investoinnin jäännösarvoa tai rahan aika-arvoa, jotka otetaan huomioon esimerkiksi Nykyarvomenetelmässä. Myös tuotanto-olettamat ovat hyvin yksinkertaistettuja. Laskennassa on tehty oletus, että voimalaitokset ajavat itsensä aina maksimitehoon asti, kunnes vasta tärkeysjärjestyksessä seuraava voimalaitos liittyy tuotantoon mukaan. Todellisuudessa tuotannossa olisi limitystä, jotta välttyttäisiin mahdollisten tuotannon käynnistämisen ja sammuttamisen vikatilanteiden aiheuttamilta ongelmilta. Lisäksi vain harva voimalaitos pystyy toimimaan marginaalitehoilla. Suurin osa isomman kokoluokan polttolaitoksista vaatii vähintään 20–40 % tehon laitoksen maksimituotantokapasiteetista, jotta laitos edes voidaan liittää sähkö- tai kaukolämpöverkkoon.

Laskennassa ei otettu myöskään huomioon voimalaitoksien huoltotaukoja. Kaikilla voimalaitoksilla on vähintään vuosittaiset huollot, joissa tarkastellaan esimerkiksi kattilan tai höyrystimien kuntoa ja tehdään tarvittavia huoltotoimenpiteitä. Esimerkiksi Tarastejärven voimalaitoksen huipunkäyttöaika on Tammervoiman arvion mukaan 7500–8000 tuntia vuodessa (Aluehallintovirasto, 2013).

Mallinnukseen ei otettu mukaan sähköhinnan vaihtelua. Tuulivoiman osuuden kasvaessa Suomen sähkömarkkinoilla lähes 1000 MW vuodessa (Suomen Tuulivoimayhdistys ry, 2022) tulee pakostakin sähköhintaan suurta vaihtelua. Esimerkiksi elokuussa 2022 Nord Poolin seuraavan päivän hinnat vaihtelivat välillä 7.55–501.45 €/MWh (Nord Pool AS, 2022). Erittäin tuulisina kausina voi CHP-voimalan sähköntuotto olla täten tappiollista, kun tuulivoiman osuus kasvaa. Tappioita voidaan kuitenkin kompensoida kaukolämmön tuotannon tuloilla.

## 6. YHTEENVETO

Tutkimuksen tuloksissa päädyttiin siihen, että GE-Hitachin BWRX-300 on liian tehokas Tampereen kaupungin alueelle. Puhtaaseen kaukolämpöön, tai edes CHP-voimaan, kyseistä reaktorikonseptia ei ole kannattavaa rakentaa vähäisten käyttötuntien takia. BWRX-300 voisi olla kannattava kaukolämmön kannalta, jos sitä käytettäisiin kaukolämmönlähteenä samanlailla kuin Sveitsin Beznau ydinvoimalaa. Kyseinen voimala on rakennettu sähköntuotantoa varten ja kaukolämpöä tuotetaan korkeapaineturbiinin ja välitulistimen välioton ja lämmönvaihtimien avulla ('Beznau nuclear power plant', 2022). Kyseisellä konfiguraatiolla BWRX-300 voisi toimia 40 MW jatkuvalla lämpöteholla Tampereen alueella kattamaan peruslämmönkulutuksen ja samalla tuottamaan yli 200MW sähköteholla päästötöntä sähköä Suomen sähköverkkoon. Näin voitaisiin kattaa Tampereella tarvittava minimi lämmöntarve ja käyttää samalla Tarastenjärven jätteenpolttolaitosta varmistamaan yhdyskunnan jätehuoltovarmuutta.

Lainsäädäntö estää tällä hetkellä ydinvoimaloiden tehokkaan käytön kaukolämmön tuotannossa. Erilaiset suojavyöhykkeet aiheuttavat sen, että ydinvoimala jouduttaisiin sijoittamaan kauas kaukolämmön tarpeesta, jolloin mm. verkostohäviöt syövät kaukolämmön tehokkuutta. Työ- ja elinkeinoministeriö on käynnistänyt ydinenergiain kokonaisuudistukseen tähtäävän säädösvalmistelun. Uudistuksen tavoitteena on, että tuotanto ja muu ydinenergian käyttö on jatkossakin yhteiskunnan kokonaisedun mukaista, turvallista sekä taloudellisesti kannattavaa. Lakiuudistus on lupaava, sillä se saattaa mahdollistaa SMR:ien sijoittamisen kaupunkialueille tai kaupunkien välittömään läheisyyteen. Näin vältetään suurilta lämpöhäviöiltä, koska lämmitettyä vettä ei tarvitse kuljettaa pitkiä matkoja muualle kaukolämpöverkkoon. Mikäli lakiuudistus on suotuista, SMR voitaisiin asentaa Tampereen alueella esimerkiksi Naistenlahden voimalaitosalueelle, joka on Tampereen kaukolämpöverkon keskeisin piste.

Laskennan tulokseksi saatiin, että SMR voi olla kannattava Tampereen alueella HOB- ja CHP-käytössä, kunhan SMR on tarpeeksi pieni lämpöteholtaan. NuScale SMR:n yksinkertaistetut takaisinmaksuajat HOB ja CHP tapauksissa ovat lyhyet 7.07 ja 5.67 vuotta vastaavasti. Laskennassa on kuitenkin huomattava määrä oletuksia ja epävarmuutta. SMR:ien kustannuksista massatuotantovaiheessa ei ole vielä minkäänlaista varmuutta, ydinpolttoaineen hinta on täysin oletettu ja lainat on oletettu korottomaksi. Edellä mainittujen syiden vuoksi tulokset ovat vain suuntaa antavia.

# LÄHTEET

Ahonen, E., Heinonen, J., Lahtinen, N., Tuomainen, M. & Lång, O. (2020) *Preconditions for the safe use of small modular reactors : outlook for the licensing system.*

Aluehallintovirasto (2013) *Ympäristölupapäätös 23/2013/1.*

bp *Statistical Review of World Energy.* Saatavissa (viitattu 15.10.2021):  
<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>

*Brochure Beznau nuclear power plant.* Saatavissa (viitattu 5.2.2022): [https://www.axpo.com/content/dam/axpo19/master/files-master/dossiers/beznau-power-plant/1910\\_Broschuere\\_Kernkraftwerk\\_Beznau\\_Englisch.pdf](https://www.axpo.com/content/dam/axpo19/master/files-master/dossiers/beznau-power-plant/1910_Broschuere_Kernkraftwerk_Beznau_Englisch.pdf)

Blandford, E., Brumback, K., Fick, L., Gerardi, C., Haugh, B., Hillstrom, E., Johnson, K., Peterson, P.F., Rubio, F., Sarikurt, F.S., Sen, S., Zhao, H. & Zweibaum, N. (2020) 'Kairos power thermal hydraulics research and development', *Nuclear Engineering and Design*, 364p. 110636.

Energiateollisuus ry (2021) *Energiavuosi 2020 - Kaukolämpö.*

Energiateollisuus ry (2022) *Kaukolämmön hinta.* Saatavissa (viitattu 9.3.2022): [https://energia.fi/tilastot/kaukolampotilastot/kaukolammon\\_hinta](https://energia.fi/tilastot/kaukolampotilastot/kaukolammon_hinta).

Energiateollisuus ry (2020) *Kaukolämpötilasto.*

Fingrid Oyj (2021) *Kausi 7/2020 – 6/2022.* Saatavissa (viitattu 25.8.2022): <https://www.fingrid.fi/sivut/yhtio/finextra-oy/taloudelliset-tiedot/tehoreservi/kausi-72020--62022/>.

GE Hitachi (2020) *GE Hitachi Nuclear Energy Begins NRC Licensing Process for BWRX-300 Small Modular Reactor | GE News.* Saatavissa (viitattu 21.11.2021):  
<https://www.ge.com/news/press-releases/ge-hitachi-nuclear-energy-begins-nrc-licensing-process-bwrx-300-small-modular>.

GE Hitachi (2021) *Nuclear power plants overview - BWRX-300,* verkkosivu. Saatavissa (viitattu 30.9.2021): <https://nuclear.gepower.com/build-a-plant/products/nuclear-power-plants-overview/bwrx-300>.

Handl, K.H. (1998) *75 MW heat extraction from Beznau nuclear power plant (Switzerland).*

IAEA (2019) *ARIS - Technical Data. BWRX-300.*

IAEA (2020) *ARIS - Technical Data. NuScale SMR.*

IAEA (2011) *Status report 96 - High Temperature Gas Cooled Reactor - Pebble-Bed Module (HTR-PM).*

Ilmatieteen laitos (2022a) *Havaintojen lataus,* verkkosivu. Saatavissa (viitattu 1.2.2022):  
<https://www.ilmatieteenlaitos.fi>.

Ilmatieteen laitos (2022b) *Lämmitystarveluvut,* verkkosivu. Saatavissa (viitattu 5.2.2022):  
<https://www.ilmatieteenlaitos.fi>.

- Kairos Power (2021a) 'Hermes Construction Permit Application Accepted for Review by Nuclear Regulatory Commission'. Saatavissa: [https://kairopower.com/external\\_updates/hermes-construction-permit-application-accepted-for-review-by-nuclear-regulatory-commission/](https://kairopower.com/external_updates/hermes-construction-permit-application-accepted-for-review-by-nuclear-regulatory-commission/)
- Kairos Power (2021b) 'Tennessee', verkkosivu. Saatavissa (viitattu 4.1.2022): <https://kairopower.com/tennessee/>
- Laaksonen, J. (2010) 'Lessons Learned from Olkiluoto 3 Plant', *Power Engineering*. Saatavissa (viitattu 18.11.2021): <https://www.power-eng.com/news/lessons-learned-from-olkiluoto-3-plant/#gref>
- Li Nan (2018) 'Clean Heating', *Beijing Review*, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 18.11.2021): [http://www.bjreview.com/Nation/201712/t20171229\\_800113368.html](http://www.bjreview.com/Nation/201712/t20171229_800113368.html)
- Liukko, A., Slant, O. & Välimäki, M. (2020) *Ydinlaitosten elinkaaren sääntelyn kehittäminen : Lopputraportti*.
- Martikainen, R. (2013) *Kaukolämpöverkon verkostohyötysuhteen parantaminen*, diplomityö, Tampereen Teknillinen Yliopisto. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tyy-201310211356>
- Nord Pool AS (2022) *See hourly day-ahead prices*, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 26.8.2022): <https://www.nordpoolgroup.com/en/Market-data/1/Dayahead/Area-Prices/ALL1/Hourly/>.
- NuScale Power (2021a) *Carbon Free Power Project*, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 21.10.2021): <https://www.nuscalepower.com/projects/carbon-free-power-project>.
- NuScale Power (2020) *NuScale Power Announces an Additional 25 Percent Increase in NuScale Power Module™ Output; Additional Power Plant Solutions*. Saatavissa (viitattu 27.10.2021): <https://newsroom.nuscalepower.com/press-releases/news-details/2020/NuScale-Power-Announces-an-Additional-25-Percent-Increase-in-NuScale-Power-Module-Output-Additional-Power-Plant-Solutions/default.aspx>.
- NuScale Power (2021b) *Technology | NuScale Power*, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 30.9.2021): <https://www.nuscalepower.com/technology>.
- Refuna AG (2021) *Fernwärme für Klingnau, Leuggern, Riniken, Rüfenach, Brugg, Umiken, Untersiggenthal, Villigen/Stilli, Böttstein/Kleindöttingen, Döttingen, Endingen und Würenlingen - REFUNA AG*.
- Reitsma, F., Subki, M.H., Luque-Gutierrez, J.C. & Bouchet, S. (2020) *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*. IAEA.
- Ritchie, H. & Roser, M. (2020) 'CO<sub>2</sub> and Greenhouse Gas Emissions', *Our World in Data*,
- Singh, V., Lish, M.R., Chvála, O. & Upadhyaya, B.R. (2017) 'Dynamics and control of molten-salt breeder reactor', *Nuclear Engineering and Technology*, 49(5), pp. 887–895.
- STUK (2019) *Ohje YVL A.2 - Ydinlaitoksen sijaintipaikka*.
- STUK (2018) *STUK Y/2/2018 - Säteilyturvakeskuksen määräys ydinvoimalaitoksen valmiusjärjestelystä*.
- Suomen Tuulivoimayhdistys ry (2022) *Tuulivoima Suomessa 30.6.2022*. Saatavissa: [https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoima\\_vuositilastot\\_1\\_6\\_2022.pdf](https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoima_vuositilastot_1_6_2022.pdf)

- Tammervoima Oy, *Voimalaitos*, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 9.3.2022): <https://tammervoima.fi/voimalaitos/>.
- Tampereen Sähkölaitos Oy (2020) *Energiantuotanto*, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 9.4.2022): <https://www.sahkolaitos.fi/footer-sivut/meista/toimintamme/energiantuotanto/>.
- Tampereen Sähkölaitos Oy (2017) *Kaukolämpökartta 6/2017*.
- Tulkki, V., Pursiheimo, E. & Lindroos, T.J. (2017) *District heat with Small Modular Reactors (SMR)*. p.p. 26.
- TVO (2010) *Ydinvoimalaitosyksikkö OL3*. Saatavissa: [https://www.tvo.fi/uploads/julkaisut/tiedostot/ydinvoimalaitosyksikko\\_ol3\\_fin.pdf](https://www.tvo.fi/uploads/julkaisut/tiedostot/ydinvoimalaitosyksikko_ol3_fin.pdf)
- U.S.NRC (2021a) *Application Review Schedule for the NuScale Design*, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 21.10.2021): <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/smr/nuscale/review-schedule.html>.
- U.S.NRC (2021b) *GEH BWRX-300*, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 21.10.2021): <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/smr/bwrx-300.html>.
- Värri, K. (2018) *Market Potential of Small Modular Nuclear Reactors in District Heating*, diplomityö, Aalto-yliopisto. Saatavissa: [https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/33750/master\\_V%C3%A4rri\\_Konsta\\_2018.pdf?isAllowed=y&sequence=1](https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/33750/master_V%C3%A4rri_Konsta_2018.pdf?isAllowed=y&sequence=1)
- Värri, K. & Syri, S. (2019) 'The Possible Role of Modular Nuclear Reactors in District Heating: Case Helsinki Region', *Energies*, 12(11).
- World Nuclear Association (2021) *Nuclear Power Economics | Nuclear Energy Costs - World Nuclear Association*, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.4.2022): <https://www.world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/economics-of-nuclear-power.aspx>.
- World Nuclear News (2021) *Demonstration HTR-PM connected to grid*. Saatavissa (viitattu 2.2.2021): <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Demonstration-HTR-PM-connected-to-grid>.
- Zhang, Z., Wu, Z., Wang, D., Xu, Y., Sun, Y., Li, F. & Dong, Y. (2009) 'Current status and technical description of Chinese 2 × 250 MW th HTR-PM demonstration plant', *Nuclear Engineering and Design - NUCL ENG DES*, 239pp. 1212–1219.
- Zhang, Zuoyi, Dong, Y., Li, F., Zhang, Zhengming, Wang, Haitao, Huang, X., Li, H., Liu, B., Wu, X., Wang, Hong, Diao, X., Zhang, H. & Wang, J. (2016) 'The Shandong Shidao Bay 200 MWe High-Temperature Gas-Cooled Reactor Pebble-Bed Module (HTR-PM) Demonstration Power Plant: An Engineering and Technological Innovation', *Engineering*, 2(1), pp. 112–118.