



Lukas Berg

# Pienydinvoima kaukolämmön tuotannossa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

Insinöörityö

7.5.2023

# Tiivistelmä

Tekijä: Lukas Berg  
Otsikko: Pienydinvoima kaukolämmön tuotannossa  
Sivumäärä: 39 sivua  
Aika: 7.5.2023

Tutkinto: Insinööri (AMK)  
Tutkinto-ohjelma: Energia- ja ympäristötekniikka  
Ammatillinen pääaine: Energiantuotantomenetelmät  
Ohjaajat: Projektipäällikkö Eetu Rutanen  
Lehtori Tomi Hämäläinen

---

Tämän opinnäytetyö tehtiin toimeksiantona Vihreän siirtymän tuotekehitys (Jatkuvan oppimisen ja työllisyyden palvelukeskus – Valtionavustus vihreän siirtymän tukemiseksi kone-, metalli-, kuljetus- ja logistiikka-aloilla) -hankkeelle, ja sen tarkoituksena oli tutkia pienydinvoiman nykytilannetta ja potentiaalia kaukolämmön tuotannossa. Työn tavoitteena oli muodostaa arvio, milloin ja millaisilla alueilla pienydinvoimaloita voisi valjastaa kaukolämmön tuotantoon Suomessa.

Työ tehtiin kirjallisuuskatsauksena, ja sen aineistossa käytettiin sekä kotimaisia että ulkomaisia tutkimuksia ja selvityksiä liittyen pienydinvoimaan ja energiantuotantoon, energia-alan toimijoiden materiaalipankkeja sekä Suomen ydinenergialainsäädäntöä.

Työssä tarkasteltiin pienydinvoiman ja kaukolämmön perusteiden ohella ydinvoimatekniikan perusteita sekä lainsäädäntöä, kolmea olemassa olevaa pienreaktoria sekä kolmea kehitteillä olevaa konseptia. Työssä tutustuttiin myös suomalaisten tahojen toimintaan pienydinvoiman parissa sekä pohdittiin pienreaktorien mahdollisia sijainteja.

Pienydinvoima on erittäin potentiaalinen polttoon perustumaton vaihtoehto lämmön tuotannolle, mutta sen ympärillä on yhä paljon epävarmuuksia. Pienydinvoimaloiden sijainnit, omistussuhteet sekä turvallisuus askarruttavat. Kirjoittajan arvio on, että ensimmäiset kaupalliset kaukolämpöön tarkoitetut pienreaktorit nähdään Suomessa aikaisintaan vuonna 2035.

Avainsanat: SMR, pienydinvoima, pienreaktori, ydinvoima, kaukolämpö

## Abstract

Author: Lukas Berg  
Title: Small Modular Reactors in District Heating Production  
Number of Pages: 39 pages  
Date: 7 May 2023

Degree: Bachelor of Engineering  
Degree Programme: Energy and Environmental Engineering  
Professional Major: Energy Production Methods  
Supervisors: Eetu Rutanen, Project Manager  
Tomi Hämäläinen, Senior Lecturer

---

This thesis was commissioned by Vihreän siirtymän tuotekehitys (Jatkuvan oppimisen ja työllisyyden palvelukeskus – Valtionavustus vihreän siirtymän tukemiseksi kone-, metalli-, kuljetus- ja logistiikka-aloilla) -project. The objective of the thesis was to examine the current level of development and potential of small modular reactors (SMR) in district heating production. The goal was to assess when and in which areas SMR power plants could be used for district heating production in Finland.

The study was conducted as a literature review, using both domestic and foreign research and reports on small modular reactors and energy production, material banks of energy industry actors, and Finnish nuclear energy legislation.

In addition to examining the basics of small modular reactors and district heating, the study covers the basics of nuclear power technology and legislation, three existing SMR power plants, and three concepts under development. The study also explores the activities of Finnish entities involved in small modular nuclear power and considers possible locations for SMR power plants.

SMR power plants are a highly potential non-combustion-based alternative for heat production, but there are still many uncertainties surrounding them. The locations, ownership, and safety of SMR power plants are a concern. The author's assessment is that the first commercial SMR power plant intended for district heating in Finland will not be seen before the year 2035.

Keywords: SMR, small modular reactor, nuclear power, district heating

# Sisällys

1	Johdanto	1
2	Kaukolämpö Suomessa ja maailmalla	2
2.1	Kaukolämmön perusteet	3
2.2	Kaukolämmön merkitys	5
2.3	Kaukolämmön tuotantomenetelmät	6
2.4	Lämmöntuotannon päästöt	8
2.5	Kaukolämmitys maailmalla	9
3	Ydinvoima Suomessa	10
3.1	Ydinvoimalaitosten lupaprosessi	13
3.2	Ydinvoimalaitosten turvasäädökset	13
3.3	Ydinvoimalaitoksen käytöstäpoisto	14
4	Pienydinvoima	14
4.1	Määrittely ja käyttötarkoitukset	15
4.2	Erilaisia malleja ja konsepteja	16
5	Suomalaiset toimijat ja pienydinvoima	22
5.1	Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy	24
5.2	Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto	26
6	Tuotantotapojen vertailu	28
6.1	Ympäristövaikutukset	28
6.2	Turvallisuus	30
7	Reaktorien sijoittaminen	31
8	Yhteenveto	32
	Lähteet	35

## 1 Johdanto

Valtaosa suomalaisista asuu kaukolämmitteisissä kodeissa, ja vajaa puolet koko Suomen asuin- ja palvelurakennuksista lämpiää kaukolämmöllä [1, s. 6; 2, s. 20]. Kaukolämpöä tuotetaan pääosin polttoon perustuvien menetelmin. Puu- ja biomassaperäisiä polttoaineita käytetään jo perinteisiä fossiilisia polttoaineita enemmän, mutta kivihiilellä ja maakaasulla tuotetaan yhä merkittävä osa kaukolämmöstä. [1, s. 1, 4.] Kivihiilen energiakäytön kieltävä laki Suomessa astuu voimaan 1.5.2029. Kivihiili- ja maakaasukäyttöisten voimalaitosten polttoainetarpeiden korvaaminen puu- ja biomassaperäisillä polttoaineilla on herättänyt kysymyksiä esimerkiksi uusiutuvien polttoaineiden riittävydestä ja kestävydestä. Suurin osa Suomessa tuotetusta sähköstä tuotetaan polttoon perustumattomin menetelmin, ja kivihiilen jättämän aukon myötä polttoon perustumatonta lämmöntuotantoa herättää mielenkiintoa. Yksi polttoon perustumatonta menetelmä lämmöntuotantoon on pienydinvoima.

Tämä insinööri työ tehtiin toimeksiantona Vihreän siirtymän tuotekehitys (Jatkuvan oppimisen ja työllisyyden palvelukeskus – Valtionavustus vihreän siirtymän tukemiseksi kone-, metalli-, kuljetus- ja logistiikka-aloilla) -hankkeelle. Insinööri työn tavoitteena oli tutkia pienydinvoiman nykytilannetta ja potentiaalia kaukolämmön tuotannossa sekä muodostaa arvio, milloin ja millaisilla alueilla pienydinvoimaloita voisi valjastaa kaukolämmön tuotantoon Suomessa. Työ tehtiin kirjallisuuskatsauksena, ja sen aineistona käytettiin sekä suomalaisten että ulkomaisten tahojen tekemiä tutkimuksia ja selvityksiä liittyen pienydinvoimaan ja energiantuotantoon, energia-alan toimijoiden materiaalipankkeja, artikkeleita ja julkaisuja sekä Suomen ydinenergialainsäädäntöä.

Insinööri työssä tarkastellaan ensin kaukolämmön merkitystä, tuotantomenetelmiä ja päästöjä, minkä jälkeen käsitellään ydinvoimatekniikan ja -turvallisuuden perusteita. Työssä kuvaillaan pienydinvoiman määrittelyä, tutustutaan kolmeen olemassa olevaan ja useampaan kehitteillä olevaan pienydinvoimalaitokseen sekä syvennyttään suomalaisten toimijoiden ponnisteluihin pienydinvoiman

saralla. Lopuksi vertaillaan pienydinvoimaa muihin lämmöntuotannon menetelmiin ja pohditaan pienreaktorien mahdollisia sijainteja.

## **2 Kaukolämpö Suomessa ja maailmalla**

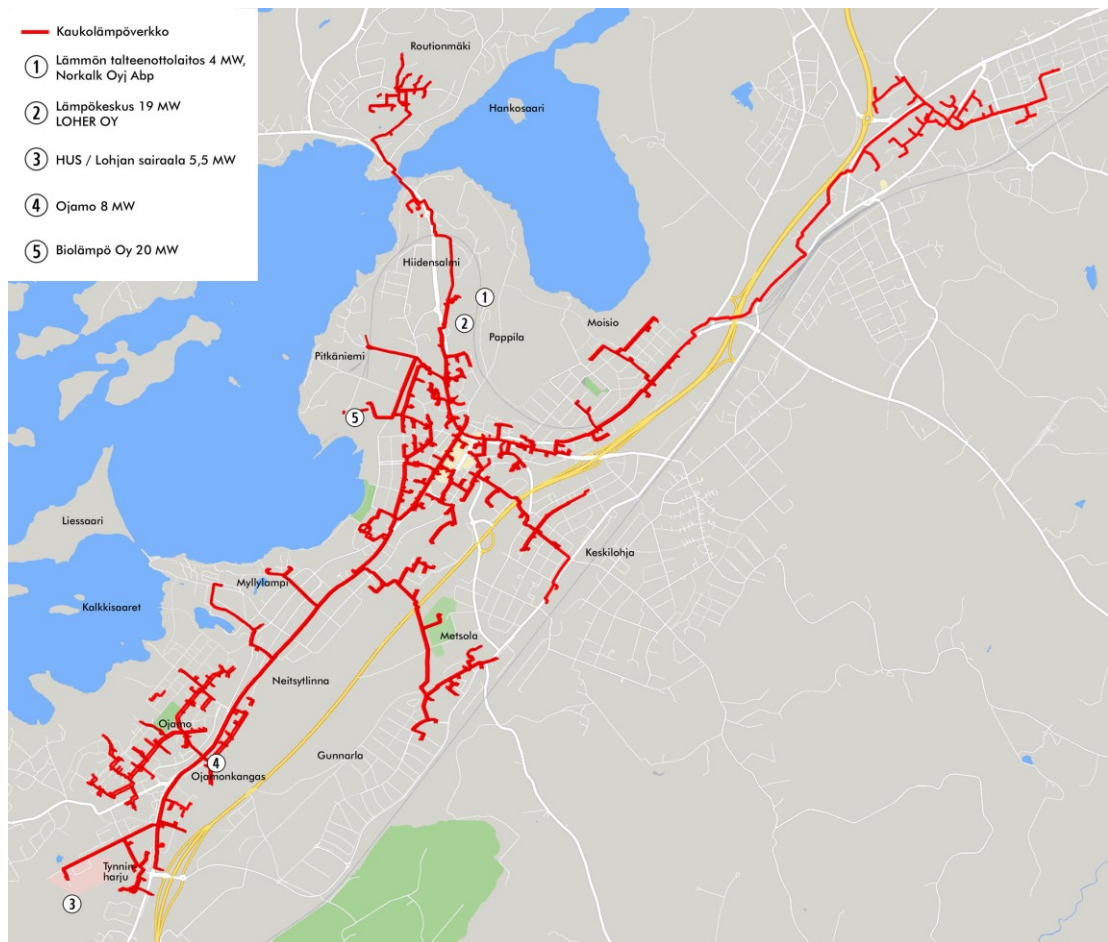
Kaukolämmitys on yleisesti käytössä oleva lämmitysmuoto, jossa voima- tai lämpölaitoksella lämmitetty vesi kiertää kaukolämpöverkossa tuotantolaitokselta loppukäyttäjälle. Kaukolämpötuottajien asiakkaita ovat niin yksityisasiakkaat, asuin- ja liikerakennukset kuin teollisuus. Loppukäyttäjän lämmönjakohuoneessa sijaitsee lämmönvaihdin, jossa kaukolämpöverkon lämmitetty vesi lämmittää asiakkaan patteri- ja lattialämmitysverkon vettä. Kierrettyään asiakkaiden lämmönvaihtimet läpi kaukolämpövesi pumpataan takaisin laitokselle uudelleen lämmitettäväksi. [3.]

Suomen ensimmäinen paikalliseen lämmityskeskukseen perustuva kaukolämpöjärjestelmä rakennettiin vuonna 1939 Helsingin Olympiakylään. Helsingin keskusta-alueen rakennuksilla saattoi olla rakennuksessa oma lämpökeskus, ja lämmityskeskukseen perustuvat alueelliset kaukolämpöjärjestelmät alkoivat yleistymään 1950-luvulla. Tämä johti kuitenkin Helsingin ilmanlaadun heikentymiseen savun, katupölyn ja hajujen takia. Vuonna 1953 tehtiin periaatepäätös Helsingin keskusta-alueen kaukolämmityksestä, ja ensimmäisenä kaupungin lämmivesijohdon Salmisaaren voimalaitokselta sai vuonna 1957 Hotelli- ja Ravintolakoulu Perho. [4.] Kaukolämpöverkon kokonaispituus oli vuoden 2021 lopussa noin 16 100 kilometriä, ja verkko on rakennettu kattamaan suurimmat asutuskeskukset sekä monia pienempiä paikkakuntia. Kaukolämpöverkko ei ole yhtenäinen koko Suomen kattava verkosto, vaan verkot ovat paikkakunta- ja tuotantolaitossidonnaisia. [1, s. 1–3.] Esimerkiksi Porvoon Energia myi vuonna 2021 kahdella biolämpölaitoksellaan, sekä kahdella maakaasukäyttöisellä huippu- ja varalaitoksellaan tuotettua lämpöä Porvoon alueen 2 050 asiakkaalleen 160 kilometrin pituisen kaukolämpöverkon varrelle 292 gigawattituntia [5].

## 2.1 Kaukolämmön perusteet

Kaukolämpö on voimalaitoksella, lämpökeskuksella tai muualla, esimerkiksi lämpöpumppulaitoksella lämmitettyä vettä. Vesi tuodaan asiakkaan lämmönjakohuoneeseen, jossa lämpöä siirretään lämmönvaihtimen avulla rakennuksen lämmitysverkon veteen, sekä tehdään kuumaa käyttövettä. Voima- ja lämpölaitokset tuottavat kaukolämpöä polttoon perustuvien menetelmin. Ennen verkkoon laskemista kaukolämpövesi käsitellään hapen ja epäpuhtauksien poistamiseksi verkoston kestävyden ja korroosioriskin minimoimiseksi. Kaukolämpövesi on yleensä värjätty vihreäksi eläimille ja ympäristölle vaarattomalla väriaineella, jotta vuototilanteissa rikkoutuneen kaukolämpöputken tunnistaminen olisi helpompaa. Menoveden, eli laitoksella lämmitetyn veden, lämpötila vaihtelee noin 65 °C ja 115 °C:n välillä, ja laitokselle palaavan veden, paluueden, lämpötila vaihtelee noin 40 °C ja 60 °C:n välillä. [6.]

Kaukolämpöverkko on umpinainen lämmitys- ja pumppauspisteiden yhdistämä putkien verkosto. Verkosto kulkee maan alla, tyypillisesti 0,5–1 metrin syvyydessä kaupunkien keskustoissa ja taajamissa. Yleensä putket sijoitetaan auto- ja kevyen liikenteen väylien alle, joista verkosto tavoittaa helposti olemassa olevat ja tulevat asiakkaat runkolinjojen haaroituksista. [6.] Kuvassa 1 on Lohjan Energiahuollon kaukolämpöverkko Lohjalla [7].



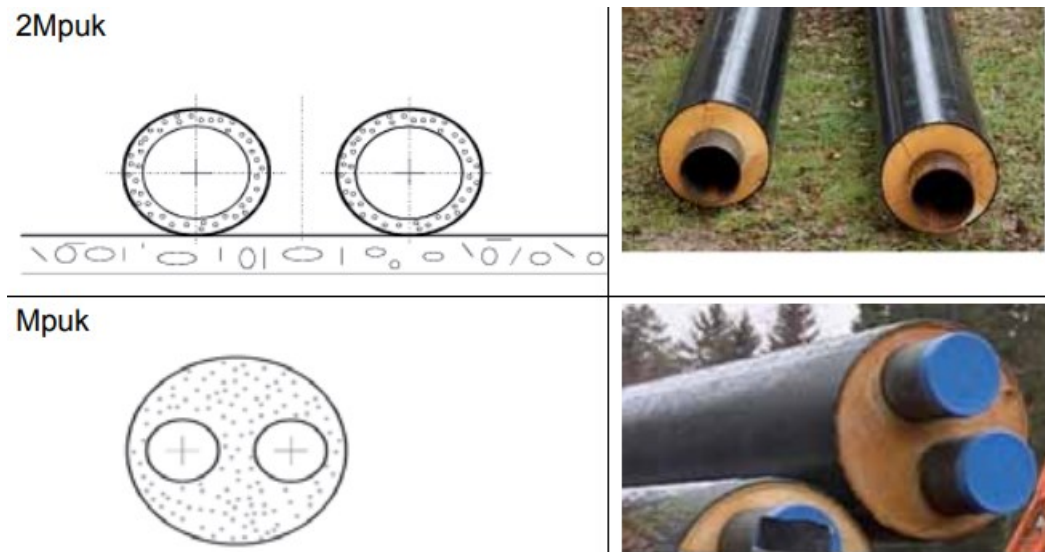
Kuva 1. Lohjan Energiahuolto Oy:n kaukolämpöverkko. Kaupungin läpi kulkeva putkisto on merkitty punaisella ja lämpökeskukset numeroituna. [7.]

Kunnallista kaukolämpöä on ollut olemassa Suomessa jo 1950-luvulta lähtien, ja ensimmäiset putket ja eristeet eroavat nykypäivän putkista huomattavasti. Kaukolämpöverkostoon tehdään vuosittain saneerauksia noin 50–70 kilometrin edestä, ja uutta putkea yhdistetään verkkoon vuodessa noin 250–500 kilometriä. [6.]

Modernit kaukolämpöputket ovat tyypillisesti uretaanivaahdolla ja muovikuorella eristetyt teräksiset meno- ja paluuputket joko saman tai erillisten kuorien sisällä. Putkien koko vaihtelee runkolinjojen metrin halkaisijoista yksittäisten talohaarojen kahteen senttimetriin. [5.] Kuvassa 2 on modernien kaukolämpöverkkojen käytetyimmät putkimallit: erilliset meno- ja paluuputket eli 2Mpuk ja yhdessä



suojakuoressa kulkeva Mpuk. Näiden putkien eliniän on laskettu olevan jopa 100 vuotta. [3, s. 50, 57.]



Kuva 2. Kaukolämpöputket 2Mpuk ja Mpuk. Lämpöhäviöiden minimoimiseksi teräsputket ovat eristetty uretaanivaahdolla ja kovalla muovikuorella. [3.]

Energialaitokset vastaavat kaukolämmön tuomisesta asiakkaan lämmönjakohuoneeseen asti. Käytännössä kaukolämpöputket haaroitetaan runkolinjasta asiakkaan pihalle, ja tuodaan rakenteiden läpi lämmönjakohuoneeseen. Meno-putken päähän asennetaan lianerotin, joka suodattaa mahdolliset epäpuhtaudet ja roskat vedestä ennen asiakkaan lämmönvaihtimeen kulkemista. Asiakas vastaa itse lämmönjakohuoneen laitteistoista. Lämmönjakohuoneen lämmönvaihtimissa tulovesi luovuttaa lämpöä rakennuksen vesiverkoston käyttö- ja lämmitysvesille. Asiakkaan hanoissa sekä patteri- ja lattialämmitysverkostoissa ei virtaa kaukolämpövesi, vaan vesi on saanut lämpönsä kaukolämpövedestä lämmönvaihtimessa. [8.]

## 2.2 Kaukolämmön merkitys

Vuonna 2021 Suomen kokonaisenergiankulutus oli 377,3 terawattituntia [9], josta kaukolämmön osuus oli 35,3 terawattituntia. Kaukolämmön osuus kokonaiskulutuksesta oli siis noin 9 %. Käytetystä 35 300 gigawattitunnista reilu

puolet oli asuintalojen käyttämää, vajaa kaksi viidennestä muiden, muun muassa toimisto- ja palvelutilojen käyttämää, ja noin kymmenesosa teollisuusyritysten käyttämää. Suomen väestöstä yli puolet asuu kaukolämpölämmitteisissä asunnoissa [1, s. 6], ja asuin- ja palvelurakennuksista 45 % lämpiää kaukolämmöllä [2, s. 20].

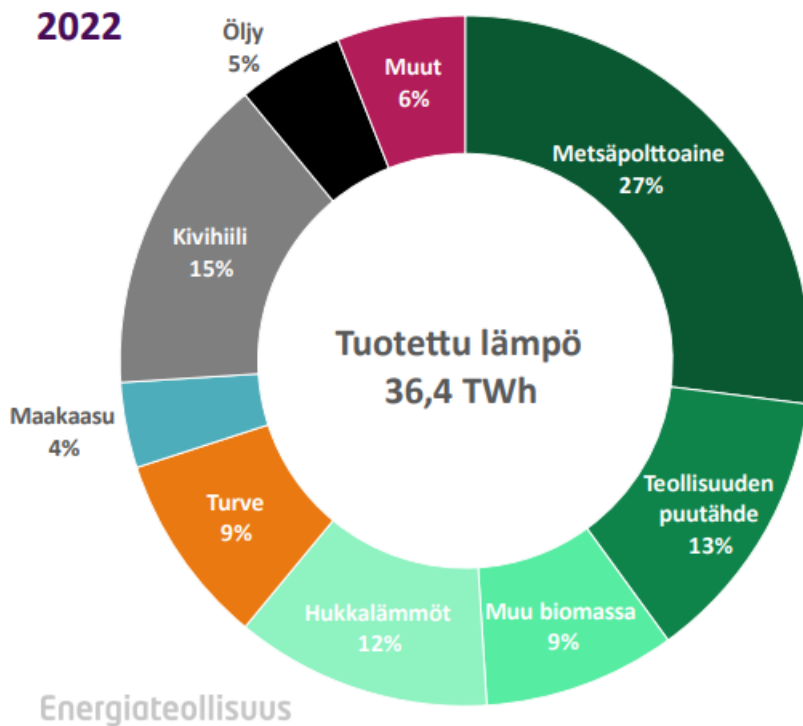
Vuonna 2021 Suomessa toimitettiin kaukolämpöä yhteensä 177 kunnassa 106 voimalaitoksella, 835 kiinteällä lämpökeskuksella ja 25 erillisellä lämmön talteenotto- tai pumppulaitoksella. Lisäksi yrityksillä oli yhteensä käytössä 275 siirrettävää lämpökeskusta. [1, s. 2–3] Suomen energiantuotannon kokonaistyöllisyys välittömästi ja välillisesti vuonna 2019 oli noin 18 000 henkilötyövuotta, josta lämmöntuotannon osuus oli noin 5 090 henkilötyövuotta [10].

### 2.3 Kaukolämmön tuotantomenetelmät

Kaukolämpöä tuotetaan pääosin polttoon perustuvien menetelmin lämmön ja sähkön yhteistuotantolaitoksissa sekä lämpökeskuksissa. Lämmön ja sähkön yhteistuotannossa käytetyimmät polttoaineet ovat metsä- ja biomassaperäiset polttoaineet sekä kivihiili, maakaasu ja turve. [11.] Kivihiilen energiakäytön kieltevä laki astuu voimaan 1.5.2029 [12, s. 193]. Lämpökeskuksissa käytetään öljyä, maakaasua tai pellettejä lämmöntuotannossa talven kylmimpinä päivinä ja voimalaitoksien mahdollisten huoltotöiden tai häiriötilanteiden aikana [13]. Kaukolämpöä on myös mahdollista tuottaa sähkökattiloilla, joita tyypillisesti ajetaan alhaisen sähkön hinnan aikaan [14].

Vuonna 2022 tuotetusta 36,4 terawattitunnista lämpöä yhteensä 49 % tuotettiin metsä- ja biomassaperäisillä polttoaineilla. Perinteisillä fossiilissa polttoaineilla ja turpeella tuotettiin yhteensä 33 %, ja hukkalämmöllä sekä muilla lähteillä yhteensä 18 %. Metsä- ja biomassaperäisten polttoaineiden osuus on kasvanut kymmenessä vuodessa merkittävästi lämmöntuotannossa: 24 prosenttiyksiköstä 49 prosenttiyksikköön. Hukkalämpövirtojen hyödyntäminen on nelinker- taistunut kymmenessä vuodessa: vuoden 2012 kolmesta prosenttiyksiköstä vuoden 2022 kahteentoista prosenttiyksikköön. [2.] Tällä hetkellä hukkalämpöä

hyödynnetään kaukolämmön tuotannossa noin 3 terawattituntia, mutta on arvioitu, että teknisesti hyödynnettävää hukkalämpöä olisi saatavilla vielä noin 35 terawattituntia [12, s. 58–59]. Kuvassa 3 esitettynä kaukolämmön tuotannon lähteet vuonna 2022.



Kuva 3. Kaukolämmön tuotannon lähteet vuonna 2022. Yksittäisistä polttoaineista kivihiilellä tuotetaan toiseksi eniten lämpöä metsäpolttoaineiden jälkeen. [2.]

Lämmön ja sähkön yhteistuotannolla (CHP eli combined heat and power) tuotettiin 75 % kaikesta kaukolämmöstä vuonna 2013 [3, s. 12]. Lämmön ja sähkön yhteistuotannossa tuotetaan nimensä mukaisesti yhdellä laitoksella yhdessä prosessissa sekä sähköä että lämpöä. Lämmön ja sähkön yhteistuotanto voi perustua esimerkiksi höyryprosessiin, jossa kuljettuaan höyryturbiinin läpi höyry ohjataan lämmönsiirtimiin kaukolämmön tuotantoa varten, tai kaasuturbiiniprosessiin, jossa kaukolämpöä tehdään savukaasuista, tai moottorivoimalaitokseen, jossa moottorin jäähdytysvettä ja savukaasuja käytetään kaukolämmön

tuotantoon. [3, s. 24.] Yhdistämällä kaasuturbiiniprosessin tai moottorivoimalaitoksen höyrykattilavoimalaitokseen saadaan kombivoimalaitos.

Yhteistuotantolaitosta voidaan ajaa joko lämmöntuotanto tai sähköntuotanto edellä riippuen lämmön- ja sähköntarpeesta. Lämmön ja sähkön yhteistuotanto on taloudellisesti ja ekologisesti erittäin kannattavaa, sillä yhteistuotantolaitoksen hyötysuhde on 80–90 %, siinä missä perinteisen sähköä tuottavan lauhdevoimalaitoksen hyötysuhde on noin 35–40 %. [3, s. 145.]

Lämpökeskukset tuottavat kaukolämpöä polttamalla maakaasua, polttoöljyä, pellettejä, turvetta tai haketta. Lämpökeskukset voivat vastata pienen paikkakunnan koko kaukolämpöverkon kapasiteetista, mikäli verkko ei ole yhteistuotantolaitoksen ulottuvilla. Isoimmilla paikkakunnilla, missä pääosa kaukolämmöstä tulee yhteistuotantolaitoksilta, lämpökeskukset toimivat lämmön saatuuden varmistajina, huippulämpökeskuksina. Huippulämpökeskus voidaan käynnistää yhteistuotantolaitosten häiriötilanteiden ja huoltotöiden ajaksi, sekä lämmönkulutuksen huippujen aikana, kuten talven kylmimpinä päivinä. [3, s. 25.]

## 2.4 Lämmöntuotannon päästöt

Vuonna 2021 Suomen kasvihuonekaasupäästöjen kokonaismäärä mukaan lukien maankäyttö, maankäytön muutos ja metsätaloussektori (LULUCF-sektori) oli noin 49 miljoonaa tonnia CO<sub>2</sub> ekvivalenttia. Energiasektorin osuus kokonaispäästöistä oli noin 34 miljoonaa tonnia, eli noin 70 %. Pieni osa energiasektorin päästöistä on dityppioksidia ja metaania, ja ne on laskettu mukaan kokonaispäästöihin CO<sub>2</sub> ekvivalenttina. Energiasektori pitää sisällään monta kategoriaa, jotka ei liity suoranaisesti sähkön ja lämmön tuotantoon, kuten esimerkiksi liikenteen ja työkoneiden kasvihuonekaasupäästöt. [15.]

Vuonna 2021 sähkön ja kaukolämmön tuotannon hiilidioksidipäästöt olivat yhteensä noin 9,1 miljoonaa tonnia, mikä vastaa noin neljäsosaa koko energiasektorin päästöistä. Kaukolämmön tuotannon päästöt olivat noin 4,8 miljoonaa

tonnia, mikä on Suomen energiasektorin päästöistä noin 14 % ja kokonaispäästöistä noin 9,8 %. [16, s. 2; 17, s. 11.]

## 2.5 Kaukolämmitys maailmalla

Kaukolämmitys on yleinen lämmitystapa kylmissä ja viileissä maissa: Pohjoismaissa, Itä- ja Keski-Euroopassa, Kiinassa, Venäjällä sekä Pohjois-Amerikassa. Islannissa kaukolämpö perustuu geotermiseen energiaan, ja verkkoon, jossa kiertää vesihöyry. Myös esimerkiksi New Yorkissa on 1880-luvulla alkunsa saanut höyryyn perustuva kaukolämmitys (Con Edison), joka konseptina sittemmin levisi muuallekin Yhdysvaltoihin. Kesäisin Con Edison tarjoaa höyryyn perustuva jäähdytystä. [3, s. 140.]

Suomalainen lämmön- ja sähköntuotanto perustuu asiakkaan ja yhteiskunnan tarpeiden tyydyttämiseen, ja tuotantoa pyritään jatkuvasti optimoimaan. Etenkin Venäjällä ja Kiinassa sekä joissain entisissä Neuvostomaissa laitoksia ajetaan usein ylhäältä alas, jolloin tuottajat määräävät tuotannon tempon, johon kuluttajien tulee sopeutua. Tällaisella filosofialla tuottaminen johtaa huonoihin hyötysuhteisiin sekä kulutuksen ja kulujen kasvuun. [3, s. 141.]

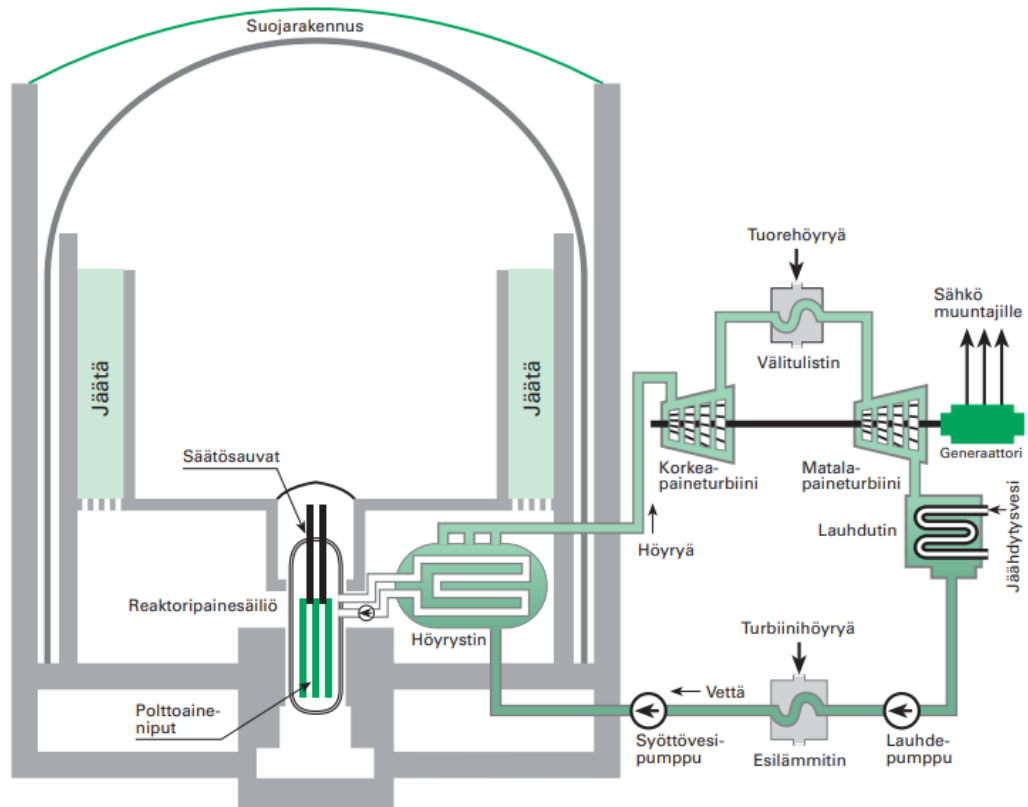
Venäjällä ja Kiinassa kaukolämpöverkolla saattaa olla vain yksi lämmöntuottaja, tyypillisesti lämpökeskus tai yhteistuotantolaitos, joka vastaa koko verkon lämmöstä. Tällöin verkon joustavuus ja lisäkapasiteetin rakentaminen on ongelmallista. [3, s. 143.]

Suomessa epätyypilliseen tapaan eri maissa voimalaitoksella lämmitettyä kaukolämpövettä saatetaan käyttää sellaisenaan suorassa kytkennässä patteri- ja lattialämmitysverkoston vetenä, sekä avoimessa järjestelmässä asukkaiden lämpimänä käyttövetenä. Suomessa käytetään poikkeuksetta lämmönsiirtimiä, jolloin lämmitys- ja käyttövesi on talousvettä. [3, s.148–150.]

### 3 Ydinvoima Suomessa

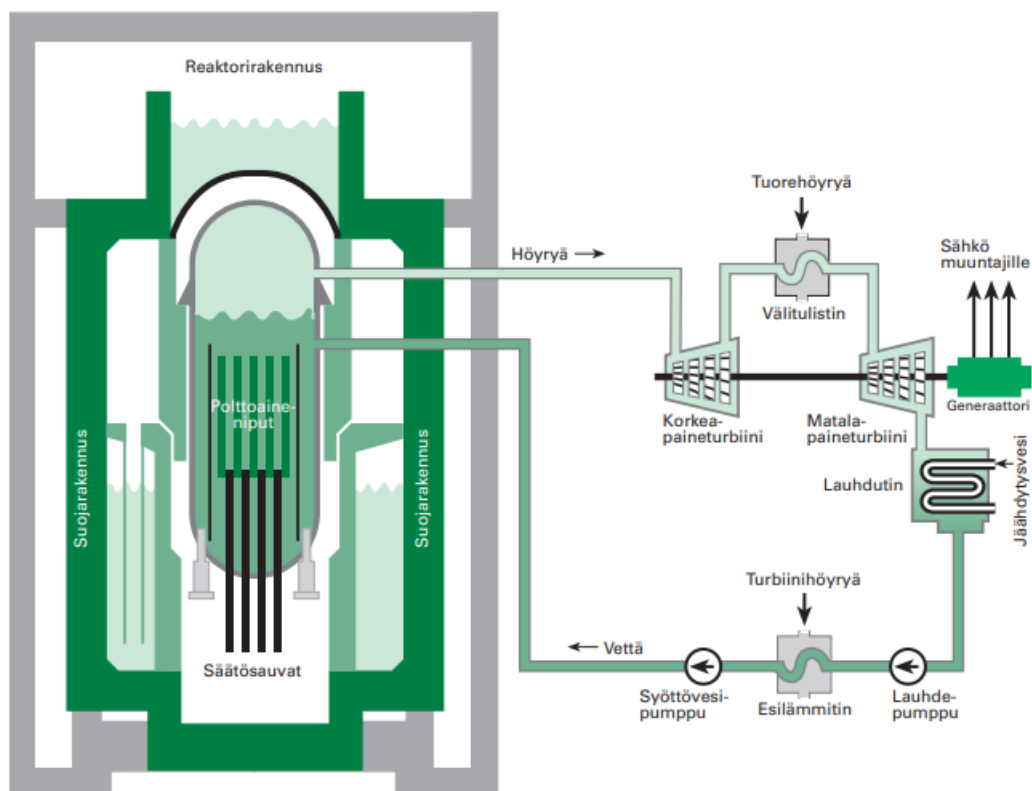
Maailman käytetyimmät reaktorityypit ovat kiehutus- ja painevesireaktorit. Molemmat näistä kuuluvat urania polttoaineenaan käyttävien kevytvesireaktoreiden kategoriaan. Reaktorien toiminta voisi teoriassa perustua myös plutoniumiin tai toriumiin. Ydinreaktorin sydämessä uraaniatomeita halkaistaan törmäyttämällä niihin neutroneita. Haljetessaan uraaniatomi vapauttaa energiaa sekä uusia neutroneita. Vapautuneet neutronit saavat aikaan ketjureaktion, jossa syntyy lämpöä, jolloin reaktorisydän kuumenee voimakkaasti. Fissioreaktiota ja reaktorisydämen lämpötilaa hallitaan säätelämällä sekä reaktoriin virtaavan veden määrää että siihen erikseen tarkoitetuilla säätösauvoilla. [18.]

Ydinvoimalaitoksen sähköntuotanto perustuu fissioreaktiolla kuumenevan reaktorisydämen jäähdytysvedestä tuotettuun höyryyn. Painevesireaktoreissa reaktorisydämen jäähdytysvesi ei pääse höyrystymään, vaan jäähdytysvesi johdetaan erilliseen höyrystimeen, jossa se luovuttaa lämpöä sekundääripiirin vedelle. Sekundääripiirin paine on huomattavasti primäärikierron painetta matalampi, jolloin sen vesi höyrystyy ja johdetaan turbiiniin. Suomen ydinvoimalaitoksista Loviisan laitoksissa 1 ja 2, sekä Olkiluodon laitoksessa 3 on painevesireaktori. Kuvassa 4 on Loviisan painevesireaktoreiden toimintaperiaate. [18.]



Kuva 4 Loviisan painevesireaktoreiden toimintaperiaate. Lauhduttimessa jäähdytysvetenä käytetään tyypillisesti merivettä. [18.]

Kiehumusvesireaktorissa osa reaktorisydämen jäähdytysvedestä höyrystyy jo reaktorissa, jolloin se voidaan johtaa reaktorista suoraan turbiiniin. Kuvassa 5 on Olkiluodon kiehumusvesireaktoreiden toimintaperiaate. [18.]



Kuva 5 Olkiluodon kiehumusvesireaktoreiden toimintaperiaate. Reaktoria ympäröi suoja- ja reaktorirakennus. [18.]

Fuusioreaktiossa taas kahden atomin yhdistyminen yhdeksi vapauttaa energiaa. Esimerkiksi auringossa vetyatomit fuusioituvat heliumatomeiksi. Fuusioreaktorin on ajateltu olevan perinteistä fissioreaktoria turvallisempi, sillä reaktorin vikatilanteessa fuusioreaktio yksinkertaisesti lakkaisi, kun fissioreaktorin vikatilanteessa reaktorisydän saattaa ylikuumeta. Fuusioreaktiosta ei synny ydinjätettä, vaan ainoastaan reaktiotuotetta, heliumia. Fuusioreaktoreita ei ole kaupallisessa käytössä, mutta niitä tutkitaan ja kehitetään jatkuvasti.

Suomessa on käytössä viisi ydinvoimalaitosta: Olkiluodon laitokset 1, 2 ja 3 sekä Loviisan laitokset 1 ja 2. Suomen ydinvoimalaitokset tuottavat sähköä, ja niiden yhteenlaskettu nettosähköteho on 4 394 megawattia. [19.] Suomen lainsäädäntö ei ota erikseen kantaa pienreaktoreihin, vaan kaikkea ydinvoimaa koskee samat lait ja säädökset. Toukokuussa 2008 säädettiin eduskunnan päätöksen mukaisesti laki ydinenergialain muuttamisesta, jonka myötä



ydinenergiaan liittyvät yksityiskohtaiset turvallisuusvaatimukset määrittelee Säteilyturvakeskus STUK. [20.]

### 3.1 Ydinvoimalaitosten lupaprosessi

Suomessa on kaikille ydinvoimalaitoksille yhtäläinen lupaprosessi, joka alkaa Työ- ja elinkeinoministeriön ja STUKin suorittamista ympäristövaikutusten arvioinnista ja turvallisuus selvityksestä. Prosessi etenee eduskunnan myöntämään periaatepäätökseen ja hallituksen myöntämiin rakennus-, käyttö- ja poistolupiin. Eduskunta käy keskustelua, kuulee asiantuntijoita, viranomaisia ja sijoituskuntaa ennen periaatepäätöksen vahvistamista. Hakemusprosessi on usein kallis ja voi olla merkittävä osa hankkeen budjetista. Prosessi pienreaktorin kaavoitukselle ja lupakäsittelylle on arvioitu kestävän nopeimmillaan kaksi vuotta, ja hitaimmillaan yli seitsemän vuotta. Mahdollisia toimenpiteitä prosessien nopeuttamiselle on esimerkiksi suojavao h ykkeen ja varautumisalueen arviointi laitospohjaisesti ottaen huomioon laitoksen tehon, käyttötarkoituksen ja turvallisuusjärjestelyt, sekä laitospaikkojen hyväksyminen ennalta. [21, s. 4–6.]

### 3.2 Ydinvoimalaitosten turvasäädökset

Ydinvoimalaitoksia tulee ympäröidä vähintään puolen kilometrin säteellä laitospaikka, viiden kilometrin säteellä suojavao h ykkeitä ja 20 kilometrin säteellä varautumisalue. Suojavao h ykkeitä on voimassa maankäyttö rajoituksia ja varautumisalueelle on määritelty erikseen viranomaisten laatima yksityiskohtainen pelastussuunnitelma onnettomuuksien varalta. Ydinvoimalaitoksen tulee lähtökohtaisesti sijaita harvaan asutulla alueella, eikä suojavao h ykkeitä tule olla kohteita, jossa käy säännöllisesti isoja ihmismääriä, kuten kouluja, kauppia tai sairaaloita tai muita kriittisiä kohteita, joiden toimintaan ydinvoimalaitoksen mahdollinen onnettomuus voi vaikuttaa. Uuden ydinvoimalaitoksen paikkaa valittaessa otetaan huomioon maankäyttö ja kaavoitus, ja laitos pyritään sijoittamaan alueelle, jonka väestön määrä pysyisi kohtalaisen muuttumattomana laitoksen käytön aikana. Erilaiset ulkoiset uhat tulee myös ottaa huomioon, kuten

luonnonkatastrofit, liikenne, mahdolliset putkilinjat, sekä teollisuus ja ihmisen aiheuttamat riskit. [22.]

### 3.3 Ydinvoimalaitoksen käytöstäpoisto

Ydinenergialain mukaan luvanhakijalla ja -haltijalla tulee olla suunnitelma ydinvoimalaitoksen käytöstäpoistolle. Suunnitelmaa tulee päivittää ja luvanhaltijan tulee esitellä mahdolliset päivitykset STUKille vähintään kuuden vuoden välein [23, § 7 g]. Esimerkiksi tämän hetken suunnitelman mukaan laitosten sulkemisen jälkeen Olkiluoto 1 ja 2 jätetään seisomaan paikoilleen useaksi kymmeneksi vuodeksi ennen purkutöiden aloitusta. Pääpiirteittäin ydinvoimalaitoksen käytöstäpoisto tapahtuu niin, että laitoksen rakenteet puretaan, paloitellaan, pakataan ja sijoitetaan laitosalueella sijaitsevaan matalan ja keskiaktiivisen ydinjätteen loppusijoituspaikkaan. Laitosten korkea-aktiivinen jäte sijoitetaan korkea-aktiivisen jätteen loppusijoituspaikkaan, kun sellainen on saatavilla. [24.] Posiva Oy, jonka omistaa Teollisuuden Voima Oy ja Fortum Power and Heat Oy (Suomen ydinvoimalaitosten omistajat), kehittää korkea-aktiivisen ydinjätteen loppusijoitusmenetelmää ja pyrkii aloittamaan loppusijoittamisen vuoteen 2025 mennessä [25].

Oletettavasti pienreaktorin käytöstäpoisto seuraa samaa sapluunaa kuin perinteisen ydinvoimalaitoksen, tosin laitoksen ominaisuuksien mukaan alasajon ja purkamisen aikamääreet voivat vaihdella. Pienreaktoreiden matala- ja keskiaktiivinen jäte voitaisiin varastoida esimerkiksi isomman, perinteisen ydinvoimalaitoksen matala- ja keskiaktiivisen jätteen varastoihin. Pienreaktoreiden käytöstäpoistossa voitaisiin käyttää hyödyksi pienten tutkimusreaktoreiden, esimerkiksi suomalaisen FiR1-tutkimusreaktorin käytöstäpoiston kokemuksia [26].

## 4 Pienydinvoima

Yleisesti puhuttaessa pienydinvoimasta puhutaan pienistä modulaarisista ydinreaktoreista, small modular reactor eli SMR. Pienreaktorit nousevat tasaisesti pinnalle julkisessa keskustelussa erityisesti polttoon perustumattoman lämmön

tuottamisessa. Suomessa kaukolämmön tuottaminen perustuu pitkälti biomassan, fossiilisten polttoaineiden ja turpeen polttoon.

Nykyisen käsityksen mukaan pienreaktorien on ajateltu olevan koottavia, perinteisiä ydinvoimalaitoksia pienempiä voimalaitoksia, jotka ovat kustannustehokkaampia, omaavat passiivisia turvallisuusominaisuuksia ja joita voidaan käyttää potentiaalisesti sähkön ja lämmöntuotannon lisäksi välillisesti myös vedyn ja puhtaan juomaveden tuottamisessa. [27, s. 4.]

#### 4.1 Määrittely ja käyttötarkoitukset

Pieni modulaarinen ydinreaktori on Kansainvälisen atomienergiajärjestön (IAEA) määritelmän mukaan alle 300 megawatin tehoinen ydinreaktori. Mikroreaktori on puolestaan paikalliseen energiantuotantoon tarkoitettu, maksimissaan 10 megawatin tehoinen reaktori. [28.] Perinteinen ydinvoimalaitos on noin 2–3 kertaa pienreaktoria tehokkaampi. Esimerkiksi Loviisan molemmat laitokset ovat nettosähköteholtaan 507 megawattia, ja Porin Olkiluodossa käytössä olevat Olkiluoto 1 ja 2 laitokset 890 megawattia. Kolmannen Olkiluodon laitoksen nettosähköteho on noin 1600 megawattia [19].

Pienreaktoreiden reaktoritekniikkaa ei ole ennalta määritelty, vaan se voi vaihdella olemassa olevien sekä kehitteillä olevien tekniikoiden välillä. Potentiaalisia tekniikoita on esimerkiksi kevyt- ja raskasvesireaktorit, kaasujäähdytteiset reaktorit sekä metallijäähdytteiset reaktorit. Vesijäähdytteiset reaktorit ovat potentiaalisin valinta kaukolämmön tuotantoa varten, sillä niiden lämpötilat pysyvät maltillisina verrattuna esimerkiksi kaasu- ja metallijäähdytteisiin. Matalamman paineen ja lämpötilan voidaan katsoa helpottavan passiivisia turvallisuusominaisuuksia ja näin ollen edistävän reaktorin sijoittamista lähemmäs asutuskeskusta. [27, s. 11.]

Pienreaktorien modulaarisuudella tarkoitetaan sen koostumista useammasta, ennalta valmistetusta moduulista, jotka voidaan kuljettaa koottavaksi laitospaikalle. Reaktorien ja oheistuotteiden valmistus tapahtuu niille erikseen

omistetuissa tehtaissa tai telakoilla, ja näin ollen reaktoreita voitaisiin tuottaa sarjatuotantona. Pienreaktoreille omistettu teollisuus ja sarjatuotanto, käyttö ja koulutus ovat valtava potentiaali esimerkiksi Suomelle. [27.]

## 4.2 Erilaisia malleja ja konsepteja

Pienreaktorit ovat laaja joukko testauksessa olevia, patentoituja sekä suunniteltuja konsepteja. Vuonna 2022 Kansainvälisen atomienergiajärjestön jäsenvaltioista 18 valtiossa oli kehitteillä yhteensä yli 80 pienreaktorikonseptia. Näistä konsepteista käytössä olivat venäläinen KLT-40S, kiinalainen HTR-PM ja japanilainen HTTR. Lisäksi HTR-PM:n edeltäjä HTR-10 oli käyttökuntoinen, ja sen toimintaluvan jatkohakemus oli vireillä. [29, s. 1–4.]

### Akademik Lomonosov

Maailman kolmesta käytössä olevasta pienreaktoriksi luokitellusta ydinvoimalaitoksesta yksi on kelluva venäläinen KLT-40S-kevytvesireaktoreita käyttävä Akademik Lomonosov. Akademik Lomonosov on ensimmäinen suunnitelluista kelluvien ydinvoimalaitosten laivastosta, joiden on ajateltu korvaavan perinteisiä fossiilisia polttoaineita käyttäviä polttolaitoksia Venäjän syrjäseuduilla. Akademik Lomonosov on suunniteltu tuottamaan sähköä, lämpöä sekä desalinoitua vettä. Lomonosovin kaltainen siirrettävä pienydinvoimala vaatii käyttökaupungeilta infrastruktuuria, jolla voidaan hyödyntää sen tuottama sähkö ja lämpö. Kuvassa 6 nähdään Akademik Lomonosov telakoitumassa kohdekaupunkiin. [27.]



Kuva 6. Kelluva ydinvoimalaitos Akademik Lomonosov. Laitoksen liikuttelussa satama-altaassa käytetään apuna proomuja. [30.]

Akademik Lomonosov käyttää kahta KLT-40S-reaktoria, joiden sähkö- ja lämpö kapasiteetit ovat yhteensä 70 megawattia ja 300 megawattia. Reaktorit ovat kevytvesijäähdytteisiä, ja niiden tekniseksi käyttöiäksi on arvioitu 40 vuotta. Reaktoreiden tankkaussyklin on arvioitu olevan noin 30–36 kuukautta, ja käytettyä ydinpolttoainetta säilytetään aluksella niin kauan, kunnes se palautetaan mantee-reelle normaaliin ydinjättekäsittelyyn. [29, s. 113–116.]

Akademik Lomonosovin rakentaminen aloitettiin vuonna 2007 Sevmarshissa, mutta siirrettiin Pietarin telakalle vuonna 2009. Laitoksen lopulliseksi hinnaksi on arvioitu noin 480 miljoonaa Yhdysvaltain dollaria. KLT-40-reaktoreiden tekniikka on alun perin venäläisistä jäänmurtajista ja sukellusveneistä, jotka käyttävät ydinvoimaa voimanlähteinään. Näiden vastaavaa reaktoritekniikkaa käyttävien jäänmurtajien yhteenlaskettu käyttöikä on jopa 300 reaktorivuotta, jonka aikana yksikään kyseistä tekniikkaa käyttävä jäänmurtaja ei ole keskeyttänyt matkaansa reaktorivian vuoksi. Laitos on siinä mielessä modulaarinen, että sen osat kuten reaktori, höyrygeneraattorit ja jäähdytinkierrot on yhdistetty toisiinsa liitoksilla, eikä pitkillä putkilla. Modulaarisuusajattelua tukee myös laitoksen rakentaminen telakalla, jolla näin ollen on tuotantokapasiteetti seuraavien

vastaavien rakentamiseen, sekä passiiviset turvallisuusominaisuudet luonnonilmiöiden ja onnettomuuksien varalta. Akademik Lomonosov on käytännössä Rosatomin suunnitelmissa olevien kelluvien ja siirrettävien ydinvoimaloiden prototyyppi, ja tulevien pienreaktorien on suunniteltu olevan pienempiä, halvempia ja tehokkaampia. [27, s. 21–23.]

## HTR-PM

HTR-PM (High Temperature gas-cooled Reactor Pebble-bed Module) on Tsinghuan yliopistossa Kiinassa kehitetty tutkimuskäyttöön suunnattu ydinvoimalaitos. Voimalaitoksessa on kaksi heliumjäähdytteistä kuulareaktoria, ja laitoksen sähköteho on 210 megawattia. Laitosalueella on omat rakennukset reaktoreille, turbiinille, käytetylle ydinpolttoaineelle sekä ohjaushuone ja sähkökeskus. Laitosalue on kooltaan 25,61 hehtaaria. Laitoksen tekninen käyttöikä on 40 vuotta. [29, s. 147–150.]

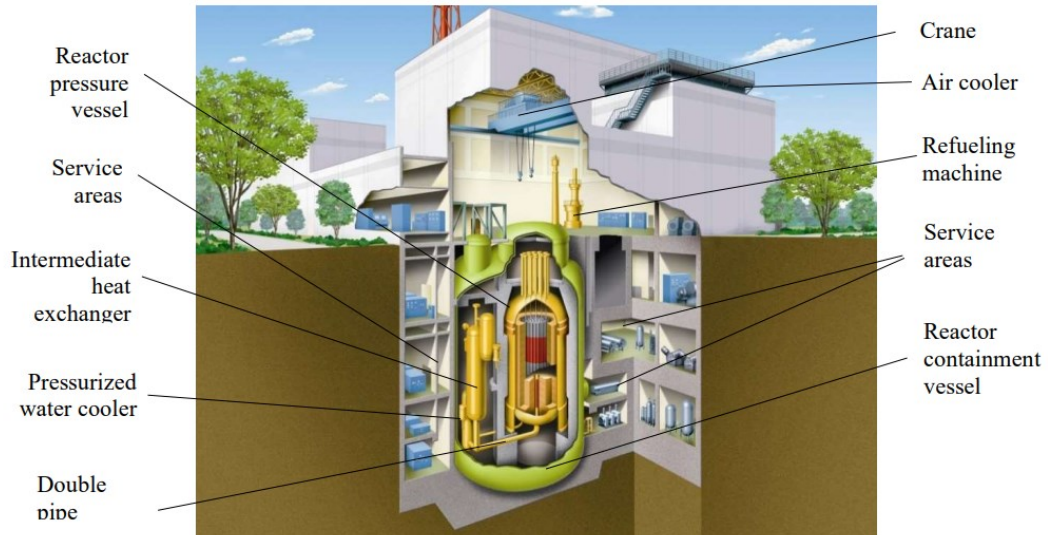
Laitos on yhdistetty sähköverkkoon, mutta rakennettu tutkimuskäyttöön ja prototyyppiksi. Suunnitteilla on kaupallistaa HTR-PM-konsepti, ja tuottaa 200, 600 tai 1000 megawatin laitoksia. Kuvassa 7 on HTR-PM-ydinvoimalaitos Kiinan Shandongissa. [29, s. 147–150.]



Kuva 7. HTR-PM-ydinvoimalaitos sijaitsee syrjäisellä alueella [31].

## HTTR

The High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) on Japanin atomienergiaviraston kehittämä heliumjäähdytteinen pienreaktori, joka on lämpötehoiltaan 30 megawattia. Reaktorilla voidaan tuottaa sähkön lisäksi prosessilämpöä. Laitoksella on tarkoitus edistää tutkimustyötä korkean lämpötilan kaasujäähdytteisten reaktorien (High Temperature Gas-cooled Reactor, HTGR) ja korkean lämpötilan tekniikan parissa, sekä tutkia ydinvoimalla tuotetun prosessilämmön käyttömahdollisuuksia. Reaktorin tekninen käyttöikä on noin 20 vuotta. Laitosalue on kooltaan 6 hehtaaria, ja reaktorirakennus on halkaisijaltaan 18,5 metriä ja korkeudeltaan 30 metriä. Reaktori rakennettiin vuosina 1991–1997, ja sitä käytettiin tutkimustarkoituksiin aina vuoden 2011 Tōhokun maanjäristykseen ja tsunamiin saakka. Reaktori käynnistettiin uudelleen vuonna 2021, ja tällä hetkellä sitä käytetään vedyntuotannon tutkimukseen. Kuvassa 8 on läpileikkaus HTTR-reaktorista. [29, s. 213–216.]

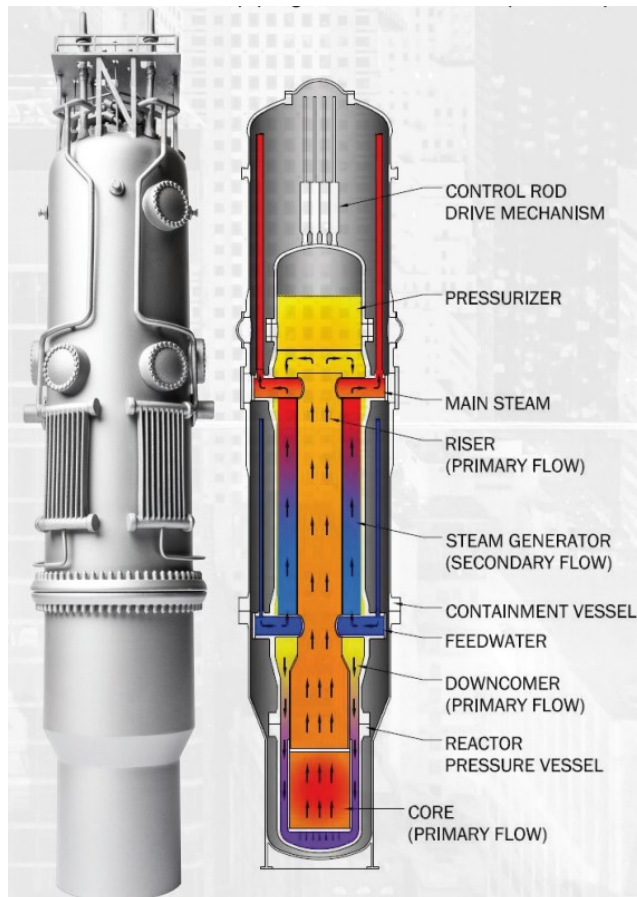


Kuva 8. Lämpileikkaus HTTR-reaktorista. Suurin osa reaktorista on sijoitettu maan alle. [29.]

#### VOYGR SMR Powerplant

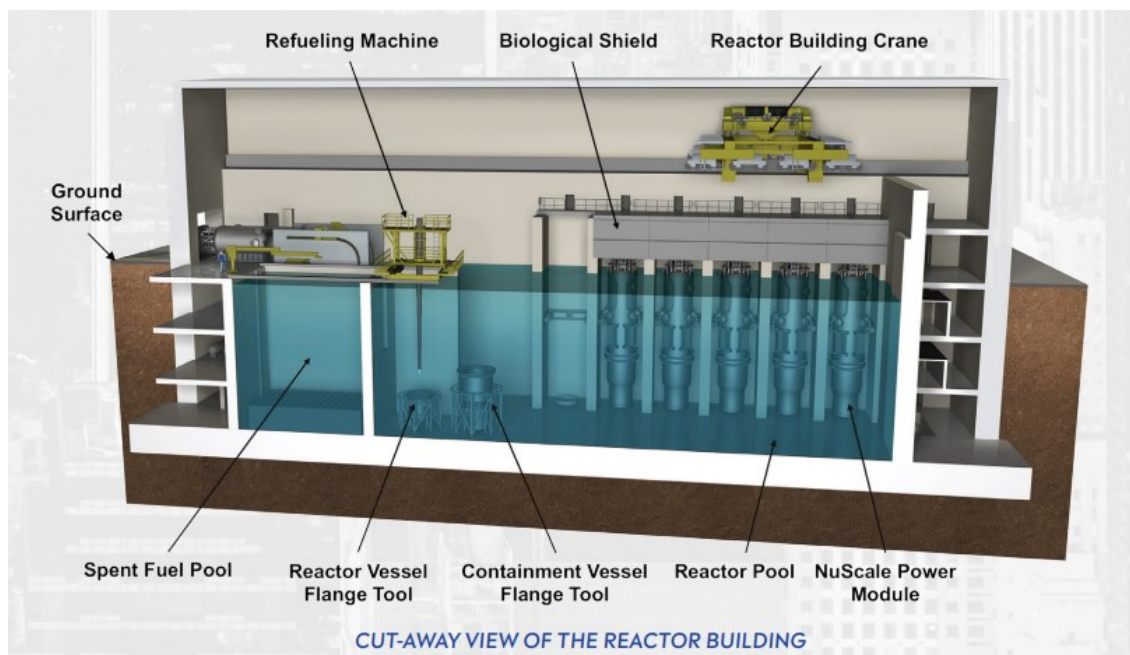
Yhdysvaltalainen NuScale Power Inc. on suunnitellut The NuScale Power Module -nimisen kevytvesijäähdytteisen painevesireaktorin ja sitä ympäröivän laitoksen, VOYGR SMR Powerplant. NuScale on ilmoittanut yhden reaktorin lämpötehoksi 250 megawattia ja sähkötehoksi 77 megawattia. Reaktori suojaakoriineen on sylinterin mallinen, korkeudeltaan noin 23 metriä ja halkaisijaltaan neljä ja puoli metriä. NuScalen suunnitelmassa on toimittava asiakkailleen neljän, kuuden tai kahdentoista reaktorin voimaloita, joiden teknisen käyttöiän on arvioitu olevan jopa 60 vuotta. Suurin, kahdentoista reaktorin voimala, tuottaa 924 megawattia sähkötehoa ja pienin, neljän reaktorin voimala, 308 megawattia. Täysikokoinen 12 reaktorin voimala on kapasiteetiltaan hieman suurempi kuin Olkiluoto 1 ja 2. Kuvassa 9 on lämpileikkaus NuScale-reaktorista. [29, s. 87–90; 32.]





Kuva 9. NuScale reaktorin läpileikkaus. Reaktorin jäähdytys perustuu painovoimaiseen luonnonkiertoon. [32.]

Reaktorin tankkaussykliksi on arvioitu kaksi vuotta, ja reaktoreiden modulaarisuuden vuoksi laitosta ei tarvitse kokonaan ajaa alas tankkauksen ajaksi, vaan alasajo ja tankkaus voidaan suorittaa reaktori kerrallaan. VOYGR-laitos on suunniteltu säilyttämään kaiken laitoksen tuottaman ydinjätteen elinkaarensa loppuun saakka. Ensin reaktorirakennuksen käytetyn polttoaineen altaassa ja jäähdyttyään laitoksen tiloissa kuivasäilytyksessä. Ydinjätteen lopullinen sijoituskohte on valtakunnallinen ydinjätteen säilytyskeskus. Kuvassa 10 on läpileikkaus VOYGR-laitoksen reaktorirakennuksesta. [29, s. 87–90; 32.]



Kuva 10. Lämpileikkaus VOYGR-laitoksen reaktorirakennuksesta. Reaktoreita voidaan ajaa alas yksi kerrallaan, jolloin laitos voidaan pitää käynnissä tankkausten ja huoltotöiden aikana. [32.]

NuScale Powerilla on tarkoituksena rakentaa oma tehdas reaktoreiden rakentamista varten, ja on arvioinut tehtaasta tulevan noin 9,3 hehtaarin kokoinen ja työllistävän noin tuhat henkeä. Kaikki VOYGR-laitoksen osat valmistettaisiin tehtaissa ja kuljetettaisiin meri-, rauta- tai maanteitse suunnitellun laitoksen paikalle. Yhtiö etsii aktiivisesti sijoittajia, alihankkijoita ja yhteistyökumppaneita reaktoreiden sekä laitosten infrastruktuurien rakentamisessa. [27, s. 15–20.] Tällä hetkellä NuScalella on yhteistyötä reaktoreiden tai laitosten puolesta Pohjois-Amerikassa, Euroopassa, Lähi-Idässä ja Aasiassa. Ensimmäisten laitosten odotetaan kiinnittyvän verkkoon aikaisintaan 2029 Puolassa ja 2030 Yhdysvaltain Idahossa sekä Romanian Doicestissa. [33.]

## 5 Suomalaiset toimijat ja pienydinvoima

Suomessa erityisesti kaukolämmön tuottajat ovat kiinnostuneita pienydinvoiman potentiaalista. Useampi tuottaja on jopa ilmaissut olevansa kiinnostunut keskusteluista koskien mahdollista pilottilaitosta. Pienydinvoimalla tuotettu kaukolämpö

olisi päästötöntä ja riippumatonta säästä sekä sähkön ja polttoaineiden hinnasta. Näin ollen pienydinvoimalla tuotettu kaukolämpö olisi sekä päästötavoitteiden että huoltovarmuuden kannalta optimaalista. Projektien toteutusta hidastaa esimerkiksi perinteisiin suuriin ydinvoimalaitoksiin kohdennettu lainsäädäntö, pienreaktoriteknologian varhainen kypsyysaste sekä yleinen kokemuksen puute. [34, s. 6, 16.]

Kotimainen EcoSMR-hanke (Finnish Ecosystem for Small Modular Reactors) on tarjonnut alustan pienreaktoreilla tuotetusta kaukolämmöstä kiinnostuneille tahoille keskustella liiketoimintamahdollisuuksista aiheen ympärillä. Hankkeen tavoitteina oli analysoida ydinenergiateknologian vaatimuksia, lisensointia ja liiketoimintaa ja edistää niiden kehittämistä vastaamaan markkinoiden tarpeita. Tavoitteisiin kuului myös verkostojen ja innovaatiotoiminnan käynnistäminen, sekä tutkia pienydinvoiman pilotointia Suomessa. Kotimainen referenssi nähdään olennaisena osana viennin edistämistä. Hankkeen tutkimuspuolesta vastasi Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy ja Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT. Yrityskumppaneina hankkeessa oli energiayhtiöitä, teollisuuden konepajoja ja konsulttiyrityksiä. [35.] Kaksivuotinen hanke käynnistyi elokuussa 2020 Business Finlandin rahoittamana, ja hankkeen päätyttyä osallistuneet tahot jatkavat yhteistyötä samojen aiheiden parissa EcoSMR Hub -nimellä [36].

Nykyisen lainsäädännön puitteissa ydinvoimalaitoksen lisenssinhaltija, eli omistaja ja käyttäjä, vastaa laitoksen jätehuollosta ja turvallisuudesta. Perinteiselle kaukolämmön tuottajalle tällainen vastuu voi olla liian suuri. EcoSMR-projekti teki tutkimusta liittyen mahdollisten uusien liiketoimintamallien ja lainsäädännön muutosten osalta, jonka myötä kaukolämpöä tuottavan ydinvoimalaitoksen lisensoinnin ja jätehuollon voisi ulkoistaa erilliselle vastuorganisaatiolle. Toisaalta lainsäädännön näkökulmastakin on vaikeaa luoda ennalta sapluuna pienreaktoriprojektien sääntelylle. Työ- ja elinkeinoministeriö onkin todennut lainsäädännön sovittamista helpommaksi vasta kun vakavasti otettava taho ja projekti ilmaantuu. [34, s. 8, 15.]

Lappeenrannan kaupunki, Lappeenrannan Energia Oy, Imatran Lämpö Oy, Kuopion Energia Oy, Pori Energia Oy ja Tampereen Sähkölaitos Oy ovat yhdessä allekirjoittaneet 18.1.2023 Suomen tulevalle hallitukselle suunnatun julkilausuman, jossa toivotaan valtion ottavan roolia potentiaalisessa ydinkaukolämmön pilottihankkeessa. Yksittäisen yrityksen harteille tällainen pilottihanke koetaan liian raskaaksi ja riskialttiiksi, ja allekirjoittaneet yritykset ilmaisevat halukkuutensa ottaa osaa valtiojohtoiseen projektiin, jossa viranomaiset, kaukolämmön tuottajat sekä sidosryhmät ja teollisuus pystyisivät yhdessä pilottihankkeen ohella ratkaisemaan lainsäädäntöön liittyviä ongelmia. Yritykset sitoutuisivat ostamaan pilottihankkeella tuotettua lämpöä. Samalla toivotaan pilottihanketta kauemmas ulottuvaa selkeää strategiaa suomalaiselle ydinkaukolämmölle, jonka toivotaan luovan Suomeen uusia työpaikkoja liittyen sarjatuotettujen pienreaktoreiden vientiteollisuuteen. [37.]

Tällä hetkellä ulkomaisten valmistajien kanssa yhteistyötä tekee mm. Fortum Power and Heat, joka on solminut yhteistyösopimuksen Rolls-Roycen kanssa koskien pienydinvoiman mahdollisuuksien tutkimista Suomessa. Rolls-Roycella on 470 megawatin tehoinen pienreaktorikonsepti, jonka käyttöikäksi on arvioitu 60 vuotta. Fortumilla on yhteistyösopimuksia pienydinvoiman saralla myös ruotsalaisen Kärnfull Next Ab:n, ranskalaisen EDF:n sekä suomalaisen Helen Oy:n kanssa. [38.]

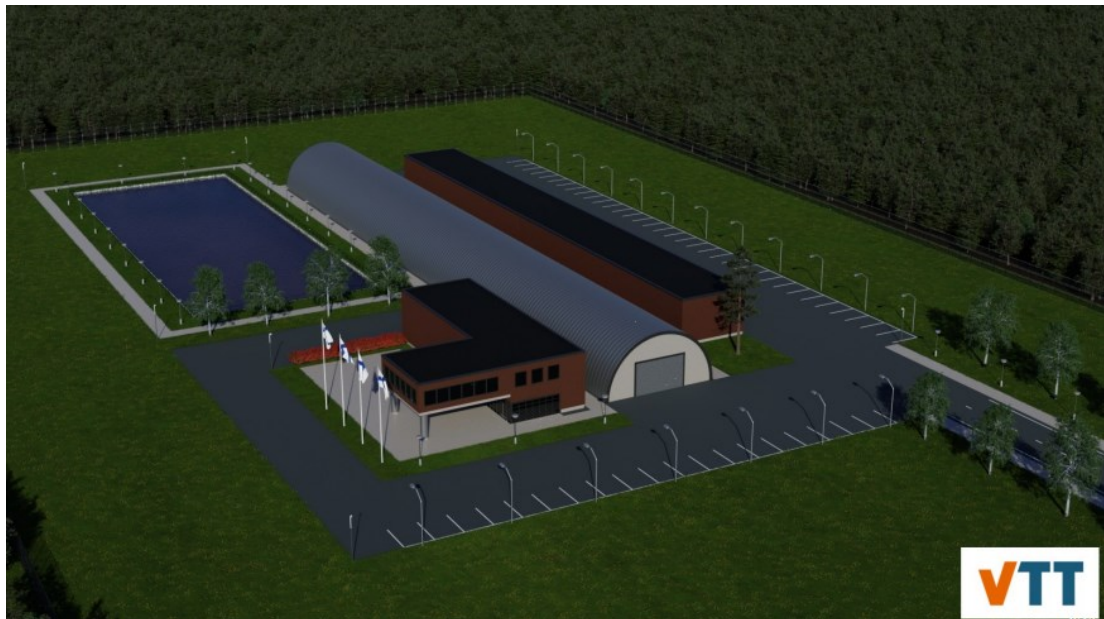
## 5.1 Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy on Suomen valtion omistama, Työ- ja elinkeinoministeriön alaisuudessa toimiva voittoa tavoittelematon keskittymä, jonka tehtävä on edistää tutkimusta ja teknologiaa yhteiskunnassa ja elinkeinoelämässä. VTT:n tutkimuksella ja kehityksellä on kolme painopistettä: hiilineutraalit ratkaisut, tulevaisuuden tuotteet ja materiaalit sekä digitaaliset teknologiat. Nämä painopisteet pitävät sisällään useita eri osa-alueita, joista yksi on ydinenergia. VTT tarjoaa palveluita ja ratkaisuja mm. uusien ydinvoimalaitosten ja ydinlaitosinnovaatioiden, ydinturvallisuuden, ydinjätehuollon ja loppusijoittamisen sekä ydinvoimalaitosten eliniän ja käytöstäpoistojen parissa. VTT tekee ja

tukee tutkimusta pienreaktoriteknologian ohella myös fuusioenergian ja neljännen sukupolven fissioreaktorien parissa. [39.]

## LDR-50

VTT aloitti vuonna 2020 suunnittelemaan omaa pienreaktoria aluksi nimellä LDR eli Low-temperature District heating and desalination Reactor, nykyään nimellä LDR-50, 50 megawatin tehon mukaan. LDR-50 on painevesireaktori, jota voidaan käyttää kaukolämmön tuottamisessa. Reaktori on modulaarinen, ja laitos voi koostua yhdestä tai useammasta reaktorista. Laitosaluetta arvioidaan pienen tai keskikokoisen teollisuusalueen kokoiseksi. Kuvassa 11 on mallinnus LDR-50-ydinvoimalaitoksesta. [40.]



Kuva 11. LDR-50-ydinvoimalaitos on ajateltu sijoitettavan pienelle teollisuusalueelle [40].

Ensimmäinen demonstraatioreaktori pyritään saada valmiiksi ennen vuotta 2030, ja tämän saavuttamisen jälkeen konsepti pyritään kaupallistamaan. Rakennuskustannuksista arvioidaan, että rakentaminen on kannattavaa, mikäli investointikustannukset olisivat maksimissaan 1 500 euroa per kilowatti, eli yhdeltä 50 megawatin reaktorilta 75 miljoonaa euroa. Investointikustannuksia

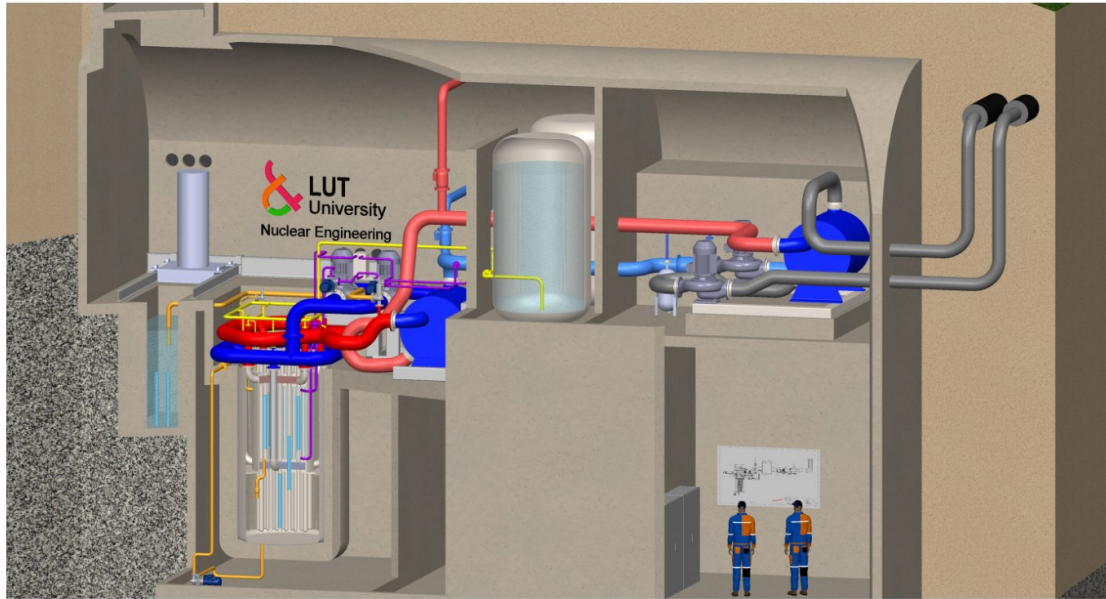
hankalammin arvioitavat ovat henkilökuntaan ja operointiin kohdistuvat kustannukset. [40.]

## 5.2 Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT on yksi suomalaisen ydinvoimatekniikan tutkimuksen kulmakivistä ja ainoa teknillinen korkeakoulu, joka tarjoaa ydinvoimatekniikkaa pääaineena maisteritasolla. LUT tekee jatkuvasti tutkimusta ydinvoimatekniikan eri osa-alueilla ja on osallistunut mm. edellä mainittuun EcoSMR-hankkeeseen. Koulutuksen ja tutkimuksen ohella LUTista on tullut kaksi kaukolämmitykseen tarkoitettua pienreaktorikonseptia, ja LUT on tehnyt yhteisymmärryssopimuksen mikroreaktorin rakentamisesta Lappeenrantaan tutkimus- ja koulutuskäyttöön.

### FinReactor

Ensimmäinen konsepti on professori Juhani Hyvärisen esittelemä Suomi-Reaktori, FinReactor. FinReactor olisi 24 megawatin tehoinen matalan lämpötilan (180 °C) ja paineen (1,5 MPa) kevytvesireaktori, jonka hyötysuhde olisi lähes 100 %. Laitoksella kyettäisiin tuottamaan kaukolämpöä, sekä välillisesti kaukokylmää ja desalinoitua vettä. Se kykenisi toimimaan miehittämättömänä ja olisi skaalattavissa erikokoisiksi. FinReactorin turvallisuutta puoltaa sen ainakin osittainen sijoittelu maan alle, pienen koon myötä vähäinen säteilevän materiaalin määrä, sekä passiiviset turvallisuusominaisuudet kuten häiriötilanteessa tapahtuva painovoimainen jäähdytys ja reaktorin rikkoutuessa radioaktiivisten aineiden ohjautuminen ympäristöltä eristettyyn ja ilmatiiviiseen tilaan. Reaktorin rakentamiseen ja käyttöön liittyvä materiaali ja osaaminen olisi saatavilla Suomesta, poislukien käyttövalmis uraani. Kuvassa 12 on havainnekuva FinReactorista. [41; 42.]



Kuva 12. FinReactor on suunniteltu sijoitettavaksi kokonaan maan alle [42].

#### LUT Heating Experimental Reactor

LUT Heating Experimental Reactor, LUTHER, on toinen LUTissa kehitteillä olevista pienreaktori-konsepteista. LUTHER on kevytvesireaktori, jolla tuotettaisiin kaukolämpöä. Pienimmillään LUTHER olisi kahden megawatin tehoinen koe- ja demonstraatiokäyttöön tarkoitettu reaktori, suurimmillaan 120 megawatin tehoinen kaupallistettava reaktori. LUTHERin toimintalämpötila on 150–180 °C ja toimintapaine 1,25 MPa. [43.]

LUTHERin suunnittelussa on pyritty yksinkertaistamaan teknologiaa reaktorin ytimessä ja turvatoimissa. Yksinkertaistusten on ajateltu johtavan helpommin ymmärrettäviin turvatoimiin sekä halvempiin infrastruktuurikustannuksiin. Näiden aspektien on puolestaan ajateltu parantavan ydinvoimataloutta sekä yleistä suhtautumista ydinvoimaan. [43.]

#### Ultra Safe Nuclear Corporation ja Micro Modular Reactor

Yhdysvaltalainen Ultra Safe Nuclear Corporation, USNC, tutkii yhdessä LUTin kanssa Micro Modular Reactorin, MMR:n rakentamista Lappeenrantaan.

Lappeenrannan kaukolämpöverkkoon kytkettävä kaasujäähdytteinen reaktori olisi lämpöteholtaan 15–30 megawattia, ja reaktori rakennettaisiin maan alle. Reaktori rakennettaisiin pääasiallisesti tutkimus- ja koulutuskäyttöön, mutta valmistuessaan se tuottaisi säännöllisesti kaukolämpöä Lappeenrannan kaukolämpöverkkoon. Hankkeen tarkoituksena on havainnollistaa turvallista ja ympäristöystävällistä ydinvoimatekniikkaa. [44.] Kuvassa 13 on havainnekuva MMR-reaktorista.



Kuva 13. MMR-reaktori tuottaa kaukolämpöä maan alla [44].

## 6 Tuotantotapojen vertailu

### 6.1 Ympäristövaikutukset

Suomessa perinteisten ydinvoimalaitosten merkittävin käytönaikainen ympäristövaikutus on lauhduttimen lämmenneen jäähdytysveden paluu vesistöön. Esimerkiksi Olkiluodon laitosten 1 ja 2 lauhduttimien jäähdytyksessä käytetään yhteensä 76 m<sup>3</sup>/s merivettä, joka jäähdytysprosessin jälkeen palaa mereen noin 10 astetta lämpimämpänä. [45.] Pienreaktoreiden ympäristövaikutusten on arvioitu olevan hyvin samankaltaisia perinteisen kokoluokan ydinvoimalaitosten kanssa, mutta pienemmässä mittakaavassa. Konseptista riippuen pienreaktorin



jäähdytys saattaa olla myös johdettavissa suoraan maaperään. Laitosalueen ja infrastruktuurin rakentamisen aikaiset päästöt ovat myös vastaavia mutta pienemmässä mittakaavassa. Modulaarisuuden ansiosta pienreaktori voidaan tuoda osissa laitospaikalle, eikä laitosta tarvitse rakentaa, vaan se kootaan.

Ydinvoimaloiden ympäristövaikutuksia arvioidaan myös potentiaalisessa onnettomuustilanteessa. Mittakaava-ajattelu pätee myös tässä: mitä pienempi laitos, sitä vähemmän ydinpolttoainetta ja radioaktiivista materiaalia, sitä pienempi vaikutusalue potentiaalisella onnettomuudella. [46.]

### Päästökertoimet

Polttoaineille voidaan määrittää päästökerroin. Päästökerroin ilmaisee kuinka paljon polttoaine tuottaa CO<sub>2</sub> ekvivalenttia suhteessa johonkin tiettyyn määreen, tässä tapauksessa energiasisältöön. Suomessa suurin osa kaukolämmöstä tuotetaan puu- ja metsäperäisillä polttoaineilla, joiden päästöt lasketaan maankäytön, maankäytön muutokset ja metsätalous -sektorilla. Puu- ja metsäperäisten polttoaineiden palamisreaktiossa syntyy hiilidioksidia, ja puun päästökertoimeksi on määritetty 112 000 kg hiilidioksidia per terajoule. [47, s. 17].

Perinteinen ydinvoima perustuu fissioreaktioon, jossa uraaniatomista vapautuu energiaa. Tässä reaktiossa ei tapahdu palamista, eikä reaktiosta synny hiilidioksidia tai muita kasvihuonekaasuja. Ydinenergian päästökerroin on 0 tonnia hiilidioksidia per terajoule, t/TJ. Taulukossa 1 on polttoaineiden päästökertoimia.

Taulukko 1. Polttoaineiden päästökertoimia. Puun polttamisen päästöt lasetaan LULUCF-sektorilla, mutta sen päästökerroin on korkein käytetyistä polttoaineista. [48.]

<b>Polttoaine</b>	<b>Päästökerroin (t/TJ)</b>
Puu	112,00
Jyrsinturve	107,60
Kivihiili	93,10
Raskas polttoöljy	76,10
Maakaasu	55,37
Ydinenergia	0,00

Esimerkiksi vuosina 2021 ja 2020 Suomen suurimman kaukolämmön tuottajan, Helen Oy:n, tuottaman lämmön hiilidioksidipäästöt olivat 182 grammaa yhtä kilowattituntia kohden, eli noin 50,56 t/TJ [49]. Vuonna 2021 Helenin kaukolämmöstä yhteensä 19,4 % tuotettiin lämpöpumpuilla ja biopolttoaineilla [50].

## 6.2 Turvallisuus

Pienreaktoreista on toistaiseksi vain vähän dataa, ja niiden turvallisuutta voidaan vain arvioida ja laskea, sekä simuloida erilaisilla mallinuksilla. Yksi perustava ajatus pienreaktoreiden suunnittelussa on ollut se, että verrattuna täysikokoiseen ydinvoimalaitokseen, lähtökohtaisesti kooltaan ja teholtaan pienempi reaktori aiheuttaa onnettomuuden sattuessa myös pienemmän vahingon ihmiselle ja ympäristölle. Suomen lainsäädännössä on annettu asetus ydinvoimaloiden turvahenkilöstöstä, joilla on käytännössä laitosalueella poliisin valtuudet [23, § 7 m]. Vaikka pienreaktori olisi miehittämätön ja etäältä ohjattava, sen turvallisuusproseduureihin kuuluisi nykyisen lainsäädännön mukaan myös vastaavat turvahenkilöt ja vartiointi.

Eri energiantuotantomenetelmien turvallisuutta voidaan laskea mittaamalla esimerkiksi kuolemien määrä tuotettua sähkön tai lämmön määrää kohden. Taulukossa 2 on kuolemat energialähteittäin per tuotettu terawattitunti sähköä.

Mukaan on laskettu ennenaikaiset kuolemat johtuen ilmansaasteista ja onnettomuuksista.

Taulukko 2. Kuolemat energialähteittäin. Hiilivoima aiheuttaa eniten ennen aikaisia kuolemia, ja aurinkovoima vähiten. [51.]

<b>Energialähde</b>	<b>Kuolemat per terawattitunti</b>
Ruskohiili	32,72
Kivihiihi	24,62
Öljy	18,43
Biomassa	4,63
Maakaasu	2,82
Vesivoima	1,3
Tuulivoima	0,04
Ydinvoima	0,03
Aurinkovoima	0,02

## 7 Reaktorien sijoittaminen

Nykyinen lainsäädäntö käsittää kaikki ydinvoimalaitokset tasavertaisiksi. Ydinenergilaki määrittelee ydinvoimalaitoksille 5 kilometrin suoja-alueen ja 20 kilometrin varautumisalueen. Teoriassa kaukolämpöä tuottava pienreaktori pystyisi noudattamaan näitä kriteereitä, mutta ideaalissa tilanteessa reaktori sijoitettaisiin lähelle kaukolämpöverkkoa. Reaktorin sijoittaminen pidemmälle vaatisi kaukolämmöntuottajaa laajentamaan kaukolämpöverkkoa, ja 20 kilometrin siirron aikana vedestä häviää lämpöä. [52, s. 6.]

Tyypillisesti pienreaktorien tarjoajat puoltavat pienempiä varoalueita, jopa 1–2 kilometrin säteisiä. Nykylainsäädäntöä pienempää varoaluetta puoltaa reaktorien pienempi koko, teho ja säteilevän aineen määrä, sekä joissain tapauksissa passiiviset turvallisuusominaisuudet, jotka eivät lakkaa toimimasta esimerkiksi sähkökatkojen aikana. On ehdotettu, että nykylainsäädäntöä muutettaisiin

muotoon, jossa laitospaikan kriteerit määräytyvät tapauskohtaisesti huomioiden esiteltävän laitoksen ominaisuudet. Huomioitavia tekijöitä ovat esimerkiksi reaktorin aktiivisuusinventaaari sekä vikatilanteessa laitoksen suorituskyky estää radioaktiivisten aineiden leviäminen. Potentiaalinen sijoituspaikka pienreaktorille olisi kaukolämpöverkon varrella tiheään asutusalueen ulkopuolella esimerkiksi avaralla teollisuusalueella. Myös suljetut vanhat voimalaitokset ovat harkittavia sijoituskohteita. [53.]

Yksi esitetty vaihtoehto pienreaktorien sijoittamiselle on maan pinnan alapuolelle. Tällä kyettäisiin minimoimaan ulkoisten uhkien riskien konkretisoitumista (ilkiavalta, meteoriiitit, terrori-iskut), mutta toisaalta herättää kysymyksiä mm. paloturvallisuudesta, ilmanvaihdesta ja luonnonkatastrofeista (tulvat, maanjäristykset). On arvioutu, että maan alle rakentaminen kohentaisi julkista luottamusta ydin- ja reaktoriturvallisuuteen. [52, s. 126.] Varoalueissa on ilmeisten riskien ohella kyse myös tuntemattomaan varautumisesta, sillä kaikissa ydinlaitoksissa on ihmisille ja ympäristölle haitallista säteilevää ydinpolttoainetta ja ydinjätettä, ja varoalueiden idea on minimoida ”mitä vain voi tapahtua” -tilanteiden riskit. [52, s. 123.]

## 8 Yhteenveto

Insinööriyön tarkoituksena oli tutkia pienydinvoiman nykytilannetta ja potentiaalia kaukolämmön tuotannossa, sekä muodostaa arvio, milloin ja millaisilla alueilla pienydinvoimaloita voisi valjastaa kaukolämmön tuotantoon. Ottaen huomioon pienydinvoiman varhaisen kehitysasteen, nykyisen lainsäädännön, hiilineutraaliustavoitteet ja konseptien kehittäjien arviot kirjoittaja arvioi, että ensimmäiset kaupalliset kaukolämmön tuotantoon tarkoitetut pienreaktorit nähdään Suomessa aikaisintaan vuonna 2035. Potentiaalisia sijaintipaikkoja pienreaktoreille Suomessa ovat esimerkiksi syrjäiset ja avarat teollisuusalueet, sekä vanhat käytöstä poistetut voimalaitokset. Teoriassa pienreaktorin voisi sijoittaa konseptin mukaan taajamiin tai jopa keskusta-alueille, kunhan sen turva- ja vartiointijärjestelyistä huolehditaan. Olennaista on sijoittaa pienreaktori kaukolämpöverkon varrelle tai lähetyville.

Pienreaktorikonsepteja on kymmeniä erilaisia, ja niiden teho vaihtelee alle yhdestä megawatista useisiin satoihin megawatteihin. Suomen jokaiselle kaukolämpöverkolle löytyisi varmasti sopiva konsepti, ja reaktoreita voi yhdistää kaukolämpöverkkoon useamman kuin yhden. Monissa konsepteissa reaktori sijoitetaan puoliksi maan alle, ja kokonaan maan alle sijoittamisessa nähdään paljon potentiaalisia hyviä puolia, joita tulisi tutkia lisää. Pienreaktorihankintaa tehdessä kaukolämmöntuottajan tulisi käytännön järjestelyiden ohella ottaa huomioon alueen demografiset ja taloudelliset tekijät. Pienreaktoreiden käyttöikä on usein useita kymmeniä vuosia, eikä muuttotappiolliselle kunnalle pienreaktoriin investoiminen välttämättä ole järkevää, mikäli kaukolämmön kysynnän ennustetaan tulevaisuudessa laskevan.

Kotimainen kehitys ja tutkimus pienreaktorien parissa on aktiivista, ja pienreaktoriteollisuuden ja -osaamisen kehittymistä suomalaiseksi vientituotteeksi pidetään mahdollisena. Monet suomalaiset energiayhtiöt haluavat osallistua valtiojohtoiseen pienreaktoripilotointiin ja toivovat valtiolta selkeää pitkän linjan kansallista pienydinvoimastrategiaa. Energiayhtiöt toivovat nimenomaan suomalaisen ydinkaukolämmön konseptin kehittämistä, jonka parissa on jo sekä Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy että Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LDR-50-, LUTHER- ja FinReactor-konsepteillaan. VTT:n ja LUTin konseptit ovat jopa potentiaalisimpia suomalaiselle lämmöntuotannolle aikaisemman sidosryhmäyhteistyön, kaukolämpöinfrastruktuurin sekä lainsäädännön ja byrokratian tuntemuksen takia.

Pienreaktorien potentiaali päästöttömässä ja polttoon perustumattomassa lämmöntuotannossa on merkittävä, mutta toistaiseksi ongelmallinen käytännön toteutuksen kannalta. Ydinvoimalaitosten lupaprosessit ovat pitkiä, raskaita ja kalliita, eikä Suomen nykyllä lainsäädäntö erota pienreaktoreita perinteisistä, suuren kokoluokan ydinvoimalaitoksista. Pienreaktoreiden markkinoille tuonnin sujuvuutta helpottaakseen on arvioitu ja ehdotettu, että lainsäädännön tulisi määrittellä ydinvoimalaitosten suoja- ja varautumisalueet laitoskohtaisesti, perustuen ehdotetun ydinvoimalaitoksen ominaisuuksiin.

Lisäksi ongelmia tuottaa nykykäytäntö, jonka mukaan ydinvoimalaitoksen lisenssinhaltija, eli omistaja ja käyttäjä, vastaa ydinvoimalaitoksen turvallisuudesta, jätehuollosta ja käytöstäpoistosta. Monille pienille kaukolämmöntuottajille tämä voi olla liian kallis ja sitova käytäntö. Tämän asian tiimoilta olisi mielenkiintoista tutkia Suomen perinteisten ydinvoimalaitosten omistajien, TVO ja Fortum Power and Heat, mahdollisuutta tehdä tarvittaessa yhteistyösopimuksia kaukolämmöntuottajien kanssa pienreaktorien ydinjätteen keräyksestä Olkiluodon ja Loviisan olemassa oleviin ydinjätteen käsittelyprosesseihin.

## Lähteet

- 1 Kaukolämpötilasto 2021. 2022. Verkkoaineisto. Energiateollisuus ry. <[https://energia.fi/files/7487/Kaukolampotilasto\\_2021.pdf](https://energia.fi/files/7487/Kaukolampotilasto_2021.pdf)>. Luettu 21.4.2023.
- 2 Energiavuosi 2022 Kaukolämpö. 2023. Verkkoaineisto. Energiateollisuus ry. <[https://energia.fi/files/5650/Kaukolampovuosi\\_2022.pdf](https://energia.fi/files/5650/Kaukolampovuosi_2022.pdf)>. Luettu 21.4.2023.
- 3 Mäkelä, Veli-Matti & Tuunanen, Jarmo. 2015. Suomalainen kaukolämmitys. Mikkelin Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 4 Lignell, Edith. 2018. Keskitetty lämmöntuotanto Helsingissä – Lämpökeskusinventointi. Verkkoaineisto. Helsingin kaupungin museo. <<https://www.helsinginkaupunginmuseum.fi/wp-content/uploads/2019/01/Voimalaitosinventario.pdf>>. Luettu 21.4.2023.
- 5 Vuosikertomus 2021. 2022. Verkkoaineisto. Porvoon Energia Oy. <[https://issuu.com/porvoonenergiapbe/docs/pbe\\_vuosikertomus\\_rsber\\_ttelse\\_2021](https://issuu.com/porvoonenergiapbe/docs/pbe_vuosikertomus_rsber_ttelse_2021)>. Luettu 21.4.2023.
- 6 Kaukolämpöverkot. Verkkoaineisto. Energiateollisuus ry. <<https://energia.fi/energiasta/energiaverkot/kaukolampoverkot>>. Luettu 21.4.2023.
- 7 LOHER:n kaukolämpöverkko. Verkkoaineisto. Lohjan Energiahuolto Oy LOHER. <<https://www.loher.fi/verkko.asp>>. Luettu 21.4.2023.
- 8 Lämmönjakohuone – kuinka kaukolämpö tulee kerrostaloon. Verkkoaineisto. HSY, Ilmastoinfo. <[https://www.youtube.com/watch?v=S715-exO8Rk&ab\\_channel=Ilmastoinfo](https://www.youtube.com/watch?v=S715-exO8Rk&ab_channel=Ilmastoinfo)>. Katsottu 21.4.2023.
- 9 Energian kokonaiskulutus energialähteittäin, 2010Q1-2022Q4. Verkkoaineisto. Tilastokeskus. Tilastokeskuksen PxWeb-tietokannat. <[https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_\\_ehk/statfin\\_\\_ehk\\_pxt\\_12st.px/](https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__ehk/statfin__ehk_pxt_12st.px/)>. Luettu 21.4.2023.
- 10 Selvitys energiateollisuuden työllisyysvaikutuksista. 2021. Verkkoaineisto. Gaia Consulting Oy. <[https://energia.fi/files/5827/Energiateollisuuden\\_tyollisyys\\_-\\_Loppuraportti\\_12.3.2021.pdf](https://energia.fi/files/5827/Energiateollisuuden_tyollisyys_-_Loppuraportti_12.3.2021.pdf)>. Luettu 21.4.2023.
- 11 Sähkön ja lämmön tuotanto tuotantomuodoittain ja polttoaineittain, 2010-2021. Verkkoaineisto. Tilastokeskus. Tilastokeskuksen PxWeb-

- tietokannat. <[https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_\\_salatuo/statfin\\_salatuo\\_pxt\\_13j5.px/](https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__salatuo/statfin_salatuo_pxt_13j5.px/)>. Luettu 21.4.2023.
- 12 Hiilineutraali Suomi 2035 – kansallinen ilmasto- ja energiastrategia. 2022. Verkkoaineisto. Työ- ja elinkeinoministeriö. <[https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/164321/TEM\\_2022\\_53.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/164321/TEM_2022_53.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>. Luettu 21.4.2023.
  - 13 Lämpökeskukset. Verkkoaineisto. Helen Oy. <<https://www.helen.fi/helen-oy/energia/energiantuotanto/voimalaitokset/lampokeskukset>>. Luettu 21.4.2023.
  - 14 Yksi Suomen ensimmäisistä sähkökäyttöisistä lämpökattiloista on saapunut Tampereelle. 2022. Verkkoaineisto. Tampereen Sähkölaitos Oy. <<https://www.sahkolaitos.fi/blogiarkisto/yksi-suomen-ensimmaisista-sahkokayttoisista-lampokattiloista-on-saapunut-tampereelle/>>. Luettu 21.4.2023.
  - 15 Kasvihuonekaasupäästöt Suomessa, 1990-2021. Verkkoaineisto. Tilastokeskus. Tilastokeskuksen PxWeb-tietokannat. <[https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_\\_khki/statfin\\_khki\\_pxt\\_138v.px/](https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__khki/statfin_khki_pxt_138v.px/)>. Luettu 21.4.2023.
  - 16 Energiavuosi 2021 Sähkö. 2022. Verkkoaineisto. Energiateollisuus ry. <<https://www.slideshare.net/energiateollisuus/energiavuosi-2021-shk>>. Luettu 21.4.2023.
  - 17 Energiavuosi 2021 Kaukolämpö. 2022. Verkkoaineisto. Energiateollisuus ry. <<https://www.slideshare.net/energiateollisuus/kaukolampovuosi-2021>>. Luettu 21.4.2023.
  - 18 Eurasto, Tapani; Hyvärinen, Juhani; Järvinen, Marja-Leena; Sandberg, Jorma & Sjöblom, Kirsti-Liisa. Ydinvoimalaitostekniikan perusteita. Verkkoaineisto. Säteilyturvakeskus. <[https://www.stuk.fi/documents/12547/494524/kirjasarjaV\\_ydinturvallisuus\\_2.pdf/74b3643c-419f-4381-89ff-423e406f98b1](https://www.stuk.fi/documents/12547/494524/kirjasarjaV_ydinturvallisuus_2.pdf/74b3643c-419f-4381-89ff-423e406f98b1)>. Luettu 21.4.2023.
  - 19 Suomen ydinvoimalaitokset. Verkkoaineisto. Säteilyturvakeskus. <<https://www.stuk.fi/aiheet/ydinvoimalaitokset/suomen-ydinvoimalaitokset>>. Luettu 21.4.2023.
  - 20 Laki ydinenergiain lain muuttamisesta. 2008. 342/23.5.2008.
  - 21 Pienreaktorit ja niiden käyttökohteet. Verkkoaineisto. Energiforsk. <[https://thinkatomnet.files.wordpress.com/2023/01/pienreaktorit\\_ja\\_niiden\\_kayttokohteet\\_2023\\_print-2.pdf](https://thinkatomnet.files.wordpress.com/2023/01/pienreaktorit_ja_niiden_kayttokohteet_2023_print-2.pdf)>. Luettu 21.4.2023.



- 22 YVL. A.2. Ydinlaitoksen sijaintipaikka. 2019. Verkkoaineisto. Stuklex. <<https://www.stuklex.fi/fi/ohje/YVLA-2>>. Luettu 21.4.2023.
- 23 Ydinenergialaki. 1987. 990/11.12.1987.
- 24 Ydinlaitosten käytöstä poisto. 2020. Verkkoaineisto. Säteilyturvakeskus. <<https://www.stuk.fi/aiheet/ydinjatteet/ydinlaitosten-kaytosta-poisto>>. Luettu 21.4.2023.
- 25 Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen täyden mittakaavan koe alkaa vuoteen 2023 mennessä. 2022. Verkkoaineisto. Posiva Oy. <<https://www.posiva.fi/ajankohtaista/tiedotteetporssitiedotteet/2021/kaytetynydinpolttoaineenloppusijoituksentaydenmittakaavankoeal-kaavuoteen2023mennessa.html>>. Luettu 21.4.2023.
- 26 FiR -ydinreaktorin käytöstä poisto. Verkkoaineisto. VTT Oy. <<https://www.vttresearch.com/fi/palvelut/fir-1-ydinreaktorin-kaytosta-poisto>>. Luettu 21.4.2023.
- 27 Mäkelä, Lauri. 2019. SMR (Small Modular Reactors) -selvitys. Selvitys. Finnuclear ry.
- 28 What are Small Modular Reactors (SMRs)? 2021. Verkkoaineisto. IAEA. <<https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs>>. Luettu 21.4.2023.
- 29 Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. 2022. Verkkoaineisto. IAEA. <[https://aris.iaea.org/Publications/SMR\\_booklet\\_2022.pdf](https://aris.iaea.org/Publications/SMR_booklet_2022.pdf)>. Luettu 21.4.2023.
- 30 More nuclear heat for Arctic town. 2022. Verkkoaineisto. World Nuclear News. <<https://world-nuclear-news.org/Articles/More-nuclear-heat-for-Arctic-town>>. Luettu 21.4.2023.
- 31 World's first HTR-PM nuclear power plant connects to grid. Verkkoaineisto. Tsinghua University. <<https://www.tsinghua.edu.cn/en/info/1244/10921.htm>> Luettu 21.4.2023
- 32 Small modular reactor. 2022. Verkkoaineisto. NuScale Power Corporation. <<https://www.nuscalepower.com/-/media/nuscale/pdf/fact-sheets/smr-fact-sheet.pdf>>. Luettu 21.4.2023.
- 33 Projects. Verkkoaineisto. NuScale Power Corporation. <<https://www.nuscalepower.com/en/projects>>. Luettu 21.4.2023.

- 34 Arnold, Mona; Hyvärinen, Juhani; Leppänen, Jaakko; Soppela, Olli & Tulkki, Ville. Ydinkaukolämpöselvitys. 2022. Tutkimusraportti. VTT Oy. <<https://www.vttresearch.com/sites/default/files/2023-01/VTT-CR-01059-22.pdf>>.
- 35 Suomalainen pienreaktoriosaaminen vahvistuu uudella innovaatio- ja liiketoimintaverkostolla. 2020. Verkkoaineisto. VTT Oy. <<https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-ja-tarinat/suomalainen-pienreaktoriosaaminen-vahvistuu-uudella-innovaatio-ja>>. Luettu 21.4.2023.
- 36 Pienreaktoreihin liittyvää liiketoimintaa edistetään tutkimus-yritysyhteistyöllä. 2023. Verkkoaineisto. VTT oy. <<https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-ja-tarinat/pienreaktoreihin-liittyvaa-liiketoimintaa-edistetaan-tutkimus-yritysyhteistyolla>>. Luettu 21.4.2023.
- 37 Energiayhtiöt ovat valmiina ydinkaukolämpöpilottiin – ovatko päättäjät? 2023. Verkkoaineisto. <[https://www.sahkolaitos.fi/globalassets/tiedostot/ohjeet-ja-opasteet/sahkolaitos/ydinkaukolampo\\_julkilausuma.pdf](https://www.sahkolaitos.fi/globalassets/tiedostot/ohjeet-ja-opasteet/sahkolaitos/ydinkaukolampo_julkilausuma.pdf)>. Luettu 21.4.2023.
- 38 Fortum ja Rolls-Royce SMR kartoittavat yhteistyömahdollisuuksia pienydinvoiman osalta Suomessa ja Ruotsissa. 2023. Verkkoaineisto. Fortum Oyj. <<https://www.fortum.fi/media/2023/03/fortum-ja-rolls-royce-smr-kartoittavat-yhteistyomahdollisuuksia-pienydinvoiman-osalta-suomessa-ja-ruotsissa>>. Luettu 21.4.2023.
- 39 VTT. Verkkoaineisto. VTT Oy. <<https://www.vttresearch.com/fi>>. Luettu 21.4.2023.
- 40 Leppänen, Jaakko. 2022. LDR-50 District Heating Reactor Technology. Verkkoaineisto. VTT Oy. <[https://www.ats-fns.fi/images/files/2022/syp2022/presentations/jaakko\\_leppanen\\_LDR-50\\_district\\_heating\\_reactor\\_technology.pdf](https://www.ats-fns.fi/images/files/2022/syp2022/presentations/jaakko_leppanen_LDR-50_district_heating_reactor_technology.pdf)>. Luettu 21.4.2023.
- 41 Suomi-reaktori – the FinReactor for pure heat applications. 2019. Verkkoaineisto. Think Atom. <<https://thinkatom.net/clean-nuclear-district-heating-seminar/>>. Luettu 21.4.2023.
- 42 Modulaarisia pieniä kaukolämpöreaktoreita (SMR) käytetään Suomessa 2020-luvulla. 2022. Verkkoaineisto. LUT University. <<https://www.lut.fi/fi/artikkelit/modulaarisia-pienia-kaukolamporeaktoreita-smr-kaytetaan-suomessa-2020-luvulla>>. Luettu 21.4.2023.
- 43 Truong, Thinh; Suikkanen, Heikki & Hyvärinen, Juhani. 2021. Reactor Core Conceptual Design for a Scalable Heating Experimental Reactor, LUTHER. Journal of Nuclear Engineering, 2(2), 207–214.

- 44 Lappeenrantaan suunnitellaan pienydinvoimalaa. 2022. Verkkoaineisto. LUT University. <<https://www.lut.fi/fi/uutiset/lappeenrantaan-suunnitellaan-pienydinvoimalaa>>. Luettu 21.4.2023.
- 45 Jäähdytysvesi. Verkkoaineisto. Teollisuuden Voima Oyj. <<https://www.tvo.fi/vastuullisuus/ymparistovastuu/ymparistovaikutustenhallinta/jaahdytysvesi.html>>. Luettu 21.4.2023.
- 46 Selvitys pienydinreaktoreiden kaavoituksesta ja luvituksesta. 2021. Verkkoaineisto. AFRY AB. <[https://energia.fi/files/5762/ET\\_selvitys\\_pienydinreaktoreiden\\_kaavoituksesta\\_ja\\_luvituksesta\\_FINAL\\_24022021.pdf](https://energia.fi/files/5762/ET_selvitys_pienydinreaktoreiden_kaavoituksesta_ja_luvituksesta_FINAL_24022021.pdf)>. Luettu 21.4.2023.
- 47 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. 2006. Verkkoaineisto. IPCC. <[https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2\\_Volume2/V2\\_2\\_Ch2\\_Stationary\\_Combustion.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_2_Ch2_Stationary_Combustion.pdf)>. Luettu 21.4.2023.
- 48 Hae päästökertoimia. Verkkoaineisto. OpenCO2. <<https://www.openco2.net/fi/hae-paastokertoimia?sortBy=displayValue&sortOrder=desc&page=1>>. Luettu 21.4.2023.
- 49 Specific emissions of energy. Verkkoaineisto. Helen Oy. <<https://www.helen.fi/en/company/energy/energy-production/specific-emissions-of-energy-production>>. Luettu 21.4.2023.
- 50 Origin of energy. Verkkoaineisto. Helen Oy. <<https://www.helen.fi/en/company/energy/energy-production/origin-of-energy>>. Luettu 21.4.2023.
- 51 What are the safest and cleanest sources of energy? 2020. Verkkoaineisto. Our world in data. <<https://ourworldindata.org/safest-sources-of-energy>>. Luettu 21.4.2023.
- 52 Ilvonen, M. 2022. Review of SMR siting and emergency preparedness. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Research Report No. VTT-R-01612-20
- 53 Hujala, Elina; Hyvärinen, Juhani; Rintamaa, Rauno; Suikkanen, Heikki; Vi-havainen, Juhani & Wähä, Susanna. 2022. Uusien ydinenergiateknologioiden mahdollisuudet ja kehitystarpeet. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2022:43. <[https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/164168/VNTEAS\\_2022\\_43.pdf](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/164168/VNTEAS_2022_43.pdf)>.