

Antti Toreno

**KAUKOLÄMPÖVERKKOON
SOVITETUN
PIENYDINVOIMALAN
REAKTORISSA SAAVUTETTAVA
MATERIAALISÄÄSTÖ**

Opinnäytetyö

Tekniikan ammattikorkeakoulututkinto, insinööri (AMK)

Energiatekniikka



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tutkintonimike	Tekniikan ammattikorkeakoulututkinto, insinööri (AMK)
Tekijä	Antti Toreno
Työn nimi	Kaukolämpöverkkoon sovitetun pienydinvoimalan reaktorissa saavutettava materiaalisäästö
Toimeksiantaja	-
Vuosi	2023
Sivut	35 sivua, liitteitä 5 sivua
Työn ohjaaja(t)	Kalle Tarhonen

TIIVISTELMÄ

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan ydinvoiman skaalautuvuutta pienydinvoimaksi ja sen käyttömahdollisuuksia kaukolämpöverkon lämmönlähteenä. Työ sisältää teoriaa ydin- ja pienydinvoimasta sekä laskentaa Suomen nykyisistä ydinreaktoreista ja tulevaisuuden kaukolämpökäyttöisistä pienydinreaktoreista hyödyntäen ASME-standardia. Tutkimusmenetelminä käytetään kvalitatiivista analyysia, haastatteluja ja kirjallisuuskatsausta, jossa hyödynnetään lisäksi verkkomateriaalia sekä ASME III paineastiastandardia.

Teoriaosuuden tavoitteena on antaa lukijalle tiivis läpileikkaus ydinvoiman toteutukseen, tilanteeseen maailmalla ja Suomessa sekä verrata suurimpia eroavaisuuksia perinteisemmän ydinvoiman ja kaukolämpökäyttöön soveltuvan pienydinvoiman välillä. Kaukolämpökäyttöön tarkoitettu pienydinvoimala toimii verrattain alhaisessa mitoitustilassa ja paineessa, jolloin myös seinämävahvuus jää perinteisempiä ydinvoimaloita huomattavasti pienemmäksi. Myös turvallisuusjärjestelmät poikkeavat passiivisella toimintaperiaatteellaan Suomessa tällä hetkellä käytössä olevista ydinreaktoreista. Edellä mainitut lähtökohdat antoivat mahdollisuuden vertailla nykypäivän Suomen ydinvoimaa tulevaisuuden sovellutuksiin. Tutkimusongelmana oli selvittää kaukolämpökäyttöön soveltuvan pienydinreaktoripaineastian massa suhteessa tuotettavaan lämpötehoon ja verrata tuloksia jo tuotannossa oleviin reaktoreihin.

Laskentaosuudessa ASME-standardin, haastattelujen ja kirjallisuudesta sekä internetlähteistä hankittujen pohjatietojen avulla laskettiin eri reaktorityyppien minimiseinämävahvuudet, materiaalityylit ja massat reaktorimalleihin soveltuvien teräslaatuja tiheyksiä hyödyntäen. Eri reaktorityyppien lämpötehojen avulla pystyttiin myös saamaan selville reaktoripaineastioissa käytetyt materiaalikilot suhteessa lämpötehoon (kg/MW) ja eri reaktorien tuottama lämpöteho suhteessa valmistuksessa käytettyyn materiaalikiloon (kW/kg).

Vaikka pienydinreaktori on paineastian massaltaan vain prosenttiosuuksia Loviisan ja Olkiluodon vastaavista, selviää Loviisan painevesireaktorimalli vertailussa tehoerusteisesti laskettuna voittajaksi. Todellisuudessa pienydinvoimalan lämpöteho ja ydinvoimalan sähköteho eivät ole keskenään vertailukelpoisia tuotantotapojen eri hyötysuhteiden vuoksi. Ydinvoima edustaa kuitenkin lähintä vertailukohtaa tutkimuskohteena olevalle pienydinvoimalle. Johtopäätöksenä voidaan todeta, että todelliset hyödyt pienreaktoreissa saavutetaan materiaalisäästöjen sijaan tulevaisuudessa tyyppihyväksynnän, sarjatuotannon, ympäristöystävällisyyden ja nopean tuotantoasteelle saattamisen kautta.

Asiasanat: ydinvoima, pienydinvoima, reaktori, ASME-standardi

Degree title	Bachelor of Engineering
Author	Antti Toreno
Thesis title	Material savings achievable in the reactor of a small nuclear power plant connected to the district heating network.
Commissioned by	-
Time	2023
Pages	35 pages, 5 pages of appendices
Supervisor	Kalle Tarhonen

ABSTRACT

In this thesis, the objective was to find out the scalability of nuclear power to small nuclear power and the possibilities of its deployment as a heat source for a district heating network. The work includes the theory of nuclear and small nuclear power as well as the calculation of Finland's current nuclear reactors and future small nuclear reactors. The research methods consisted of literature review, interviews, and qualitative analysis.

The purpose of the theory section is to give a close overview of the implementation of nuclear power both in Finland and globally, and to compare the most significant differences between more traditional nuclear power and small nuclear power suitable for district heating. A small nuclear power plant intended for district heating operates at a comparatively low design temperature and pressure, which means that the wall thickness in the reactor is also considerably smaller. With the passive operating principle, the safety systems in small power plants also differ from the nuclear reactors currently in use in Finland. The research problem of the work was to determine the mass of a small nuclear reactor pressure vessel suitable for district heating use in relation to the heat output produced and to compare the results with reactors already in production.

In the calculation section the minimum wall strengths, material volumes and masses of different reactor types were calculated using ASME III pressure vessel standard and the densities of the steel grades suitable for the reactor models. Using the thermal outputs of different reactor types, it was also possible to determine the kilograms of material used in reactor pressure vessels in relation to the thermal output (kg/MW).

Although the pressure vessel mass of the small nuclear reactor is only a few percent of that of Loviisa and Olkiluoto, pressurized water reactor model of Loviisa was revealed to be the most efficient in the comparison based on power. However, the heat output of a small nuclear power plant and the electrical output of a nuclear power plant are not comparable due to the different efficiencies of the production methods, but still nuclear power represents the closest comparison point for small power. As a conclusion, it can be stated that in the future, instead of material savings, the real benefits of small nuclear reactors will be achieved through type approval, serial production, environmental friendliness and rapid achievement of production stage.

Keywords: nuclear power, small nuclear power, reactor, ASME-standard

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	5
2	YDINREAKTIO JA SEN HYÖDYNTÄMINEN MAAILMALLA	6
3	YDINVOIMA SUOMESSA	8
3.1	Suomessa käytettävät reaktortyypit	9
4	PIENYDINVOIMA	13
4.1	Pienydinvoimalan turvallisuus	15
4.2	Pienydinvoimalan reaktori	17
4.3	Kaukolämpöverkko osana pienydinvoimalaa	19
5	TAUSTATUTKIMUS MATERIAALIVAHVUUSVERTAILUA VARTEN	22
5.1	ASME III	24
5.2	Reaktorien materiaalivahvuusvertailu ASME III:n avulla	27
6	POHDINTA	29
7	JOHTOPÄÄTÖKSET	30
	LÄHTEET	33

LIITTEET

Liite 1. Sähköntuotanto Suomessa energialähteittäin 2000–2021

Liite 2. IAEA:n ARIS-tietokannan tekninen kuvaus LDR-50 pienreaktorista

Liite 3. Excel-laskenta reaktorien seinämävahvuuksista ja materiaolimääristä

1 JOHDANTO

Helmikuussa 2022 maailmalla alkaneiden tapahtumien jälkeen valtiot eivät enää ole voineet luottaa energiantuotannossa tarvittavan polttoaineen tai energian vapaaseen virtaamiseen yli valtionrajojen. Energiantuotannon omavaraisuuteen sekä tulevaisuuden kasvavaan sähköntarpeeseen on herätty ennäkemättömällä laajuudella.

Aiemmin sovitusta ilmastotavoitteista pidetään kiinni, mutta harvat energiantuotantomuodot pystyvät vastaamaan kasvaviin energiatarpeisiin tarvittavassa mittakaavassa samalla päästötavoitteet huomioiden. Ydinvoiman ja pienydinvoiman varaan lasketaan paljon niiden tarjotessa tehokkaan ja ilmastoystävällisen tuotantotavan lähes omavaraisesti. Uusia mahdollisuuksia ydinpolttoaineen suhteen avaa Suomen oma luonnonuraanin louhinnan aloittaminen Sotkamossa lähivuosina. Tämä johtaa lisääntyvään omavaraisuuteen ja vähentää riippuvuussuhteita aiempiin ydinpolttoaineen toimittajamaihin.

Tämä opinnäytetyö käsittelee pienydinvoiman käyttöä kaukolämmön tuottamisessa. Tarkoituksena on tutkia verrattain nopeaa ja kestävästä ratkaisusta kaukolämpöverkon lämmönlähteeksi. Teoriaosan tutkimuksessa selvitetään mitä ydinvoima on, mikä on ydinvoiman tilanne maailmanlaajuisesti, mikä on Suomen ydinvoiman tämänhetkinen tilanne, verrataan ydinvoimaa pienydinvoimaan sekä lasketaan sisäisen paineen vaikutusta aineenvahvuuteen reaktorien seinämissä. Työn tutkimusmenetelminä käytetään kvalitatiivista analyysia, haastatteluja ja kirjallisuuskatsausta. Lisäksi työssä käytetään aineistona verkkomateriaalia sekä ASME III paineastiastandardia. Valtaosa työstä keskittyy teoriaan ja sen tulkintaan, mutta työ sisältää myös paljon standardeihin perehtymistä sekä laskentaa.

Työn tavoitteena on selventää lukijalle ydin- ja pienydinvoiman tärkeimmät eroavaisuudet sekä laskea pienydinvoimalan reaktorin säästöpotentiaali paineen ja lämpötilan alenemisen mahdollistamana. Tuloksena saadaan reaktoreiden materiaalikulutus eri reaktoryyppien painetasojen välillä verraten niitä toisiinsa suoraan sekä tehoperusteisesti.

2 YDINREAKTIO JA SEN HYÖDYNTÄMINEN MAAILMALLA

Periaatteeltaan ydinvoimalaitos on lämpölaitos, jossa veden höyrystämisen lämpöenergia saadaan aikaisiksi fissiossa. Ydinreaktio, eli fissioreaktio on atomiytimien halkeamista, joka tapahtuu hallitussa ketjureaktiossa reaktoripainesäiliön sisällä sijaitsevassa reaktorisydämessä. Atomi voi hajota kahdeksi tai useammaksi ytimeksi pommitettaessa sitä neutroneilla. Atomiydinten halkeamisessa vapautuu samalla energiaa, joka ilmenee lämpönä. Prosessissa syntynyt lämpö hyödynnetään joko suoraan tai energianmuuntoprosessien kautta. (Sandberg 2004, 26.)

Käytettävä ydinpolttoaine on usein väkevöityä tai luonnonuraa, josta aina muodostuu käytettäessä plutoniumia (^{239}Pu). Plutonium käytetään osittain reaktiossa, mutta sitä jää aina jäljelle käytettyyn ydinpolttoaineeseen eli ydinjätteeseen. Aiemmin plutoniumia on tuotettu ydinaseteollisuuden tarpeisiin erillisissä plutoniumintuottoreaktoreissa, joista nykyään käytössä on enää vain pieni osa. (Sandberg 2004, 27, 42.)

Fissioreaktiota ei tule sekoittaa fuusioreaktioon, jossa kaksi atomiydintä yhtyy yhdeksi raskaammaksi atomiksi. Toimivaa kaupallista fuusiopohjaista energiantuotantoa ei ole tähän mennessä saatu kehitettyä panostuksista huolimatta. Fuusio tarjoaisi toimiessaan lähes ehtymättömän energialähteen. Lähitähemme auringon energiantuotto perustuu fuusioon. Ensimmäinen sähköntuotantoon soveltuva vaikkakin hyvin pienitehoinen, mutta toimiva fissioreaktori sen sijaan oli olemassa jo vuonna 1954 Neuvostoliitossa. (Happo 2022; Sandberg 2004, 12.)

Ydinreaktorin reaktoripainesäiliön sydän koostuu ydinpolttoainesauvoista, eli metalliputkista, joiden sisällä ydinpolttoaine on yhteen pakattuna ketjuna tablettien muodossa. Polttoainesauvoja ympäröi neutronien hidastin, joka toimii myös jäähdyttimenä. Yleisin jäähdytyn on tavallinen vesi, mutta muitakin jäähdytymiä on, kuten raskasvesireaktoreiden (D_2O), kaasujäähdytteisten-, ja sulametallijäähdytteisten reaktoreiden tapauksissa. Suurin osa maailman ydinvoimaloista on tavallisella vedellä (H_2O) toimivia, eli kevytvesireaktoreita, jotka jaetaan edelleen painevesireaktoreihin ja kiehutusvesireaktoreihin. Näitä

kahta yleisintä reaktorimallia edustavat myös Suomen ydinreaktorit. Jäähdyt-
men lisäksi ydinreaktiota ja sen tehoa säädetään säätösauvoilla, jotka absor-
boivat reaktiotehoa. Yksinkertaistetusti säätösauvojen sisään työntäminen re-
aktorisydämeen vähentää reaktiivisuutta ja ulos veto vastaavasti lisää reaktii-
visuutta. Säätösauvojen toiminta perustuu käytettävän aineen esimerkiksi
boorin kykyyn imeä itseensä ydinreaktiossa syntyviä neutroneja. Neutroneja
poistamalla hillitään ketjureaktiota ja sitä kautta myös reaktorin tehontuottoa.
(Sandberg 2004, 31, 38, 42–43.)

Ydinreaktoreita voidaan jaotella useilla eri tavoin. Selkeä jakoperuste on käyt-
tötarkoituksen mukaan jako neljään ryhmään: tehoreaktoreihin, tutkimusreak-
toreihin, isotooppituotantoreaktoreihin ja plutoniumintuottoreaktoreihin. Teho-
reaktorit tuottavat energiaa, tutkimusreaktoreiden avulla tutkitaan ja kehitetään
reaktori-, ydin- ja materiaalfysiikkaa, isotooppituotantoreaktorit tuottavat radio-
aktiivisia isotooppeja mm. lääketieteen ja teollisuuden tarpeisiin ja pluto-
niumintuottoreaktorit ovat jo aiemmin mainitun vähenevän ydinaseteollisuuden
tarpeita palvelevia. (Sandberg 2004, 41–42.)

Maailmalla kaikesta tuotetusta sähköenergiasta tuotetaan ydinvoimalla noin
11 % ja ydinenergiantuotannosta vastaa yli 400 käytössä olevaa ydinreaktoria.
EU:n alueella ydinvoima kattaa noin 25 % sähköntuotannosta. Luvut voivat
vaikuttavaa äkkiseltään pieniltä ja sitä ne ovatkin. Poliittiset päätökset ovat
ajaneet alas ydinvoimaa muun muassa Saksassa, maailmalla tapahtuneiden
ydinonnettomuuksien kaikuna (erityisesti Fukushima 2011). Alueellista vaihte-
lua maiden välillä on kuitenkin runsaasti, sillä esimerkiksi Ranskassa tuote-
taan sähköstä yli 70 % ydinvoimalla. Muita ydinvoimaa energiantuotannossa
suosivia maita ovat muun muassa Unkari, Ruotsi ja Slovakia. (Vattenfall
2023.)

Käytettävät reaktorit voidaan jakaa sukupolviin. Sukupolvista tällä hetkellä
käytössä ovat toinen, rakennettavana kolmas ja suunnittelussa tulevaisuuden
neljäs sukupolvi. Neljännen sukupolven edut aiempiin ovat entisestään paran-
tuneet hyötysuhde ja turvallisuus. Neljännen sukupolven kohdalla puhutaan
usein niin sanotuista sulasuolareaktoreista, joissa voidaan käyttää jopa ydinjä-
tettä tai ydinaseista poistettavaa plutoniumia polttoaineena. (Vattenfall 2023.)

Ilmastonmuutoksen kannalta oleellisimpana voidaan kuitenkin pitää sitä, että ”Ydinvoima on ainoa energialähde, joka on todistettavasti vähentänyt hiilidioksidipäästöjä sähköntuotannossa” (Hyvärinen 2022).

3 YDINVOIMA SUOMESSA

Suomessa ydinvoiman rakentaminen on luvanvaraista toimintaa, joka tulee hyväksyttäväksi eduskunnassa, valtioneuvostossa sekä voimalan sijaintikunnassa. Tämä on ymmärrettävää ympäristön sekä ihmisten turvallisuuden takaamiseksi. Usein nämä lupaprosessit ovat kuitenkin pitkiä byrokratian hitauden takia sekä myös siitä syystä, että jokainen ydinvoimala on ollut tähän asti yksilöllinen omine yksilöllisine järjestelmineen ja vaatinut laajaa perusteellista järjestelmäkohtaista tutkimista ennen hyväksyntää. Tutkimuskohteena olevan pienydinvoiman kohdalla tilanne on toivottavasti tulevaisuudessa eri. Pienydinvoimalla on edellytyksiä saada niin sanottu tyyppihyväksyntä, jos voimaloita valmistetaan saman periaatteen mukaisesti ilman muutoksia. Tämä mahdollistaisi uusien laitoksien sarjatuotannon sekä huomattavasti nopeamman energiantuotantovaiheeseen saattamisen. (Sandberg 2004, esipuhe.)

Suomen ydinvoiman päätarkoitus nykyisellään on yksinomaan tuottaa sähköä. Sähkön tuotanto vaatii kuitenkin lisäkomponentteja, kuten muun muassa massiivisen turbiinin sekä generaattorin, joilla valjastetaan kuuman vesihöyryn avulla luotu mekaaninen liike-energia turbiinin siipipyörästä avulla ja muunnetaan sähköksi generaattorissa. (Sandberg 2004, 26.)

Perinteisten ydinvoimaloiden energiantuotantokapasiteetilla on suuri merkitys, mutta tosi asia on, että uusien tuotantolaitosten tuotantovaiheeseen saattaminen tyhjästä on aikaa vievä urakka pitkin suunnittelu-, lupa- ja valmistusprosessineen. Esimerkiksi Olkiluoto 3:n lupaprosessi lähti vireille vuonna 2000, periaatepäätös annettiin vuonna 2002, ja rakentamislupa saatiin 2005, jolloin myös rakentaminen alkoi. Suunniteltu valmistumisvuosi oli 2009, mutta reaktori käynnistettiin kuitenkin ensimmäisen kerran vasta loppuvuodesta 2021.

Kirjoitushetkellä, tammikuussa 2023 Suomessa on täydessä tuotannossa 2 ydinvoimalaitosta, joissa on yhteensä 4 reaktoria (2 painevesireaktoria (PWR),

Loviisa 1 ja 2, sekä 2 kiehutusvesireaktoria (BWR), Olkiluoto 1 ja 2) sekä viides reaktori Olkiluoto 3 (painevesireaktori (EPR), joka on edelleen testaus ja käyttöönottovaiheessa useiden viivästyksien saattamana. Suomen neljä toiminnassa olevaa ydinvoimalaitosyksikköä ovat nettosähköteholtaan yhteensä noin 2800 MW, ja täyttävät sillä noin 30 % Suomen kokonaissähkötarpeesta. Olkiluoto 3:n saavuttaessa täyden tuotantotehonsa (1600 MW), Suomen viisi ydinreaktoria kykenevät kattamaan noin 45 % Suomen sähköenergiatarpeesta. (STUK 2022a.)

Ydinvoiman vahvuus on sen tasaisessa energiantuotannossa, jonka ansiosta se toimii Suomen sähköverkon pohjakuorman tasaisena täyttäjänä. Viime vuosina (2000–2021) ydinvoimalla tuotetun sähkön määrä Suomessa on ollut vuosittain noin 20 000 GWh luokkaa. Tarkastelujaksolla sähkön kokonaistuotanto on vaihdellut vuosittain vuoden 2004 huippulukemista (yli 80 000 GWh) laskevasuhdanteisesti päättyen vuoden 2021 tuotantolukemiin 69 300 GWh (69,3 TWh). Tuulivoiman osuus tuotannosta on moninkertaistunut viimeisten kymmenen vuoden aikana, mutta siitä huolimatta vesivoimalla tuotettiin vuonna 2021 yli kaksinkertainen määrä sähköä suhteessa tuulituotantoon. Sähkön tuotannossa kokonaisuutena suunta on oikea; fossiilisilla polttoaineilla tuotetun sähkön määrä jatkaa laskuaan ja uusiutuvilla energialähteillä tuotettiin jo 53 % Suomen sähköstä vuonna 2021. Ydinvoiman ja uusiutuvien energialähteiden osuus kokonaistuotannosta oli yhdessä 86 % vuonna 2021. Liitteestä 1 pääsee tarkastelemaan tarkemmin vuosittaisia tuotantomääriä energialähteittäin sekä niiden kehityssuuntia. (Tilastokeskus 2022.)

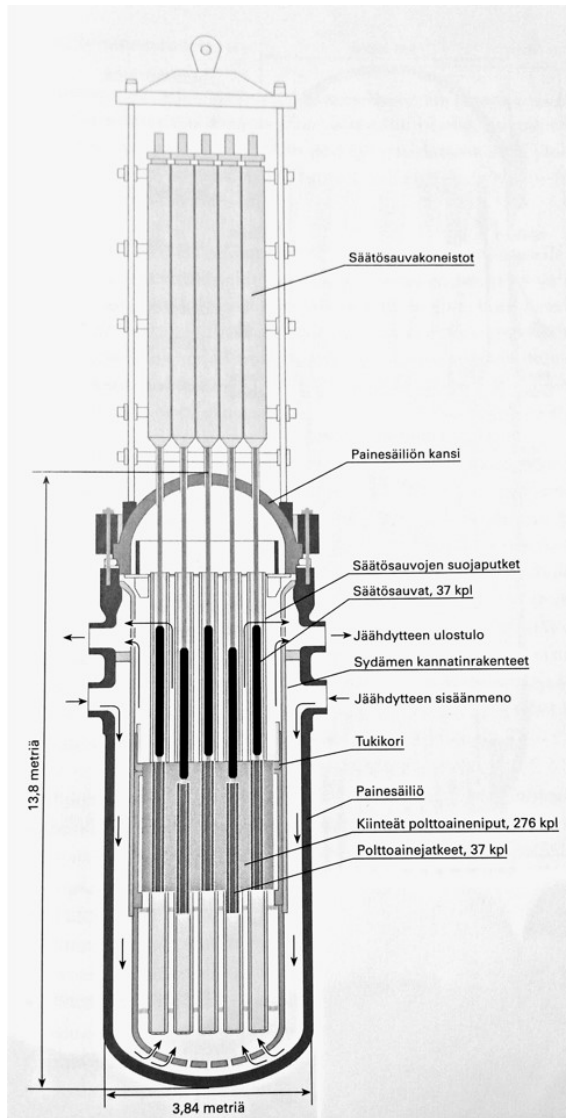
3.1 Suomessa käytettävät reaktoryypit

Yleisintä reaktoryyppiä maailmalla edustaa painevesireaktori (PWR). Loviisan ydinvoimalaitoksen reaktorit ovat myös samaisia painevesireaktoreita, joita kutsutaan myös lyhenteellä VVER Venäläisen suunnittelualkuperänsä vuoksi. Neutronien liike-energiaa säättävä hidastin, eli moderaattori on painevesilaitoksen tapauksessa tavallista vettä. Vesi on kaksitoimista ja se toimii samanaikaisesti myös jäähdytteenä. Veden etevyys hidastimena perustuu veden sisältämän vedyn ytimien tehokkuuteen neutronien hidastimena. Toisaalta veden sisältämä vety absorboi neutroneja, joka vaikuttaa reaktorin kasvukertoimeen pienentävästi. Pienentävän kasvukertoimen vuoksi polttoaineen tulee

olla väkevöitettyä uraania. Väkevöimisessä eli rikastamisessa kasvatetaan uraanin isotoopin ^{235}U osuutta suhteessa isotooppiin ^{238}U . Rikastamisesta huolimatta ^{235}U :n tavallinen osuus polttoaineesta on vain noin 3–5 % luokkaa. Polttoaine on uraanidioksidipulveria (UO_2), joka on puristettu keraamisten tablettien muotoon. Tabletit sijoitetaan tiiviisiin, jopa 4 metriä pitkiin polttoainesauvoihin. Sauvoista muodostuu neliömäinen tai kuusikulmainen hilarakenne, joka sisältää 126–250 sauvaa riippuen hilan muodosta. Loviisan painevesireaktorin hilat ovat kuusikulmaisia ja sisältävät 126 yksittäistä sauvaa nipun muodossa. Nippuja painevesilaitoksissa on tavallisesti 150–300 kappaletta. Yksittäisiä polttoainesauvoja voikin olla painevesireaktorissa jopa 75 000. (Sandberg 2004, 44.)

Painevesireaktoritekniikkaan perustuva voimalaitos sisältää primääri- ja sekundääripiirit jäähdytystä varten. Primääripiirissä on jopa kuusi pääkiertopiiriä, joiden tehtävänä on lämmönsiirto reaktorin sydänalueelta höyrystimille. Lämmönsiirron suorittavat pääkiertopumput sekä niiden kierrättämä jäähdytysvesi. Lämmön siirtyminen primääri- ja sekundääripiirin välillä tapahtuu höyrystimissä. Sekundääripiirin primääripiiriä matalampi paine johtaa veden kiehumiseen höyrystimissä. Veden kiehumisessa syntynyt höyry saatetaan turbiiniin, jossa energia muuttuu muotoaan lämpöenergiasta liike-energiaksi ja generaattorissa liike-energiasta sähköksi. Turbiinin läpi virrannut höyry saatetaan uudelleen höyrystimille, kunhan se on ensin tiivistetty takaisin vedeksi lauhduttimessa, pumpattu syöttövesisäiliöön ja siitä pumpuilla taas eteenpäin käytettäväksi höyrystimissä. (Sandberg 2004, 45.)

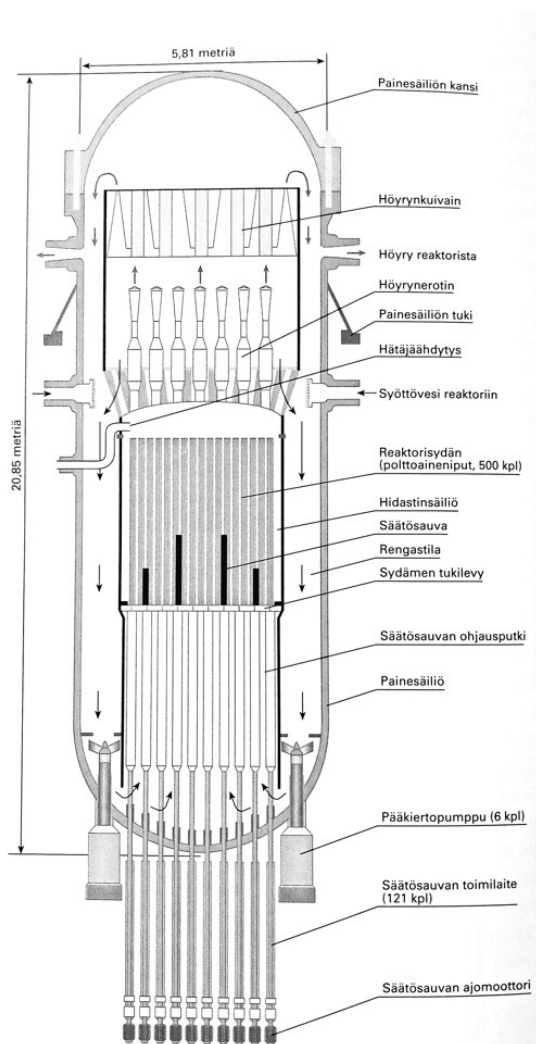
Suuri paine estää primääripiirin jäähdytettä kiehumasta. Loviisan tapauksessa tämä käyttöpaine on 12,3 MPa (123 bar) ja muualla länsimaisissa laitoksissa painetaso on yleisesti vielä korkeampi (noin 15 MPa). Paineensäädöstä vastaa sähkövastuksin, varoventtiilein ja ruiskutusjärjestelmin varustettu paineistin, jolla säädetään haluttu painetaso primääripiirissä. Reaktorin tehoa säädetään pääasiallisesti säätösauvoilla sekä jäähdyteveteen liuotetun boorin yhteisvaikutuksella. Kuvassa 1 on nähtävissä Loviisan painevesireaktorin komponentteineen sekä päämittoineen. (Sandberg 2004, 46–47.)



Kuva 1. Loviisan 1 & 2 PWR-laitoksen reaktoripainesäiliö. (Sandberg 2004, 117.)

Toinen Suomessa oleva reaktorityyppi, sekä maailman toiseksi yleisin reaktorimalli on kiehutusvesireaktori (BWR = boiling water reactor). Nimensä mukaisesti kiehutusvesireaktorissa jäähdyte kiehuu osittain mennessään reaktorin sydänosan läpi. Osittainen kiehumisen johtaa alempaan käyttöpaineseen kiehumisen estämisen jäädessä paineen avulla pienemmäksi kuin painevesireaktorin tapauksessa. Olkiluoto 1 & 2 reaktoreiden tapauksessa primääripiirin käyttöpainet on 7 MPa (70 bar). Reaktorin höyrytuotto johdetaan suoraan turbiiniin höyrytimestä ja sekundääripiiriin puuttuessa kyseisestä reaktorimallista. Kiehutusvesireaktorissa on yleensä enemmän polttoainenippuja kuin painevesireaktoreissa. Polttoaineniput ja reaktorirakenne poikkeavat muutoinkin toisistaan. Kiehutusvesireaktorin polttoainenippujen ympärillä on virtauskanava ja säätösauvat ovat reaktorin alapuolella. Säätösauvat ovat reaktorin alaosassa siitä syystä, että myös tehontuotto tapahtuu painotettuna reaktorin alaosissa

höyryntuotannon sijoittuessa reaktorin yläosiin. Näin ollen säätösauvojen tehoa pienentävä vaikutus järjestelmään on parempi sijoitettuna reaktorin alaosiin. Koska säätösauvat sijaitsevat kiehutusvesireaktorin alaosassa, tulee häiriötilanteissa turvautua hydrauliseen järjestelmään, joka työntää säätösauvat reaktorin sydämeen. Vastaavasti painevesireaktorissa magneettilukkojen vapauduttua säätösauvat laskeutuvat ylhäältä käsin. Toinen oleellinen tapa säätää reaktiivisuutta on pääkiertopumppujen virtauksen säätö. Virtauksen pienentyessä reaktiivisuus pienenee ja virtauksen kasvaessa myös reaktiivisuus kasvaa. Kiehutusvesireaktoreissa ei käytetä boorisäätöä sen ollessa epäsopiva kyseiseen reaktorimalliin, mutta booria voidaan käyttää kuitenkin toissijaisena pikasulkujärjestelmänä. Alla olevassa kuvassa 2 on nähtävissä Olkiluodon 1 & 2 kiehutusvesireaktorit päämittoineen ja reaktorin sisäisine järjestelmineen. (Sandberg 2004, 48–51.)



Kuva 2. Olkiluodon BWR-laitoksen reaktoripainesäiliö. (Sandberg 2004, 118.)

4 PIENYDINVOIMA

Tulevaisuuden pienydinvoimaa voidaan käyttää reaktoriyypin mukaan joko sähkön, lämmön, tai näiden kahden yhteistuotantoon. Opinnäytetyö keskittyy kuitenkin lämmöntuotantosovellukseen. Pienydinreaktoreista puhuttaessa puhutaan usein kirjainyhdistelmäyhenteillä SMR ja MMR, jotka tarkoittavat englannin kielestä tulevia termejä Small Modular Reactor ja Micro Modular Reactor. SMR määritellään olevan modulaarinen ydinreaktori, joka on alle 300 megawattia (MW) sähköteholtaan. MMR on reaktorin lämpöteholtaan taas luokkaa 15–30 MW (vrt. sähköteho olisi 5–10 MW:n luokkaa, eli noin kolmasosan). (Juuti 2022.)

Modulaarisuudella tarkoitetaan reaktoreiden rinnakkainkytkentämahdollisuutta, jossa esimerkiksi kahdesta 50 MW:n SMR-reaktorista saataisiin 100 MW lämpötehoa yhdistettynä. Saman esimerkin mukaisesti neljällä modulaarisella reaktorilla pystyttäisiin tuottamaan 200 MW lämpötehoa. Modulaarisuus voidaan mieltää myös moduuleiksi, joista puhuttaessa tarkoitetaan laitoksen kasaamista sarjavalmistuksena standardiosista jo tehtaalla ja mahdollisimman valmiina paikanpäälle kuljettamista. Tällä toimintatavalla saavutettaisiin merkittävää säästöä niin ajan kuin rahankin suhteen. (Juuti 2022.)

Perinteisiin ydinvoimaloihin verrattuna ydinkaukolämpölaitoksien yksikkökoko olisi paljon pienempi. Suurkaupungille toimiva yksikkökoko olisi noin 100–400 MW, mutta pienempien paikkakuntien kohdalla tehoksi riittäisi jo 25–50 MW. Näitä pienempiä kaupunkeja Suomessa on paljon. Vertailun vuoksi muistutetaan Olkiluoto 3:n lämpötehon olevan noin 4500 MW:n luokkaa. Laitoskoon mitoittaminen on optimointia, jossa perustuotanto mitoitetaan yleensä puoleen huipputehon tarpeesta. Talvikuukausina lämpöä saatetaan tarvita enemmän ja silloin sitä voidaan syöttää kaukolämpöverkkoon myös muista lähteistä tai kiertovettä on lisälämmitettävä jollakin tapaa. (LUT-yliopisto 2022.)

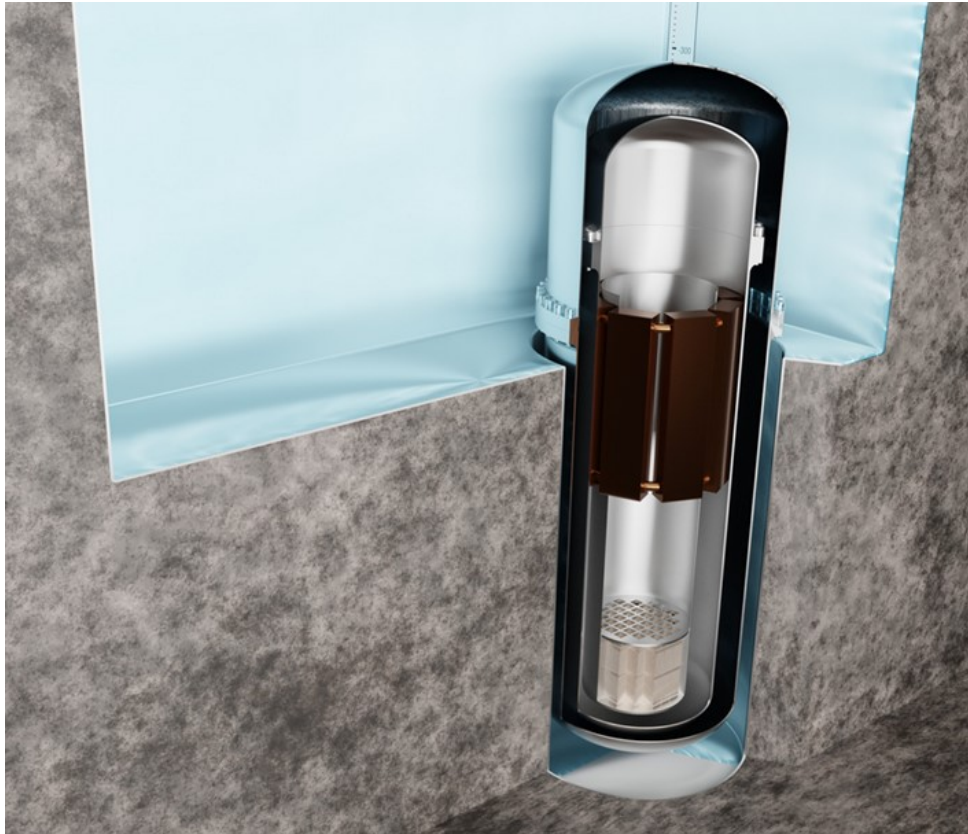
Sekä VTT (Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy), että LUT-yliopisto (Lappeenrannan teknillinen yliopisto) ovat kehittäneet omia kaukolämpökäyttöön soveltuvia pienydinreaktoreitaan. Näillä kahdella eri mallilla on eroavaisuuksia toisiinsa. Lappeenrannan LUT-yliopiston reaktorimalli (kuva 3) sijoitetaan maan alle ja on rakenteeltaan rinnastettavissa vedenkeittimeen, jossa helium-

kaasujäähdytteinen reaktori kykenee yli 500 asteen prosessilämmön tuottoon soveltuen näin ollen sähkön ja lämmön yhteistuotantoon. (LUT-yliopisto 2022.)



Kuva 3. Havainnekuva MMR-tutkimus- ja -testireaktorista (LUT-yliopisto 2022.)

Reaktorimalli, johon tutkimuksessa pääasiallisesti keskitytään laskennan kautta, on kuitenkin VTT:n malli. VTT:n LDR-50 pienydinreaktorimallin kehitystyö on alkanut helmikuussa 2020 ja on jo johtanut muun muassa jäähdytysmallille myönnettyyn patenttiin, jossa kaksi sisäkkäistä paineastiaa muodostavat reaktorimoduulin. Sisäkkäisten paineastioiden välissä olevassa tilassa on vettä ja tyhjää tilaa vedelle höyrystyä. Häiriötilanteessa reaktorin ylikuumentessa välikerroksen vesi kiehuu ja siirtää lämpöä reaktorista pois. Järjestelmän hienous on sen yksinkertaisuudessa; siinä ei ole liikkuvia osia, jotka voisivat jumitua haitata reaktorin toimintaa. Kuvassa 4 on havaittavissa LDR-50 reaktorimallin ulkoasu. (VTT 2021.)



Kuva 4. Havainnekuva VTT:n kehittämästä LDR-50 pienreaktorista. (VTT 2021.)

Edellä esitetyt kaksi eri reaktorimallia eivät Hyvärisen mukaan kilpaile keskenään, vaan pikemminkin täydentävät toistensa tutkimustyötä ja pyrkivät yhteiseen päämäärään Suomen energiatuotannon hyväksi. LUT-yliopiston reaktorimalli pyritään saamaan valmiiksi sillä ajatusmallilla, että siitä saatavaa tietoa voisi myöhemmin hyödyntää VTT:n mallissa. (Hyvärinen 2023.)

4.1 Pienydinvoimalan turvallisuus

Perinteisesti ydinvoimalaitoksen turvallisuusjärjestelmät perustuvat automaatiojärjestelmän perässä oleviin seurattaviin suureisiin, joiden ennalta asetetut raja-arvot eivät saa ylittyä. Kaikkien ydinvoimalaitoksien turvallisuustoiminnot voidaan jakaa kolmeen tärkeimpään osa-alueeseen, jotka ovat: reaktorin pysäyttäminen ja alikriittisenä pito, pysäytetyn reaktorin jälkilämmön siirto pois reaktorista (lämpönieluun, eli esimerkiksi mereen tai pienydinvoiman tapauksessa kaukolämpökiertoon tai reaktioaltaaseen) sekä radioaktiivisten ainesosien leviämisen esto. (Sandberg 2004, 56, 67–69.)

Hyvällä suunnittelulla, todennäköisyyspohjaisella analyysillä sekä arviointi- ja luokittelumenettelyillä pystytään välttämään suuronnettomuudet. Yleisimmin

suuronnettomuudet johtuvat reaktiivisuuden hallinnan menettämisestä, joka pahimmillaan voisi johtaa ydinpolttoaineen äkilliseen kuumentumiseen ja tottaisiin pirstoutumiseen. (Sandberg 2004, 39, 55, 96–97.)

Onnettomuustilanteessa reaktorisydän tulisi pystyä sulkemaan pikaisesti. Tämä tapahtuu perinteisten ydinvoimaloiden kohdalla säätösauvojen avulla, jotka reaktorimallin mukaan toimivat joko ylhäältä käsin painovoimaisesti tiputettavana sähkömagneettisen lukon avauduttua, tai alhaalta käsin paineilma-
varaisesti sisään työntyen. Mahdollisen, mutta epätodennäköisen säätösauvojen jumiutumisen varalta on myös olemassa reaktorisydämeen pumpattava booriliuos, joka kykenee myös pysäyttämään reaktorin neutroneja absorboivalla ominaisuudellaan. (Sandberg 2004, 58.)

Turvallisuusjärjestelmät voivat olla joko onnettomuutta ehkäiseviä tai seurauksia lieventäviä. Järjestelmät voidaan myös jakaa passiivisiin tai aktiivisiin. Esimerkki passiivisesta järjestelmästä on itse rakennus seinämävahvuuksineen, putkisto, automaatio- ja sähköjärjestelmä tai ilmastointijärjestelmä. Aktiivinen järjestelmä taas voi olla esimerkiksi pää- tai apusyöttövesipumppu tai venttiili, joka tarvitsee ulkoisen tukijärjestelmän toimiakseen, eli sähköä laitoksen ulkopuolelta tai dieselgeneraattorin. Aktiiviset järjestelmät ovat yleisemmin kahdennettuja eli järjestelmän toiminta on varmistettu kaikissa tilanteissa varajärjestelmin. (Sandberg 2004, 55–56.)

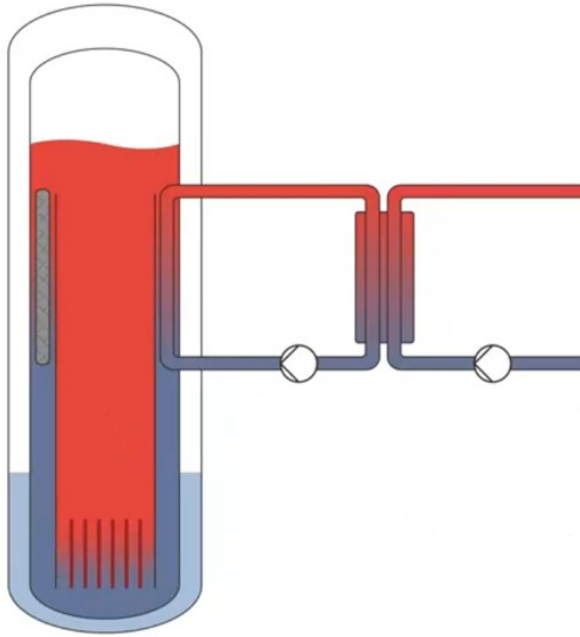
Vaikka ydinreaktio olisi saatu pysäytettyä aiemmin mainittujen säätösauvojen avulla, syntyy käytön aikana polttoaineeseen kertyneestä radioaktiivisesta fissiotuotteesta jälkilämpöä. Tämä jälkilämpö pitää saada poistettua reaktorisydäimestä pumppaamalla jäähdytysvettä syöttövesipumppujen avulla. Mitä suurempi ydinvoimalaitoksen tuotettava teho on, sitä suurempi on myös jälkilämpö ja tarvittava jäähdytyksen määrä. Pienydinvoiman eduksi tässä tapauksessa on pieni ydinpolttoaineen määrä sekä pieni tehontuotto ja sitä kautta myös pieni jälkilämpö. Matalampi jälkilämpö voidaan käsitellä ilman aktiivisia jäähdytysjärjestelmiä käyttämällä kaukolämpöverkoston kiertovettä luonnonkiertoperiaatteella (passiivinen järjestelmä) absorboimaan syntynyttä jälkilämpöä hätätilanteissa. Vaikka pienydinvoimalaitos olisi täysin sähkötön, se pys-

tyisi silti ajamaan itsensä turvalliseen tilaan luonnonkierron sekä lämmönvaihtimien avulla siirtäen ylimääräisen lämmön laitoksen ulkopuolelle. (Leppänen 2018; Sandberg 2004, 58.)

Passiivinen järjestelmä on aktiivista helpompi, yksinkertaisempi ja halvempi suunnitella vähäisempien komponenttinsa puolesta. Pienydinvoimalan tapauksessa reaktoripainesäiliö itsessään on todennäköisesti tärkein yksittäinen turvallisuustekijä onnettomuustilanteessa. Reaktoripainesäiliön rikkoutumisen varalle ei ole olemassa vara- tai apujärjestelmiä, vaan sen tulee yksinkertaisesti kestää riittävä sisäinen paine sekä säteilyn vaikutus. Suunniteltaessa reaktoripainesäiliötä, tulee siinä huomioida riittävä aineenvahvuus varmuuskerroimen kera. Juuri näistä syistä reaktoripainesäiliö on otettu tarkemman tarkastelun alaiseksi ja sitä käsitellään suuressa osassa tätä tutkimustyötä ja myös myöhemmissä laskentaosuuksissa. (Sandberg 2004, 116.)

4.2 Pienydinvoimalan reaktori

Kuvan 5 reaktorin alaosassa sijaitseva reaktorisydän lämmittää ympäröivää vettä, joka kohoaa reaktorin yläosiin. Reaktorin reunalla olevat lämmönsiirtimet siirtävät lämpöä kaukolämpöverkon suuntaan. Kierrossa lämpönsä luovuttanut jäähtynyt vesi laskee kohti reaktorin pohjaa. Kyseistä ilmiötä kutsutaan luonnonkierroksi, jonka termodynamiikan lait mahdollistavat. Kuvassa 5 on nähtävissä myös kappaleessa 4 mainittu patentoitu jäähdytysmalli, jossa on vedellä ja ilmalla täytetty kiehuessaan lämpöä poissiirtävä reaktorimoduuli, joka koostuu kahdesta erillisestä kerroksesta. Kuvan reaktori sijaitsee vesialtaassa, johon mahdollisessa häiriötilanteissa syntyvä ylimääräinen lämpö joutuisi uloimman kuoren välityksellä välikerroksessa sijaitsevan veden kiehuessa. Mainittu häiriötilanne voisi johtua siitä, jos lämmönvaihdin ei syystä tai toisesta kykenisi siirtämään syntyvää lämpöä eteenpäin kaukolämpöverkkoon. (VTT 2022.)



Kuva 5. VTT:n havainnekuva pienydinvoimalan kaukolämpöreaktorista. (Juuti 2022.)

Polttoaineena reaktorisydämen polttoainenipussa on samainen matalasti väkevöity uraani, kuin perinteisissä ydinvoimalaitoksissa. Muissa pienydinvoimanhankkeissa on esitetty myös käytettävän polttoaineena kierrätettyä ydinpolttoainetta tai nestemäistä ydinpolttoainetta, joka on osana sulaa suolaa. Kuvassa 6 on nähtävissä perinteistä polttoainenippua huomattavasti pienempi kokoluokka. Kuvan 6 reaktoripolttoainenippujen ydinjätteen määrä vastaa Olkiluoto 3:n ydinjätteen määrää suhteessa 1/86, eli Olkiluoto 3:n reaktori tuottaa yksin yhtä paljon ydinjätettä vuositasona, kuin 86 pienydinreaktoria. (Juuti 2022.)



Kuva 6. VTT:n pienreaktorin polttoainenippu kokoverailussa jakkaran kanssa. (VTT 2022.)

4.3 Kaukolämpöverkko osana pienydinvoimalaa

Noin puolet suomalaisten kotien lämmöstä tuotetaan kaukolämmöllä. Kaukolämpö onkin Suomen yleisin lämmitysmuoto. Toimiva ja valmis kaukolämpöverkko löytyy jo 166:sta Suomen kunnasta (Motiva 2022). Pienydinvoimalan yhteensovittaminen kaukolämpöverkkoon yksinkertaistaa ja helpottaa asioita sähköntuotannon vaatimien lisäkomponenttien jäädessä pois yhtälöstä. Komponenttien määrä vähenee sekä nostettava veden lämpötila laskee suhteessa sähköntuotannon vaatimukseen. Sähköntuotantoa varten ydinvoiman reaktoriveden tulisi olla noin 3–4 kertaa kuumempaa kuin kaukolämpökäytössä. Pienydinvoiman kaukolämpöjärjestelmän kokonaishyötysuhde paranee siksi, ettei syntyvää energiaa tarvitse muuttaa muodosta toiseen, kuten sähköntuotannon tapauksessa. Sähkön tuotannossa lämpöenergia muutetaan liike-energiaksi ja siitä edelleen sähköenergiaksi generaattorin avulla. Yleisesti ottaen tulevaisuuden sähköntuotantoon soveltuvien ydinreaktorien lämpötilat nousevat todennäköisesti aina vain korkeammiksi haettaessa tuotannolle parempaa hyötysuhdetta.

Kaukolämpöverkon veden lämpötilavaatimus vaihtelee vuodenajan mukaan 65–120°C välillä. Tässä lämpötilassa tulee huomioida vielä lämmönvaihtimen toiminnalliset vaatimukset sekä lämpöhäviöt, jotka hieman korottavat tarvittavaa syöttölämpötilaa maksimissaan 160°C:een. Siirrettäessä lämpöä primääripiiristä välipiirin kautta kaukolämpöverkkoon, tarvitsevat lämmönvaihtimet toimiakseen lämpötilaeron. Ensimmäinen lämmönvaihdin on reaktorin seinämässä primääripiirin ja välipiirin välissä, ja toinen lämmönvaihdin sijaitsee suljetun välipiirin ja kaukolämpöverkon välissä. Jäähdynttä kaukolämpöverkoston paluuvettä pidetään normaalitilassa liikkeellä sähköohjattujen pumppujen avulla, jotka sijaitsevat kaukolämpöverkon sekä välipiirin paluupuolilla. Tällä järjestelyllä varmistetaan se, ettei radioaktiivinen primääripiirin vesi ole kosketuksissa kaukolämpöverkon kiertoveden kanssa. (Leppänen 2018).

Pienydinvoimalan toimintaan saattamiseksi se tulee saada liitettyä kaukolämpöverkoston. Tästä syystä laitoksen fyysinen sijainti tulee olla lähellä asuin-keskittyymiä jo olemassa oleviin kaukolämpöverkostoniin liitettynä. Näin ollen ydinenergialainsäädäntöä tulee muuttaa ennen pienydinvoimatuotantoa. Jotta

pienydinvoimaa voidaan tulevaisuudessa toteuttaa osana kaukolämpöverkkoa, tulee ihmisten asenteita ja lainsäädäntöä pienydinvoimaa kohtaan saada positiivisemmaksi. Yksi tämän tutkimustyön tehtävistä onkin saada lisää tietoisuutta ja ymmärrystä ydinvoimaa kohtaan ja sitä kautta myös hyväksyvämpää asennetta mahdollisesti tulevaisuudessa asutuksien läheisyyteen sijoitettaviin pienydinvoimaloihin.

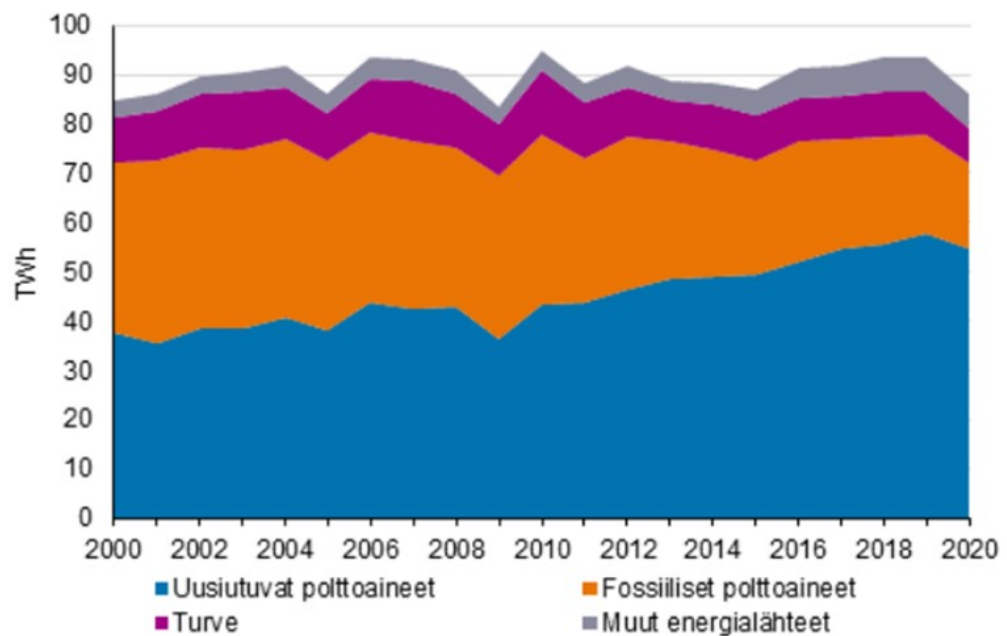
Aiemmin perinteisten ydinvoimaloiden sijaintia suhteessa asumukseen on säädelty tarkasti laitosalueen ja suojavyöhykealueen määritelmien avulla. Määritelmässä laitosaluetta on alue, joka on kilometrin säteellä laitoksesta ja sisältää vain laitoksen toimintoja. Suojavyöhyke ulottuu noin viiden kilometrin säteelle laitoksesta ja rajoittaa maankäyttöä ydinvoimalaitoksen turvallisuustarpeet huomioiden asumistiheysrajoituksin. Suojavyöhyke olisi luonnollisesti hyvin hankala toteuttaa voimassa olevin säädöksin esimerkiksi suurkaupungin sydämessä tulevaisuuden kaukolämpökäyttöön sovitettujen pienydinvoimaloiden kohdalla. VTT:n ydinenergian tutkimusalueen vetäjän Tommi Nymanin mukaan kaukopienydinvoiman kohdalla suojavyöhykkeeksi riittäisi noin 200 metriä suuntaansa ja pahimmillaankin onnettomuuden sattuessa radioaktiiviset päästöt olisivat noin 2 % luokkaa verraten Olkiluoto 3:n reaktoriin. (Merimaa 2023; STUK 2022c.)

Nykyiset jo olemassa olevat ydinvoimalat sijaitsevat rannikkoalueilla, jolloin turvaetäisyyden saavuttaminen väestökeskittymiin on melko helposti saavutettavissa. Meren läheisyys antaa myös ehtymättömän lähteen lauhdutinvedelle. Kuivilla alueilla maailmalla saatetaan jopa käyttää erillisiä jäähdytystorneja tarvittavan jäähdytysveden takaamiseksi, mikä lisää kustannuksia.

Pienydinvoiman kohdalla edellä mainitut seikat olisivat toisin. Pienydinvoimaloita sijaittisi pitkin sisämaata ja prosessissa ei käytettäisi erillistä jäähdytysvettä, vaan vain kaukolämpöverkostossa kiertävää vettä. Järjestelmän asetelu voitaisiin periaatteessa mieltää niin sanotuksi suljetuksi systeemiksi, jossa vain energia kulkee systeemin ja ympäristön välillä.

Päästöt ja niiden vaikutus ilmastonmuutokseen ovat aina olleet tärkeässä asemassa puhuttaessa energiantuotannosta. Kuvan 7 perusteella voidaan todeta, kuinka paljon on vielä viime vuosina käytetty ilmastonmuutoksen kannalta

epäsuotuisia energialähteitä kaukolämmön tuotannossa. Kuvan uusiutuvat polttoaineet ovat lämpölaitoksien (ei ydinvoimalaitoksien) tapauksissa puupohjaista tai kotitalousjätettä ja siten hiilidioksidia polton kautta lisäävää. Myös kivihiiltä käytetään lämpölaitoksien energialähteenä, vaikkakin vähenevin määrin. Suomi on sitoutunut luopumaan kivihiilestä vuonna 2029, eli melko tiukalla aikataululla. Monet suunnitelmat laskevat biomassan varaan fossiilisten polttoaineiden korvaajana. Korvaamalla biomassalla pienydinvoimalla, pystytään biomassaa vapauttamaan tulevaisuudessa muuhun arvokkaaseen käyttöön, kuten öljyn korvaajaksi liikennepolttoainekäytössä ja teollisuudessa. (Tilastokeskus 2021; VTT 2020; Motiva 2022.)



Kuva 7. Kaukolämmön ja teollisuuslämmön tuotanto polttoaineittain 2000–2020. (Tilastokeskus 2021.)

Joidenkin laskelmien mukaan kaukolämmön saattamiseksi täysin fossiilittomaksi tarvittaisiin 20–50 MW pienydinvoimaloita jopa noin 100 kappaletta pitkin Suomen maata. (LUT-yliopisto 2021.)

Pelkän sähkön tuotannossa sen sijaan on päästy valtakunnallisella tasolla suuremmissa määrin puhtaiden uusiutuvien energialähteiden kuten tuulivoiman pariin. (Motiva 2022.)

5 TAUSTATUTKIMUS MATERIAALIVAHVUUSVERTAILUA VARTEN

Sisäinen paine, joka estää veden kiehumisen tietyssä lämpötilassa ohjaa reaktoripaineastioiden seinämävahvuutta. Perinteisen ydinvoimalan tapauksessa veden lämpötilan tulee olla mahdollisimman korkea, jotta veden entalpia olisi suuri ja tuotannon hyötysuhde korkea. Tämän vuoksi painetasot, joilla estetään vettä kiehumasta, nousevat samanaikaisesti. Suomen painevesireaktorit (Loviisa 1 ja 2) on mitoitettu 13,7 MPa (137 bar) painetasoon, käyttöpaineen jäädessä 12,3 MPa (123 bar) tasolle (STUK 2022b, 48).

Reaktorin painetaso riippuu reaktorisydämen suunnittelusta ja todellisuudessa reaktorin painetaso vaihtelee reaktorin sisällä käyttölämpötilan mukaan, eli reaktori ei toimi vakioaineessa. Kaukolämpökäyttöön yksinomaan tarkoitetun pienydinvoimalan reaktorin painetaso on joissakin suunnittelumalleissa jäänyt niinkin alhaiseksi kuin 3 bar. Reaktorin paineastian seinämien mitoitus tehdään kuitenkin 16 bar (1,6 MPa) mukaan, jolloin se vastaa kaukolämpöverkon maksimipainetta ja on turvallista sanoa, että se kestää. Painetasona 1,6 MPa on reaktorin suunnittelupaine, jolloin se sisältää myös veden hydrostaattisen paineen. (Leppänen 2023.)

Jos tahtotilana kuitenkin on, että reaktorin vesi ei kiehu, joka olisi suotavaa kaukolämpöreaktorissa (Hyvärinen 2023) niin silloin reaktorin sisäisen paineen tulisi olla vähintään 6,19 bar luokkaa, jolloin vesi pysyisi kokonaan nestemäisessä muodossa 160 °C mitoitustilassa (Veden ja höyryn ominaisuuksien laskuri (Wischnewski 2023)). Normaalityössä reaktoria ajetaan 0,5–0,8 MPa:n eli 5–8 bar käyttöpainetasossa. (IAEA:n ARIS-tietokannan tekninen kuvaus, liite 1).

Patentoidun väliseinärakenteen tapauksessa uloimman reaktorin seinämäkerroksen voi mieltää erilliseksi turvarakenteeksi. IAEA:n (Kansainvälinen atomienergiajärjestö) luokituksessa tämä on passiivinen järjestelmä kategoriassa B, koska järjestelmä hyödyntää höyrystyvän ylöspäin kohoavan veden avulla tapahtuvaa lämmönsiirtoa, joka tapahtuu ilman ulkoista signaalia. Suojarakennus, reaktorirakennus tai reaktoripainesäiliö perinteisempien ydinvoimaloiden tapauksissa lukeutuu taas kategoriaan A, jossa suojausmekanismi perustuu pelkästään rakenteeseen ilman virtaavaa ainetta. Pienydinvoiman kohdalla itse

suojarakennus ei näyttele yhtä suurta roolia kuin ydinvoiman perinteisemmässä muodossa, vaan on mielletävissä rakenteellisesti enemmänkin pelkäksi teollisuusrakennukseksi. (Telkkä 2010, 6.)

Laskennan helpottamiseksi reaktoripainesäiliöt yleistetään suoriksi sylintereiksi, joiden molemmissa päissä on puolipallon muoto. Todellisuudessa reaktoripainesäiliöt eivät ole muodoiltaan symmetrisiä ja sisältävät mallista ja käyttötarkoituksesta riippuen erinäisen määrän yhteitä. Vertailumielessä yhteiden lisääminen on kuitenkin jätetty pois sen tuodessa hyvin vähän lisäarvoa kokonaismateriaalikulutusta silmällä pitäen. Reaktorien paineastioiden vertailua varten tuli selvittää nykyisten korkeapaineisten reaktoreiden materiaali. Oppikirjasta saatavan tiedon perusteella materiaalina kevytvesireaktoreiden painesäiliöissä toimii ferriittinen teräs (Sandberg 2004, 116).

Reaktoreiden paineestioissa käytettyjä teräslaatuja ASME- tai EN-koodeja oli hankala löytää kirjallisuudesta, mikä voi osaltaan johtua esimerkiksi Loviisan reaktoreiden neuvostoliittolaisesta alkuperästä. LUT-yliopiston Energiatekniikan professorin Juhani Hyvärisen haastattelun perusteella reaktorit ovat niukkaseosteisia ferriittisiä teräslaatuja, kuten SA508, ja niissä on ruostumaton austeniittinen sisäpinnoite, kuten AISI 316 (EN 1.4401). Niukkaseosteiset teräslaadut ovat selvästi lujempia kuin austeniittiset teräkset, jolloin isoissa paineissa (yli 15 MPa) on käytettävä kerrosrakennetta. Ferriittiset teräkset haurastuvat reaktorin sydänalueen kohdalta neutronisäteilyn vaikutuksesta, eivätkä kestä primääriveden aiheuttamaa korroosiota. Edellä mainituitten syiden vuoksi SA508 on pinnoitettu AISI 316:lla. (Hyvärinen 2023.)

Pinnoitteen paksuuden vaikutusta kokonaisuine vahvuuteen ei oteta huomioon tämän työn laskelmissa. Säteilyturvakeskus (STUK) ohjeistaa sisäpuolisen austeniittisen pinnoitteen sisällyttämistä termisiin kuormitus- ja jännitysanalyysiin vasta kun pinnoite ylittää 10 % arvon seinämän kokonaispaksuudesta (STUK 2013, 12). Kaikkien tutkimuksessa mainittujen olemassa olevien reaktoreiden tapauksissa pinnoitteen osuus jää alle mainitun 10 % ohjearvon seinämien kokonaispaksuuksissa. On kuitenkin hyvä tiedostaa pinnoitteen olemassaolo ja osaltaan sen rakenteellista kestävyyttä lisäävä vaikutus. Reaktoripainesäiliöiden mitat laskentaa varten saadaan kuvista 1 ja 2.

VTT:n tutkimusprofessori Jaakko Leppäsen haastattelun perusteella kaukolämpöreaktorin paineastian voi oletetusti tehdä täysin austeniittisena (AISI 316) koska suunnittelupaineen ei tarvitse ylittää kaukolämpöverkon maksimipainetta 1,6 MPa (16 bar). Reaktoripaineastia mitoitetaan tällöin myös korkeimman painetason, eli 16 bar mukaan. Kaukolämpöreaktorin paineastian seinämävahvuuden sekä kokonaisuutena laskentaan tarvittavat mitat saatiin liitteestä 2. (IAEA:n ARIS-tietokannan teknisestä kuvauksesta). (Leppänen 2023.)

5.1 ASME III

Standardien avulla pyritään varmistamaan, että teknisten laitteiden ohjeet ja vaatimukset ovat yhdenmukaiset sekä käyttäjien että suunnittelijoiden ja valmistajien välillä. Standardi voi määritellä muun muassa turvallisuuteen ja tehokkuuteen liittyviä vaatimuksia ja näin ollen edistää näiden toteutumista suurelle joukolle tekniikan alan toimijoita. Suomessa eniten käytetty SFS-EN-standardi on yksi monista standardeista maailmassa ja kattaa koko Euroopan. (Plekh 2020, 5–7.)

Toinen tunnettu standardi on American Society of Mechanical Engineers, joka tunnetaan paremmin nimellä ASME. ASME:n juuret juontavat höyrykattiloiden käyttöturvallisuuden parantamiseen niiden yleistyttyä 1800-luvulla. Tällöin höyrykattiloiden valmistusta ja käyttöä ei vielä säädelty turvallisuussäädöksin, mikä johti moniin onnettomuuksiin. ASME perustettiin voittoa tavoittelemattomana järjestönä vuonna 1880 ja on nykyään suuri kansainvälinen yli 140 maan kattava standardointiorganisaatio lukuisine alaosastoineen. Vuonna 1915 ASME julkaisi Boiler & Pressure Vessel Code:n (BPVC:n) joka on kattiloita ja paineastioita koskeva standardikokoelma. BPVC on edelleen käytössä ja myös osana lakia Yhdysvalloissa ja Kanadassa. Kahden vuoden välein päivitettävä BPVC jakautuu osa-alueisiin, jotka sisältävät tietoa voimakattiloista, lämmityskattiloista, paineastioista, kuljetussäiliöistä sekä tutkimusaiheena olevista ydinteknisistä laitteista materiaaleineen ja valmistus- ja testausprosesseineen. (Plekh 2020, 5–7.)

Ydinvoiman yhteydessä käytettävät paineastiat ja määräykset niitä kohtaan ovat osa ajan saatossa kokemuksen kautta saatua viisautta. Olemassa olevia

reaktoripaineastioita, sekä niiden rakenteellista kestävyttä on tarkasteltu myös vanhimpien toiminnassa olevien ydinvoimaloiden kohdalla. Tietty metallien lisäaineet (kupari, nikkeli ja fosfori) reagoivat ajan saatossa ydinpoltoainetankojen läheisyydessä varsinkin paineastian keskivaiheilla haurastuttaen metallia. Tämä seikka tulee huomioida myös hitsausaumojen osalta varsinkin lähellä polttoainetankoja. ASME:n osa II sallii useita teräslaatuja käytettävän ydinvoimapaineastioissa, mutta käytännössä metallilta vaadittavat ominaisuudet, kuten säteilykestävyys ja murtolujuus rajaavat materiaalivalinnat nykyisin kolmeen eri vaihtoehtoon: SA-533 (luokka B, taso 1), SA-508 (taso 2) sekä SA-508 (taso 3). (IAEA 2009, 12.)

ASME:n osa III on päivitetty versio, joka käsittelee ydinvoimakomponenttien rakentamista koskevaa säännöstöä sisältäen kappaleet 1,2,3 ja 5, sekä näiden alakappaleet. Tutkimuksessa käytettävät kaavat 1 ja 2, joiden avulla reaktoripainesäiliöiden minimi mitoitukseenämävahvuudet lasketaan, löytyvät ASME III:n kappaleesta NB-3324.1 (ASME III, 41.)

$$t = \frac{PR}{S_m - 0.5P} \quad (1)$$

$$t = \frac{PR_0}{S_m + 0.5P} \quad (2)$$

Jossa

P	Mitoituspaine	[MPa]
R	Reaktoripainesäiliön säde (sisämitta)	[mm]
R ₀	Reaktoripainesäiliön säde (ulkomitta)	[mm]
S _m	Design stress intensity value (dsi) *	[MPa]
t	Reaktoripainesäiliön minimiseinämävahvuus	[mm]

* sallittu materiaalikohtainen jännitysarvo (ASME II:n osa D, alakappale 1, taulukot 2A ja 2B.)

Kuten kaavat 1 ja 2 osoittavat, laskentaa varten tuli selvittää reaktoripainesäiliöiden mitoituspaineet sekä säteet joko seinämävahvuuksien kera tai ilman. Lisäksi tuli selvittää materiaalien SA-508 ja AISI 316 sallitut jännitykset ASME II:n taulukoinneista suhteutettuna suunnittelulämpötilaan. Varmuuskertoimia ei tarvinnut huomioida erikseen, koska ne on jo otettu huomioon sallituissa jännityksissä, jotka löytyivät ASME II:n sivuilta 306 (Line 2, Forgings, SA-508) ja 326 (Line 7, Plate, SA-240, Grade 316). Kyseisillä riveillä esiintyvät teräslaadut valikoituivat muiden joukosta työstömenetelmiensä sekä luokkasoveltuvuuksiensa ansiosta.

Niiden sallittujen jännityksien osalta, jotka eivät asettuneet suoraan mitoitustilalämpötilan ylärajalle (SA-508, 160°C sekä SA-240, 160°C) sallitut jännitykset interpoloitiin tarkkaan lukuarvoon halutun arvon jäädessä kahden lämpötilaraja-arvon välille.

Interpoloinnin esimerkkinä ASME II:n taulukon sivulla 326 rivillä 7 (SA-240), 138 MPa:n sallitun jännityksen edustaessa 150°C mitoitustilalämpötilan ylärajaa ja 134 MPa:n sallitun jännityksen edustaessa 200°C mitoitustilalämpötilan ylärajaa, tarkka interpoloitu sallittu jännitys saatiin suhteuttamalla 4 MPa:n muutos haluttuun 160°C mitoitustilalämpötilan ylärajaan. 50°C lämpötilamuutoksen edustaessa 4 MPa:ta, tällöin $4/5=0,8$ MPa:n muutos tapahtuu aina 10°C aikana, eli 160°C mitoitustilalämpötila rajaa sallitun jännityksen **137,2** MPa:han. Samaa laskentaperiaatetta hyödynnettiin myös SA-508:n kohdalla, jolloin sallittu jännitys asettui 190,6 MPa:han 160°C lämpötilassa.

Reaktoripaineastioiden mitoituspaineiden, suunnittelulämpötilojen sekä lieriö-osuuksien säteiden löytyessä kirjallisuudesta sekä muista luotettavista lähteistä (liite 2; Sandberg 2004, 117–118; STUK 2022b, 48; TVO 2007, 12) pysyttiin reaktoripaineastioiden minimiseinämvahvuus lopulta laskemaan kaavoilla 1 ja 2.

5.2 Reaktorien materiaalivahvuusvertailu ASME III:n avulla

Kaavojen 1 ja 2, sekä aiemmassa kappaleessa mainittujen lähteiden avulla saatiin laskettua eri reaktoripainesäiliöiden minimiseinämävahvuudet sekä suoran sylinterin ja pallon tilavuuksien kaavoilla (kaavat 3 ja 4) myös materiaalilavuudet (m³) paineastioissa.

$$V = \pi r^2 h \quad (3)$$

$$V = \frac{4\pi r^3}{3} \quad (4)$$

Reaktoripaineastioiden materiaalilavuuslaskennassa hyödynnettiin pelkistettyä reaktorin muotoa, jossa suoran sylinterin molemmissa päissä on puolipallon muoto. Yksittäisen reaktorin materiaalilavuus saatiin tällöin laskettua yhdistämällä suoran sylinterin ja pallon tilavuus sekä vähentämällä tästä tuloksesta laskennassa selvitetyn minimiseinämävahvuuden verran pienemillä halkaisijoilla varustettu suora sylinteri ja pallo.

Kun laskennassa huomioitiin myös SA-508:n sekä SA-240:n tiheydet (7850 kg/m³ ja 8000 kg/m³), saatiin selvitettyä paineastioiden massat kilogrammoissa. Huomionarvoista oli SA-240 on rinnastettavuus kemiallisen koostumuksesta puolesta EN-standardin EN 1.4401:een (sama kuin AISI 316). Taulukossa 1 on listattuna laskennan tuloksia Loviisan reaktoreiden, Olkiluodon reaktoreiden sekä pienydinreaktorin osalta (pienydinreaktori on laskettu kahdella eri materiaalivaihtoehdolla vertailun vuoksi). Tutkimuksen aloitusvaiheessa Olkiluoto 3 ei ollut vielä säännöllisessä tuotannossa ja rajautui osittain siksi tutkimuksen ulkopuolelle. (Teräsrakenneyhdistys 2017, 24; Tutkimusportaali 2015.)

Taulukko 1. Reaktorivertailu perustuen ASME III:n avulla saatuihin minimiseinämävahvuuksiin.

REAKTORIN	Loviisa 1 tai 2	Olkiluoto 1 tai 2	LDR-50 (1)	LDR-50 (2)	
Materiaali	SA-508	SA-508	SA-508	SA-240 (AISI 316)	
Materiaalin interpoloitu sallittu jännitys	188	188	190,6	137,2	[MPa]
Suunnittelu- lämpötila	300	300	160	160	[°C]
Mitoituspaine	13,7	8,5	1,6	1,6	[MPa]
Korkeus (ulkomitta)	13 800	20 850	8 023	8 032	[mm]
Korkeus (sisämitta)	13 530	20 593	8 000	8 000	[mm]
Leveys (ulkomitta)	3 840	5 810	2 723	2 732	[mm]
Leveys (sisämitta)	3 570	5 553	2 700	2 700	[mm]
Minimi seinämäpaksuus	135	128	11,4	15,8	[mm]
Materiaalin tilavuus	14,27	25,16	0,64	0,89	[m ³]
Materiaalin tiheys	7 850	7850	7850	8000	[kg/m ³]
Massa	112 038	197 544	5 038	7 154	[kg]
Lämpöteho	1 500	2500	50	50	[MW]
Materiaalikilot suhteessa lämpötehoon	75	79	101	143	[kg/MW]
Lämpöteho suhteessa materiaalikiilon	13,4	12,7	9,9	7,0	[kW/kg]

Taulukossa 1 selville saadut reaktorien materiaalitylvuudet, massat, materiaalikilot suhteessa lämpötehoihin ja lämpötehot suhteessa materiaalikiiloihin poikkeavat todellisista Loviisan ja Olkiluodon 1 & 2 reaktoreista. Poikkeama johtuu pelkistetyistä reaktorin muodosta sekä siitä, että laskennassa on käytetty selville saatuja minimiseinämäpaksuuksia. Todelliset seinämävahvuudet

ovat muutaman millimetrin paksumpia ja sisältävät lisäksi ruostumattomat teräspinnoitteet (vrt. liite 3). Laskennan kannalta todellisilla seinämäpaksuuksilla ei kuitenkaan ole merkitystä. On parempi, että laskenta on suoritettu minimiseinämäpaksuuksilla, koska silloin tulokset ovat keskenään vertailukelpoisia myös pienydinreaktorin osalta, jolla ei ole olemassa vielä todellista seinämävahvuutta.

LDR-50 (1) reaktoripainesäiliön tapauksessa on jätetty laskematta mukaan kyseisestä materiaalista valmistetun säiliön vaatiman pinnoitteen osuus. Todellisessa valmistukseen liittyvässä tarjouskilpailutuksessa pinnoite tulisi ehdottomasti lisätä seinämäpaksuuteen muutamia millimetrejä seinämävahvuutta kasvattavana ja sitä kautta myös materiaalilavuuteen, massa suhteutettuihin lämpötehokäyttöihin sekä olennaisesti kokonaiskuluihin vaikuttavana tekijänä. Pinnoitteen lisäyksen jälkeen eri materiaaleista valmistettujen LDR-50 pienydinreaktoreiden seinämävahvuus asettuisi keskenään lähes samaan luokkaan ja LDR-50 (2) helpompi valmistettavuus kääntäisi materiaalivalintaa sitä kohden huolimatta materiaalin kalliimmasta yksikköhinnasta suhteessa LDR-50 (1) ferriittiseen teräkseen.

6 POHDINTA

Oli odotettavissa, että pienydinreaktori jää massaltaan huomattavasti kevyemmäksi kuin Olkiluodon tai Loviisan reaktorit huolimatta materiaalivalinnoista. Tarkemmassa vertailussa reaktorien kesken Loviisan painevesireaktorimalissa oli kuitenkin käytetty vähiten materiaalikiloja suhteessa lämpötehon määrään ja tällöin myös lämpöteho (kW) suhteessa käytettyyn materiaalikieloon oli arvoltaan paras Loviisan painevesireaktorin tapauksessa.

LDR-50 (1) tapauksessa pakollisen pinnoitteen lisääminen ferriittisen metallin pintaan lisää seinämäpaksuutta noin 25 %, jolloin myös pienreaktoreiden kokonaismassojen ero materiaalivaihtoehtojen välillä kaventuu huomattavasti. Tärkeäksi osatekijäksi nouseekin työn hinta ja työstömenetelmien helppous. Todelliset säästöt ilmenisivätkin ajan kuluessa mahdollisen tyyppihyväksynnän, massatuotannon ja nopean energiantuotantoon saattamisen kautta.

Materiaalimenekki reaktorissa antaa toki suuntaa kustannuksille, mutta esimerkiksi takeena tehtävän perinteisen reaktoripainesäiliön tapauksessa työn osuutta materiaalista on lähes mahdotonta eriyttää. Lisäksi esimerkiksi lisättävien yhteiden lukumäärä vaikuttaa kertyviin kustannuksiin. Näistä syistä jo olemassa olevia reaktoreita on vaikea verrata tulevaisuuden mahdollisesti levytavarasta valmistettuihin ja kokoonpanolinjastolla loppuunsaatettuihin pienreaktoripainesäiliöihin.

Pieni, alle 20 mm seinämävahvuus antaa option käyttää kotimaista levytavaraa ja tuotantoa siinä missä aiemmin takeena ulkomailla (esimerkiksi Japannissa) valmistettava reaktori oli ainut varteenotettava vaihtoehto massiivisille seinämäpaksuuksille. Ydinvoiman yhteydessä käytettyjen metallilaatujen vaatimukset ovat korkeita ja hintarakenne ei siksi ole niin yksiselitteinen, mutta tunnettuna ilmiönä voidaan kuitenkin pitää austeniittisen teräksen (ruostumattoman teräksen) noin 2–3 kertaista hintaa tavalliseen ferriittiseen teräkseen nähden. Austeniittisen teräslaadun suureksi eduksi sitä ei tarvitse pinnoittaa hitsaamalla siihen säteilyä kestävää pinnoitetta erikseen kuten ferriittisen teräksen kohdalla tulee toimia.

Ydinvoiman tapauksessa mennään aina turvallisuus edellä ja vaikka kustannukset ovat liiketoiminnan keskiössä, niin ne eivät saa olla liikaa päätöksiin vaikuttavassa asemassa.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Odotusten mukaisesti reaktoripainesäiliöiden massaerot olivat laskennan kautta saatujen tuloksien valossa valtavia. Perinteisiin reaktoreihin nähden materiaalisäästöt pienreaktoreissa ovat todella suuria, riippuen vertailukohdista jopa noin 30-kertaisia. Lämpötehoon suhteutettuna tulokset kuitenkin muuttuivat perinteisten ydinvoimaloiden eduksi. Pienydinvoimalan reaktorissa olevan metallin määrä on kuitenkin niin pieni suhteessa konventionaalisiin ydinreaktoreihin, että teräksen maailmanmarkkinahinnoissa tapahtuvat suuret muutokset voivat kääntää edun pienydinvoimaloille. Teräksen hinnanmuutokset vaikuttaisivat toki edelleen samassa suhteessa reaktorimallien kesken, eli etu olisikin laskettavissa esimerkiksi energiantuotannon kautta saatavan nopeamman perustamiskustannuksien takaisinmaksun avulla. Omat haasteensa

keskinäiseen vertailuun tuovat lämpö- ja sähköenergian tuotannon eri hyötysuhteet. Perinteisten ydinvoimaloiden tuottaessa pelkästään sähköä noin kolmanneksella siitä hyötysuhteesta, millä pienydinvoimalat tulevat tuottamaan lämpöenergiaa, menee näiden tuotantomuotojen keskinäinen vertailu vaikeaksi. On kuitenkin luonnollisempaa verrata eri reaktorimalleja keskenään, kuin esimerkiksi hiilidioksidipäästöjä tuottavaa lämpövoimalaitosta tai yhteistuotantolaitosta pienydinvoimalaan. Päästötavoitteiden alati kiristyessä tulevaisuudessa ei ole enää varaa tuottaa lämpöenergiaa sekä tuotannon yhteydessä vapautuvia päästöjä.

Tutkimus eteni odotetusti jakaantuen kahteen osaan, teoria- ja laskentaosuuksiin. Joidenkin yksittäisten lukuarvojen ja tietojen löytäminen laskennan tueksi osoittautui vaikeaksi, näiden haasteiden kohdalla oli suurta apua työn ohjaajasta sekä haastateltavista ydinvoiman ammattilaisista. Ydinvoimasta löytyy paljon kirjallisuutta ja tutkimuksia, jolloin työn rajaaminen osoittautui yhdeksi haastavimmista seikoista työn edetessä. Joitakin asioita olisi ollut hyvä tarkastella vielä entistä laajemmin (kuten ydinvoiman turvallisuus) jopa työn tai yksittäisten osuuksien ylipitkäksi venymisen varjolla. Jälkiviisaana olisi ollut hyvä antaa enemmän aikaa ASME-osuudelle ja teräskoodiston parempaan perehtymiseen.

Työn alkuvaiheilla tahtotilana oli saada selvitettyä euromääräiset materiaalikustannukset eri reaktorimalleissa. Tämä osoittautui kuitenkin hyvin hankalaksi toteutettavaksi ja käytännössä todellisten hintojen selvittäminen olisi vaatinut tarjouspyyntöjä yrityksen nimissä. Työ opetti ymmärtämään ydinvoimaa ja sen sisältämän tutkimustyön ja suunnittelun määrää kokonaisuutena paremmin ja pystyi siten myös luomaan läpileikkauksen tähän kaikkeen toivottavasti myös lukijalle. Työ avasi myös ASME-maailmaa sekä ASME-standardin yhteyttä suunnitteluun ja käytännön mitoitukseen sitä ohjaavana tekijänä.

Yksittäisen kaukolämpöreaktorin paineastian materiaalikulutuksen selvittäminen vertailumielessä on kuitenkin vain yksi osatekijä voimalan kokonaiskustannuksia ajatellen. Yksikön kustannukset kasvavat muun muassa suojarakennuksen, valvonnan sekä vartioinnin tarpeen vuoksi. Myös ydinjätteen ja uuden ydinpolttoaineen luotettava syklinen poiskerääminen ja toimitus useista kohteista synnyttää aivan oman infrastruktuurinsa ja logistiikkaketjunsä.

Varsinaista toiminnassa olevaa pienydinreaktorimallia kaukolämpökäyttöön ei ole vielä olemassa, jolloin mitoitukset ja toiminnallisuus saattavat muuttua ennen lopullista versiota. Laskelmat ovat tehty suuntaa antaviksi ja toimivat tämän hetken tiedoilla laskettuna. Työn seuraavana vaiheena tulevaisuudessa olisi päästä mallintamaan tarkka reaktorin muoto kaikkine yksityiskohtineen ja tehdä siitä FEM-analyysi. Saatua mallinnusta voisi hyödyntää materiaalivaihtoehtojen tarkempaan kartoitukseen ja seinämävahvuuksien mitoitukseen reaktorin eri osissa. Tutkimusaiheena pienydinvoima on hyvin laaja ja lisätutkimuksia voisi soveltaa lähes loputtomasti esimerkiksi turvallisuuden, päästöjen ja ydinjätteen loppusijoituksen näkökulmista.

Kuluttajat olisivat valmiita halpaan, tasaiseen ja toimintavarmaan lämpöenergiaan. Eduskunnan päätökset vaikuttavat paljolti siihen, kuinka Suomen lämpöenergiaa tulevaisuudessa tuotetaan.

LÄHTEET

ASME. 2017. ASME Boiler and Pressure Vessel Code - An International Code. Section III Rules for Construction of Nuclear Facility Components. New York: Two Park Avenue.

ASME. 2019. ASME Boiler and Pressure Vessel Code - An International Code. Section II Materials. New York: Two Park Avenue.

Happo, P. 2022. Näin läpimurto fuusioenergian tuotannossa käytännössä tehtiin – sähköverkkoon ehkä 2030-luvulla, mutta eri menetelmällä, arvioi asiantuntija. Yle uutiset. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://yle.fi/a/74-20008627> [viitattu 23.1.2023].

Hyvärinen, J. 2023. Reaktoreissa käytettävät teräslaadut. Sähköpostihaastattelu 15.2.2023.

IAEA. 2009. Integrity of Reactor Pressure Vessels in Nuclear Power Plants: Assessment of Irradiation Embrittlement Effects in Reactor Pressure Vessel Steels. International Atomic Energy Agency publication. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1382_web.pdf [viitattu 31.3.2023].

Juuti, P. 2022. Esitimme 10 kysymystä pienreaktorista, joka saattaa lämmittää pian suomalaisten koteja – VTT:n reaktorissa on merkittävä ero muihin vastaaviin. Yle uutiset. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://yle.fi/a/74-20002478> [viitattu 11.2.2023].

Leppänen, J. 2018. Ydinenergia ja kaukolämpö. Fissioreaktori-blogi. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://fissioreaktori.wordpress.com/2018/12/17/ydinenergia-ja-kaukolampo/#link_vi [viitattu 2.2.2023].

Leppänen, J. 2023. Kaukolämpöreaktorin paineastian materiaali. Sähköpostihaastattelu 24.2.2023.

LUT-yliopisto. 2022. Lappeenrantaan suunnitellaan pienydinvoimalaa. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.lut.fi/fi/uutiset/lappeenrantaan-suunnitellaan-pienydinvoimalaa> [viitattu 2.2.2023].

Merimaa, J. 2023. Pienistä ydin-voimaloista puhutaan jo vakavasti – grafiikka kertoo, miten lämpöä tuottava ydin-voimala toimisi. Helsingin Sanomat. Tiede uutiset. Saatavissa: <https://www.hs.fi/tiede/art-2000009334625.html> [viitattu 18.3.2023].

Motiva. 2022. Kaukolämpö. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/rakentaminen/lammitysjarjestelman_valinta/lammitysmuodot/kaukolampo [viitattu 8.2.2023].

Plekh, I. 2020. ASME-standardin mukaisten putkistokomponenttien lujuuslaskentapohjan laatiminen Excel-taulukkolaskentaohjelmalla. Opinnäytetyö. Oulun ammattikorkeakoulu. Energiatekniikka. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/342086/Plekh_Irina.pdf?sequence=2&isAllowed=y [viitattu 13.3.2023].

Sandberg, J. 2004. Ydinturvallisuus. Säteily- ja ydinturvallisuus osa 5. Säteilyturvakeskus. Hämeenlinna: Karisto Oy.

STUK. 2013. Ydinvoimalaitoksen painelaitteiden lujuusanalyysit. Ohje. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://ohjeisto.stuk.fi/YVLold/YVLE.4fi_2013-11-15.pdf [viitattu 13.3.2023].

STUK. 2022a. Suomen ydinvoimalaitokset. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.stuk.fi/aiheet/ydinvoimalaitokset/suomen-ydinvoimalaitokset> [viitattu 23.1.2023].

STUK. 2022b. Säteilyturvakeskuksen laatima arvio Loviisan määräaikaisesta turvallisuusarvioinnista PSR2023. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.stuk.fi/documents/12547/12035692/STUK_3_A42215_2021%3B+LO1+ja+2_PSR2023_Liite1_STUKin+arvio+Loviisan+1%262+ydinvoimalaitosta+koskevasta+m%C3%A4%C3%A4r%C3%A4aikaisesta+turvallisuusarvioista+2023.PDF/3d67e4f1-b771-cb4a-b0b7-c97c79a39c81?t=1651224024648 [viitattu 18.3.2023].

STUK. 2022c. Toimintaohjeet säteilyvaaratilanteessa. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.stuk.fi/aiheet/sateilyvaara/toimintaohjeet-sateilyvaara-tilanteessa> [viitattu 6.2.2023].

Telkkä, J. 2010. Passiiviset turvallisuusjärjestelmät kolmannen sukupolven painevesireaktorilaitoksissa. Opinnäytetyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Energiatekniikan kandidaatintyö. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/70761/nbnfife201108192240.pdf;jsessionid=F02FC1AB47B3AD2CBA75862AADDE5954?sequence=3> [viitattu 16.3.2023].

Teräsrakenneyhdistys. 2017. Käsikirja – Ruostumattomien terästen käyttö kantavissa rakenteissa. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://www.steel-stainless.org/media/1455/fi-kaesikirja-ruostumattomien-teraesten-kaeyttoaerakenteissa-4painos.pdf> [viitattu 31.3.2023].

Tilastokeskus. 2021. Kaukolämmön ja teollisuuslämmön tuotanto polttoaineittain 2000-2020. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.stat.fi/til/salatuo/2020/salatuo_2020_2021-11-02_tie_001_fi.html [viitattu 3.2.2023].

Tilastokeskus. 2022. Sähköntuotanto energialähteittäin 2000–2021. Tuotantodiagrammi. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.stat.fi/julkaisu/cku28dfkw805d0b9922uxoyep> [viitattu 18.3.2023].

Tutkimusportaali. 2015. Properties of SA508, Grade 3, Class 1. Taulukko C. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.researchgate.net/figure/Properties-of-SA508-Grade-3-Class-1-A-Thermal-conductivity-B-specific-heat-and_fig1_273491831 [viitattu 31.3.2023].

TVO. 2007. Ydinvoimalaitosyksiköt Olkiluoto 1 ja Olkiluoto 2. Tekninen kuvaus. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://www.tvoy.fi/uploads/File/yksikot-OL1-OL2\(1\).pdf](https://www.tvoy.fi/uploads/File/yksikot-OL1-OL2(1).pdf) [viitattu 31.3.2023].

TVO. 2023. Suomen suurin ilmastoteko. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.tvoy.fi/> [viitattu 6.2.2023].

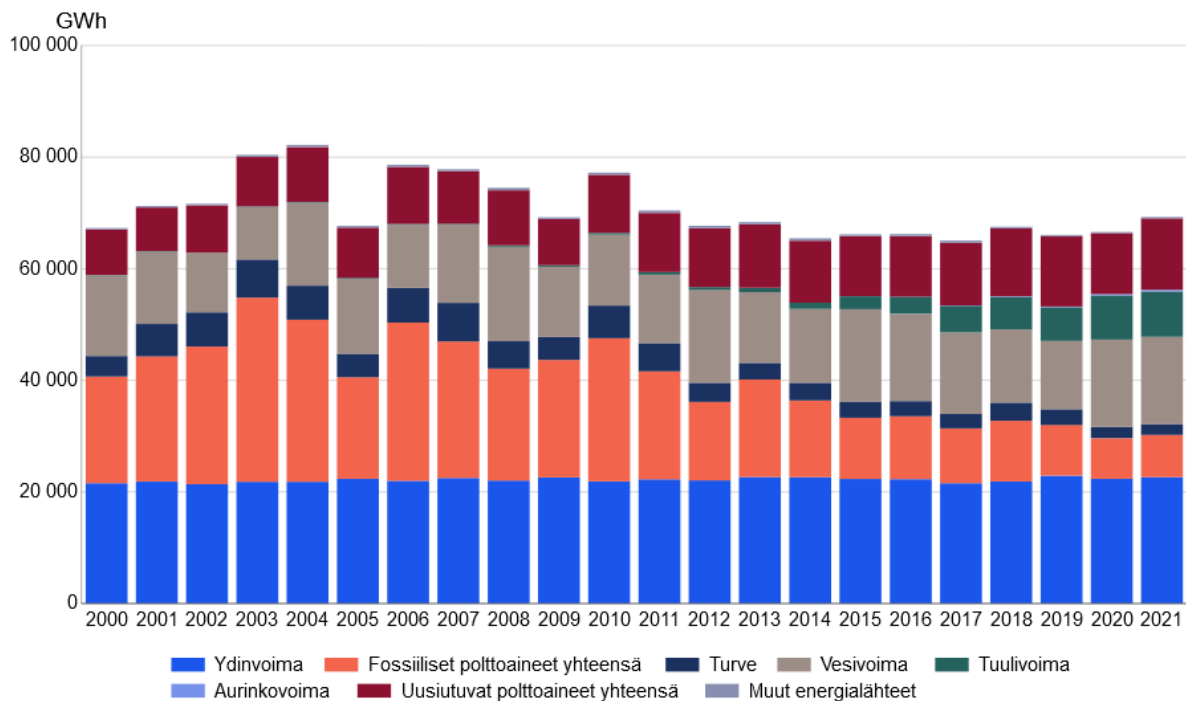
Vattenfall. 2023. Ydinvoima. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.vattenfall.fi/sahkosopimukset/tuotantomuodot/ydinvoima/> [viitattu 17.2.2023].

VTT. 2020. Fossiilisille kyytiä! VTT kehittää pienreaktoria kaukolämpökäyttöön. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-ja-tarinat/fossiilisille-kyytia-vtt-kehittaa-pienreaktoria-kaukolampokayttoon> [viitattu 22.2.2023].

VTT. 2021. Kohti puhdasta kaukolämpöä: Merkittävä patentti VTT:n kehittämälle pienydinreaktorin jäähdytysratkaisulle. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-ja-tarinat/kohti-puhdasta-kaukolampoa-merkittava-patentti-vtt-kehittamalle> [viitattu 9.2.2023].

Wischnewski, B. 2023. Veden ja höyryn ominaisuuksien laskuri. WWW-dokumentti. Saatavissa: http://www.peace-software.de/einigewerte/wasser_dampf_e.html [viitattu 22.2.2023].

Liite 1. Sähkön tuotanto energialähteittäin 2000–2021. (Tilastokeskus 2022.)



Liite 2. IAEA:n ARIS-tietokannan tekninen kuvaus. (Leppänen 2023.)

Appendix: **Summarized Technical Data (LWR)**

General plant data		
Reactor thermal output	50	MWth
Power plant output, gross	N/A	MWe
Power plant output, net	N/A	MWe
Power plant efficiency, net	N/A	%
Mode of operation	Baseload or load-follow	
Plant design life	40-60	years
Plant availability target	90	%
Seismic design, SSE	TBD	g
Primary coolant material	Light water	
Secondary coolant material	Light water	
Moderator material	Light water	
Thermodynamic cycle	N/A	
Type of cycle	N/A	
Non-electric application	District heating (primary intended use); desalination, hydrogen production, CO ₂ capture (alternative / secondary applications)	
Safety goals		
Core damage frequency	TBD	/RY
Large early release frequency	TBD	/RY
Occupational radiation exposure	TBD	Person-Sv/Ry
Operator Action time	> 150	hours
Reactor coolant system		
Primary coolant flow rate	230-240	kg/s
Reactor operating pressure	0.5-0.8	MPa
Core coolant inlet temperature	80-105	°C
Core coolant outlet temperature	130-155	°C
Mean temperature rise across core	50	°C
Reactor core		
Active core height	1.0	m
Equivalent core diameter	1.5	m
Average linear heat rate	2.1	kW/m
Average fuel power density	1.1E-2	kW/kgU
Average core power density	29.2	MW/m ³
Fuel material	Uranium oxide	

Cladding tube material	Zirconium alloy	
Outer diameter of fuel rods	0.95	mm
Rod array of fuel assembly	Rectangular 17 x 17	
Number of fuel assemblies	37	
Enrichment of reload fuel at equilibrium core	1.5 / 2.4	Wt%
Fuel cycle length	24	months
Average discharge burnup of fuel	~20	MWd/kg
Burnable absorber (strategy/material)	gadolinia	
Control rod absorber material	Steel / AIC / boron carbide	
Soluble neutron absorber	Not used	
Reactor pressure vessel		
Inner diameter of cylindrical shell	2700	mm
Wall thickness of cylindrical shell	20-30	mm
Total height, inside	~8000	mm
Base material	steel	
Design pressure / temperature	1.6 / TBD	MPa / °C
Transport weight	TBD	t
Primary containment		
Type	Integrated vessel	
Overall form	cylindrical	
Design pressure	1.6 / TBD	MPa / °C
Design leakage rate	TBD	Vol%/day
Is secondary containment provided?		
Residual heat removal systems		
Active / passive systems	Passive cooling to reactor pool	
Safety injection systems		
Active / passive systems		

Liite 3. Excel-laskenta reaktorien minimiseinämävahvuuksista ja materiaalmääristä

Reaktoripainesäiliö (Loviisa 1&2) Materiaali: SA-508			
P (MPa)	13,7	säde(Ro)	1920 mm
Sm	188	mitoituspaine	13,7 MPa
R	1920	korkeus(ulkom.)	13800 mm
		suunnittelulämpöt.	300 °C
		Sm (dsi)	188 MPa
t (mm)	135	lämpöteho	1500 MW
Vrt. seinämäpaksuus 140mm+9mm rst pinnoite (Sandberg 2004, 117).			

Reaktoripainesäiliö (Olkiluoto 1&2) Materiaali: SA-508			
P (MPa)	8,5	säde(Ro)	2905 mm
Sm	188	mitoituspaine	8,5 MPa
R	2905	korkeus(ulkom.)	20850 mm
		suunnittelulämpöt.	300 °C
		Sm (dsi)	188 MPa
t (mm)	128	lämpöteho	2500 MW
Vrt. seinämäpaksuus 134mm+3mm rst pinnoite (Sandberg 2004, 118).			

Pienydinreaktorin painesäiliö (kaukolämpök.) Materiaali: SA-508			
P (MPa)	1,6	säde(sisäm.)	1350 mm
Sm	190,6	mitoituspaine	1,6 MPa
R	1350	korkeus(sisäm.)	8000 mm
		suunnittelulämpöt.	160 °C
		Sm (dsi)	190,6 MPa
t (mm)	11,4	lämpöteho	50 MW
Vrt. LDR Design document 20-30mm wall thickness (liite 2).			

Pienydinreaktorin painesäiliö (kaukolämpök.) Materiaali: AISI 316 = EN 1.4401			
P (MPa)	1,6	säde(sisäm.)	1350 mm
Sm	137,2	mitoituspaine	1,6 MPa
R	1350	korkeus(sisäm.)	8000 mm
		suunnittelulämpöt.	160 °C
		Sm (dsi)	137,2 MPa
t (mm)	15,8	lämpöteho	50 MW
Vrt. LDR Design document 20-30mm wall thickness (liite 2).			

Reaktoripainesäiliö (Loviisa 1&2) Materiaali: SA-508			Reaktorin massa = materiaalin tilavuus * tiheys =
	ulkom.(m)	sisäm.(m)	
kokonaiskorkeus	13,80	13,5300	tilavuus 14,27 m ³
leveys	3,84	3,57	tiheys 7850 kg/m ³
lieriön korkeus	9,96	9,96	massa 112 038 kg
lieriön tilavuus (m ³)	120,15	111,71	
pallon tilavuus (m ³)	29,65	23,82	Lämpöteho: 1500 MW
kokonaistilavuus = lieriön tilavuus + pallo	149,80	135,53	Materiaalikiloa per MW
Materiaalitulavuus		14,27 m ³	75 kg/MW
Reaktoripainesäiliö (Olkiluoto 1&2) Materiaali: SA-508			Reaktorin massa = materiaalin tilavuus * tiheys =
	ulkom.(m)	sisäm.(m)	
kokonaiskorkeus	20,85	20,59	tilavuus 25,16 m ³
leveys	5,81	5,55	tiheys 7850 kg/m ³
lieriön korkeus	15,04	15,04	massa 197 544 kg
lieriön tilavuus (m ³)	274,52	262,38	
pallon tilavuus (m ³)	102,69	89,66	Lämpöteho: 2500 MW
kokonaistilavuus = lieriön tilavuus + pallo	377,21	352,04	Materiaalikiloa per MW
Materiaalitulavuus		25,16 m ³	79 kg/MW
Pienydinreaktorin painesäiliö (kaukolämpök.) Materiaali: SA-508			Reaktorin massa = materiaalin tilavuus * tiheys =
	ulkom.(m)	sisäm.(m)	
kokonaiskorkeus	8,023	8,00	tilavuus 0,64 m ³
leveys	2,72	2,70	tiheys 7850 kg/m ³
lieriön korkeus	5,30	5,30	massa 5038 kg
lieriön tilavuus (m ³)	45,34	44,96	
pallon tilavuus (m ³)	10,57	10,31	Lämpöteho: 50 MW
kokonaistilavuus = lieriön tilavuus + pallo	55,90	55,26	Materiaalikiloa per MW
Materiaalitulavuus		0,64 m ³	101 kg/MW
Pienydinreaktorin painesäiliö (kaukolämpök.) Materiaali: AISI 316 = EN 1.4401 (Fe44%Cr29,2%Mo8,3%)			Reaktorin massa = materiaalin tilavuus * tiheys =
	ulkom.(m)	sisäm.(m)	
kokonaiskorkeus	8,03	8,00	tilavuus 0,89 m ³
leveys	2,73	2,70	tiheys 8000 kg/m ³
lieriön korkeus	5,30	5,30	massa 7154 kg
lieriön tilavuus (m ³)	45,48	44,96	
pallon tilavuus (m ³)	10,67	10,31	Lämpöteho: 50 MW
kokonaistilavuus = lieriön tilavuus + pallo	56,16	55,26	Materiaalikiloa per MW
Materiaalitulavuus		0,89 m ³	143 kg/MW