

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
Teknillinen tiedekunta  
Energiatekniikan koulutusohjelma  
BH10A0200 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

# **PAINEVESILAITOSTEN HÖYRYSTINKONSTRUKTIOIDEN VERTAILU**

Lappeenrannassa 19.12.2010

0309881

Jari Havuaho

ENTE 4

# SISÄLLYSLUETTELO

SISÄLLYSLUETTELO .....	<u>1</u>
KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET.....	<u>2</u>
1 JOHDANTO .....	<u>3</u>
2 YLEISTÄ HÖYRYSTIMISTÄ .....	<u>3</u>
2.1 Höyrystimen vaikutus laitoksen turvallisuuteen.....	<u>5</u>
3 U-PUTKI TYYPPISET PYSTYHÖYRYSTIMET .....	<u>7</u>
3.1 Käyttö maailmalla .....	<u>15</u>
3.2 Käyttö Suomessa.....	<u>15</u>
3.3 Vaikutus turvallisuuteen.....	<u>15</u>
3.4 Uuden sukupolven pystyhöyrystimet.....	<u>16</u>
4 VAAKAHÖYRYSTIMET .....	<u>16</u>
4.1 Käyttö maailmalla .....	<u>20</u>
4.2 Käyttö Suomessa.....	<u>21</u>
4.3 Vaikutus turvallisuuteen.....	<u>21</u>
4.4 Uuden sukupolven vaakahöyrystimet .....	<u>22</u>
5 LÄPIVIRTAUSHÖYRYSTIMET .....	<u>22</u>
5.1 Käyttö maailmalla .....	<u>27</u>
5.2 Käyttö Suomessa.....	<u>27</u>
5.3 Vaikutus turvallisuuteen.....	<u>27</u>
6 HÖYRYSTINKONSTRUKTIOIDEN VERTAILU .....	<u>27</u>
7 YHTEENVETO .....	<u>29</u>
LÄHTEET .....	<u>30</u>

## KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

### Lyhenteet

ATWS	Anticipated Transient Without Scram
EPR	European Pressurized Reactor
LOCA	Loss of Coolant Accident
VVER	Vodo-vodjanoi energetičeski rektor

### Symbolit

p	Paine	bar
T	Lämpötila	°C

### Alaindeksit

c	Höyrytimen ulostulo
h	Höyrytimen sisääntulo
m	Keskimääräinen
s	Sekundääripiiri

## 1 JOHDANTO

Höyrystin on eräs painevesilaitoksen tärkeimmistä komponenteista. Painevesilaitos on puolestaan maailman yleisin laitosyksikkötyyppi. Vuonna 2010 on maailmanlaajuisesti toiminnassa 439 yksikköä, joista 265 on painevesilaitoksia. Yli 60% maailman ydinvoimalaitosyksiköistä on siis painevesilaitoksia. (World Nuclear Association. 2010a) Tässä työssä keskitytään höyrystimiin kaupallisten painevesilaitosten kannalta.

Höyrystimessä primääripiirin paineistettuun veteen sitoutunut lämpö siirretään sekundääripiiriin. Höyrystimen toiminta on tärkeää sekä laitoksen energiantuotannon, että turvallisuuden kannalta.

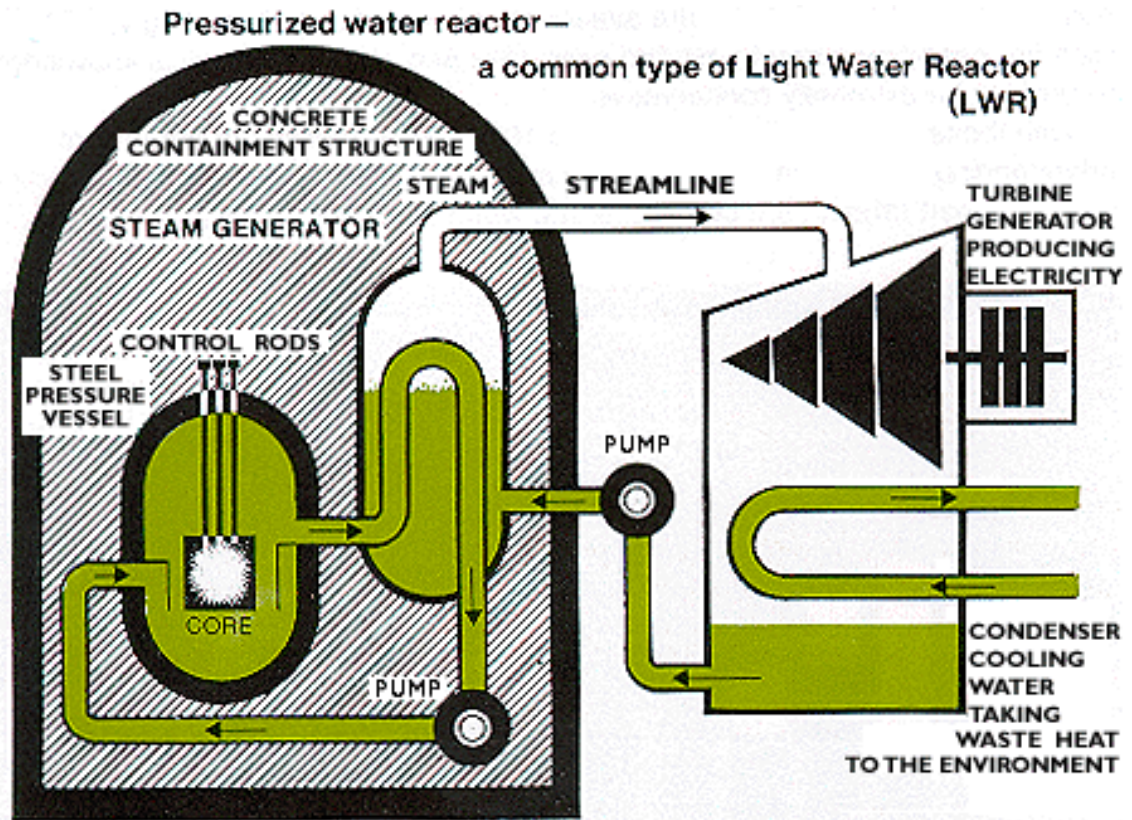
Maailmassa on useita yhtiöitä jotka ovat suunnitelleet eri voimalaitostyyppjejä. Tähän mennessä höyrystimen suunnittelulle on löydetty kolme konstruktiota, joita yleisesti käytetään: ensimmäinen on pystyasennossa oleva U-putkihöyrystin. Toinen tyyppi on vaaka-asennossa oleva U-putkihöyrystin, johon tässä työssä viitataan vaakahöyrystimenä. Kolmas merkittävä höyrystintyyppi on Läpivirtaushöyrystin. Tämän konstruktion nimitys tulee siitä, että siinä primäärivesi virtaa suoraan höyrystimen läpi.

Tässä työssä on tarkoitus tutustua edellä mainittujen kolmen höyrystintyyppin ominaisuuksiin ja vertailla niitä keskenään. Erityistä huomiota kiinnitetään höyrystintyyppin vaikutukseen laitoksen ydinturvallisuuteen.

## 2 YLEISTÄ HÖYRYSTIMISTÄ

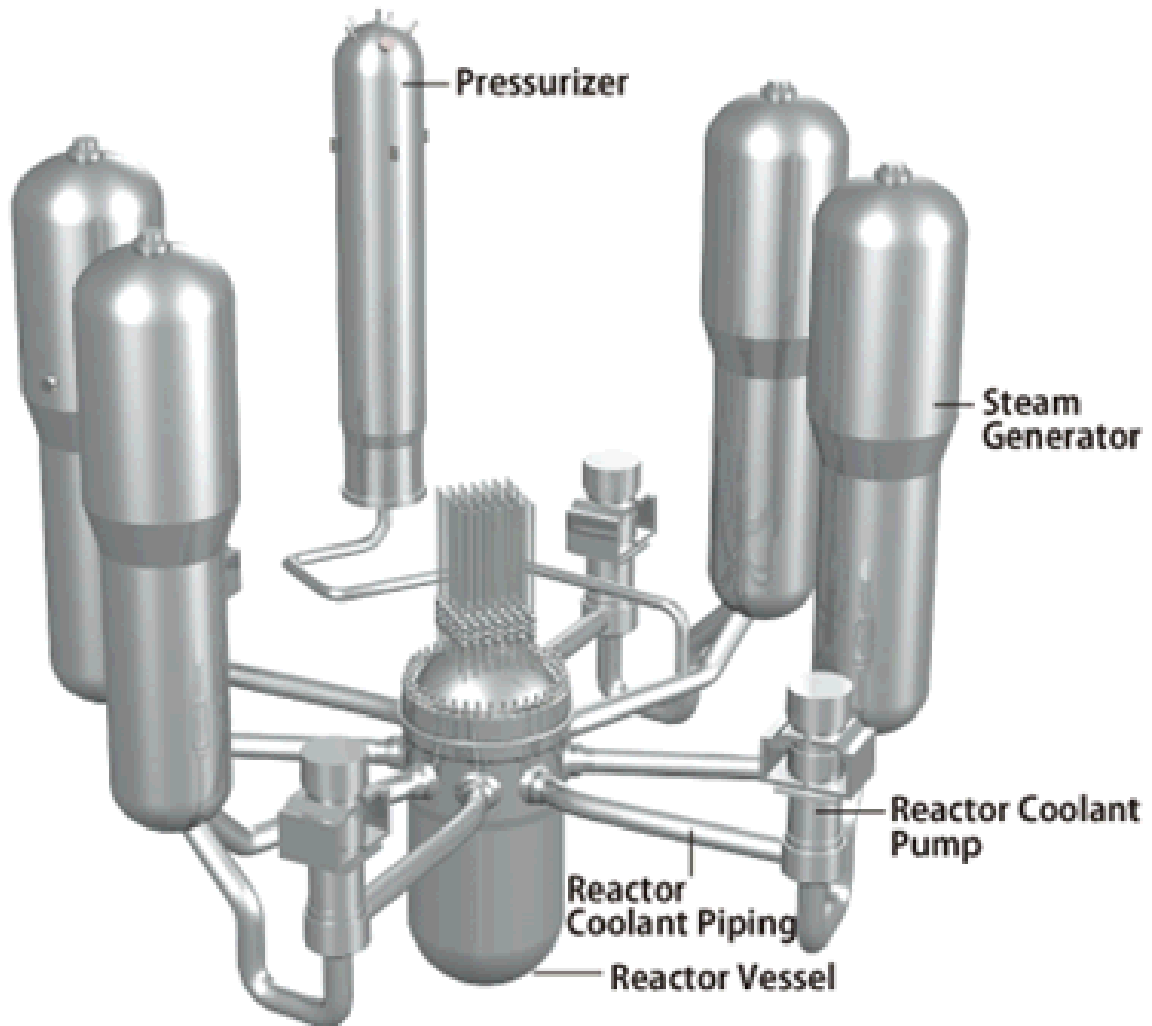
Painevesilaitosyksikössä reaktorissa syntyvä lämpöteho lämmittää primääripiirin vettä. Korkean paineen ansiosta primääripiirin vesi ei kuitenkaan kiehu. Tämä kuuma vesi pumpataan höyrytimeen, jossa se virtaa höyrystimen läpi useita pienempiä putkia pitkin. Höyrystimen primääriputkien ulkopuolella kulkee sekundäärivesi, jota primäärivesi lämmittää. Koska sekundääripiirin paine on pienempi, kiehuu sekundäärivesi höyryksi. Tämä höyry kulkee turbiinille, jossa se pyörittää turbiinia. Turbiini pyörittää edelleen generaattoria, joka tuottaa sähköä. Höyrystin on siis lämmönsiirrin, jonka tehtävänä on

siirtää primääriverteen sitoutunut lämpöenergia sekundääriverteen. Painevesilaitoksen tärkeimmät komponentit on esitetty kuvassa 1. Kuvassa 2 taas on esitelty U-putkipystyhöyrystimien sijoittelu reaktorin ympärille.



**Kuva 1.** Painevesilaitoksen tärkeimmät laitteet. (World Nuclear Association)

Jäähdytettä kierrätetään höyrystimen läpi pumppujen avulla (Neil 1990 s.4). Tämän takia höyrystimen toiminta on myös hyvin riippuvainen pumppujen toiminnasta.



**Kuva 2.** Neljän U-putki pystyhöyrystimen sijoittelu reaktoriin nähden. (Mitsubishi)

## 2.1 Höyrystimen vaikutus laitoksen turvallisuuteen

Höyrystimen tehtävänä on siirtää lämpöä pois primääripiiristä, joten sen vaikutus laitoksen ydinturvallisuuteen on todella merkittävä. Jos höyrystin ei syystä tai toisesta pysty poistamaan lämpöä primääripiiristä, on vaarana että primääripiirin lämpötila pääsee nousemaan liian korkeaksi. Tällöin on vaarana sydämen sulaminen.

Höyrystin toimii myös leviämisesteen rajana. Höyrystimessä primääri- ja sekundääri-vesi pidetään fyysisesti erotettuina, mikä estää radioaktiivisten aineiden joutumisen sekundääripiiriin ja sen kautta suojarakennuksen ulkopuolelle. Ydinvoimaloissa primääripiirissä kiertää paljon radioaktiivisia isotooppeja, mutta sekundääripiirissä ei

normaalikäytön aikana ole radioaktiivisuutta. Höyrystimen sisällä olevien lämmönsiirtoputkien rikkoutuminen johtaa radioaktiivisten aineiden leviämiseen sekundääripiiriin.

Ydinvoimaloissa merkittävin tekijä osien kulumiselle on veden aiheuttama korroosio. Tämä on ongelma erityisesti sekundääripiirin puolella, missä osat joutuvat kosketuksiin sekä veden että höyryn kanssa. (Styrikovich et al. 1987 s. 2,11-12)

Perinteisesti höyrystimen toimintaongelmat ovat olleet ydinvoimalaitoksilla polttoaineen vaihdon jälkeen toiseksi yleisin syy laitoksen menetettyyn tuotantoaikaan. Käyttökokemusten myötä ovat höyrystimen materiaalit ja rakenne sekä toisaalta vesikemian hallinta kehittyneet, mikä on parantanut myös höyrystimien kestävyyttä. (Wade. 1995. s.13)

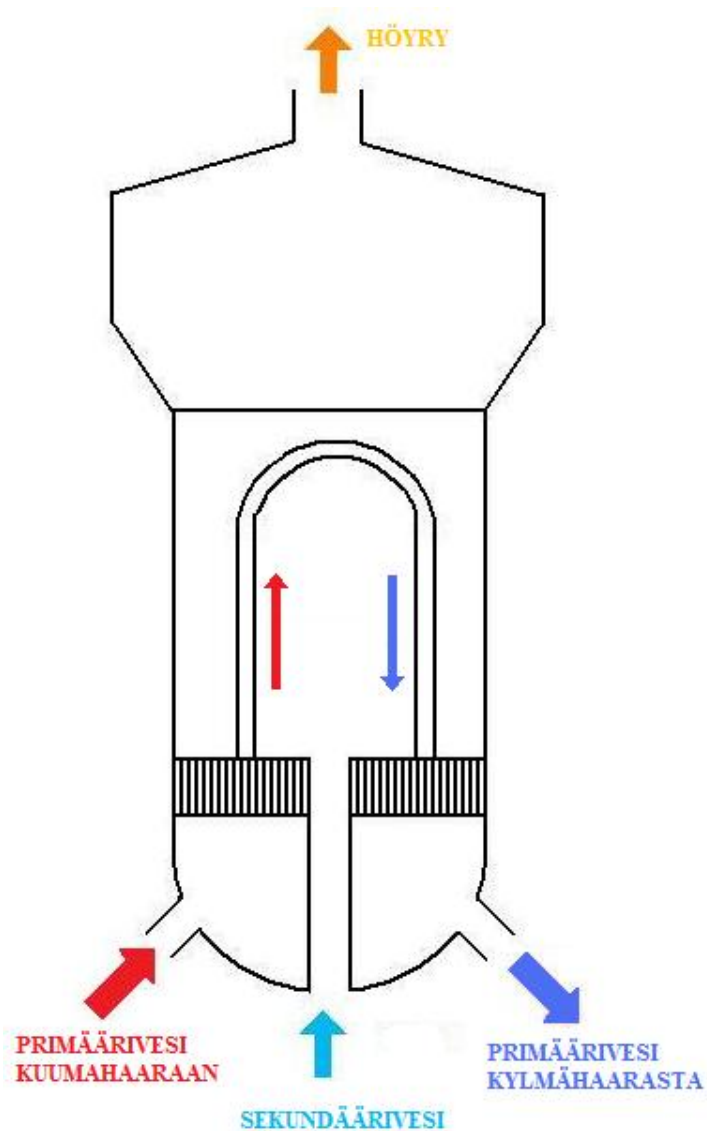
Veden määrä höyrystimen sekundääripuolella on merkittävä tekijä laitoksen turvallisuuden kannalta. Jos poikkeustilanteessa, esimerkiksi laitoksella tapahtuvan laajan sähkökatkoksen seurauksena, sekundääriveden kierto vaarantuu, ei höyrystimeen saada enää lisää vettä tarpeeksi tehokkaasti. Tämän jälkeen höyrystin alkaa kiehua tyhjäksi sekundääripuolelta. Kun höyrystin kiehuu tyhjäksi, ei sen kautta enää siirry lämpöä pois primääripiiristä ja sydämen jäähditys vaarantuu. (Choi, Kim. 2003) Mitä enemmän vettä höyrystimen sekundääripuolella on, sitä kauemmin sen tyhjäksi kiehuminen kestää. Tämä antaa operaattoreille lisää aikaa korjata tilanne.

Myös höyrystimen sisällä tapahtuva primääri-sekundääri -vuoto on uhka painevesilaitoksen turvallisuudelle. Se on tunnustettu maailmanlaajuisesti erääksi vakavimmista turvallisuusuhista ydinvoimalaitokselle. Höyrystinputken rikkouduttua radioaktiiviset aineet pääsevät sekundääripiiriin. Sekundääripiirissä paine kasvaa, kun paine pyrkii tasaantumaan primääripiirin kanssa. Tämä voi johtaa paineenalennusventtiilien aukeamiseen ja radioaktiivisten aineiden karkaamiseen ilmakehään asti. Samalla menetetään primääripiirin vettä sekundääripuolelle, mikä vaarantaa reaktorin jäähdytyksen. Lisäksi boorin pitoisuus primäärivedessä voi laimentua ja on mahdollista että syntyy vesitaskuja joissa boorin pitoisuus on hyvin alhainen, jos

sekundäärivettä virtaa primääripuolelle. Tämä voi johtaa reaktiivisuusonnettomuuteen. (Vihavainen, Hyvärinen, Misak 2001 s.27, 181-183, Chull Jo et al. 2005. s.1)

### 3 U-PUTKI TYYPPISET PYSTYHÖYRYSTIMET

U-putkihöyrystimillä tarkoitetaan höyrystimiiä, joissa primääripiirin putket kulkevat höyrystimen läpi ja tekevät mutkan palaten samaan tasoon. Putket muistuttavat mutkien takia U-kirjainta. Tämä on havainnollistettu kuvassa 3.



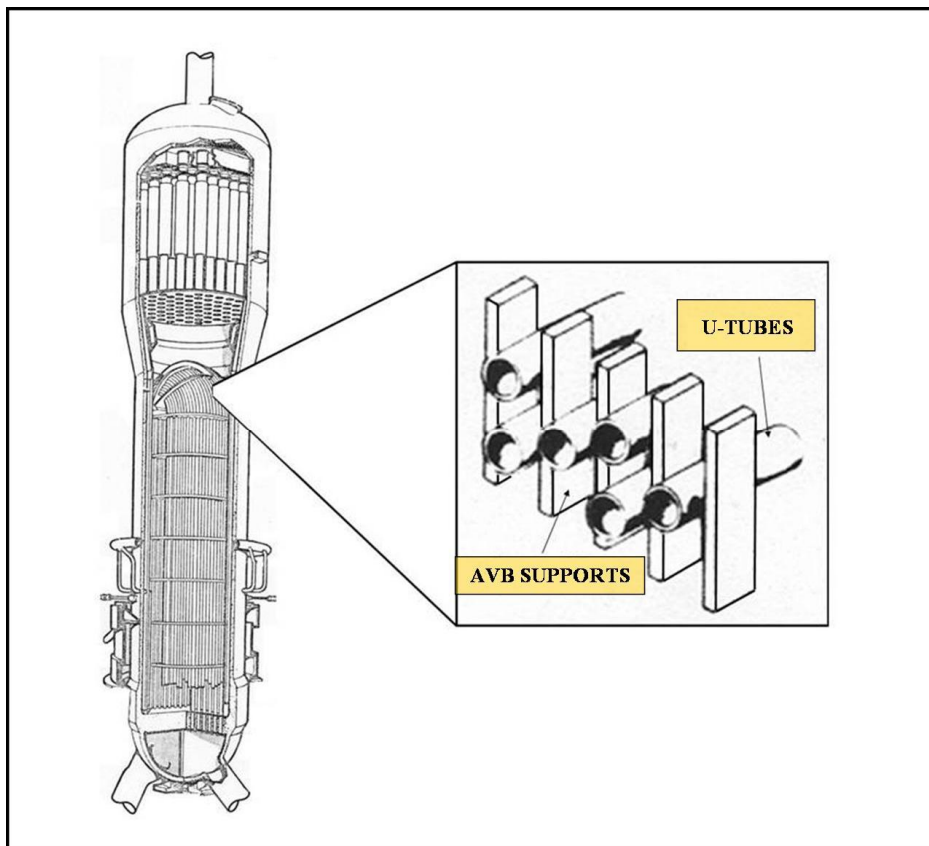
**Kuva 3.** Veden kierto eräässä U-putkipystyhöyrystimessä. Punainen nuoli kuvaa höyrytimeen tulevaa kuumaa primäärivettä ja sininen nuoli taas höyrystimestä lähtevää primäärivettä.



U-putkihöyrystimiä on kahden tyyppisiä: länsimaissa käytetty pystyhöyrystinmalli ja Neuvostoliitossa suunniteltu vaakahöyrystin. Tässä kappaleessa tutustutaan pystyhöyrystinmalliin, vaakahöyrystimeen perehdytään myöhemmin tässä työssä.

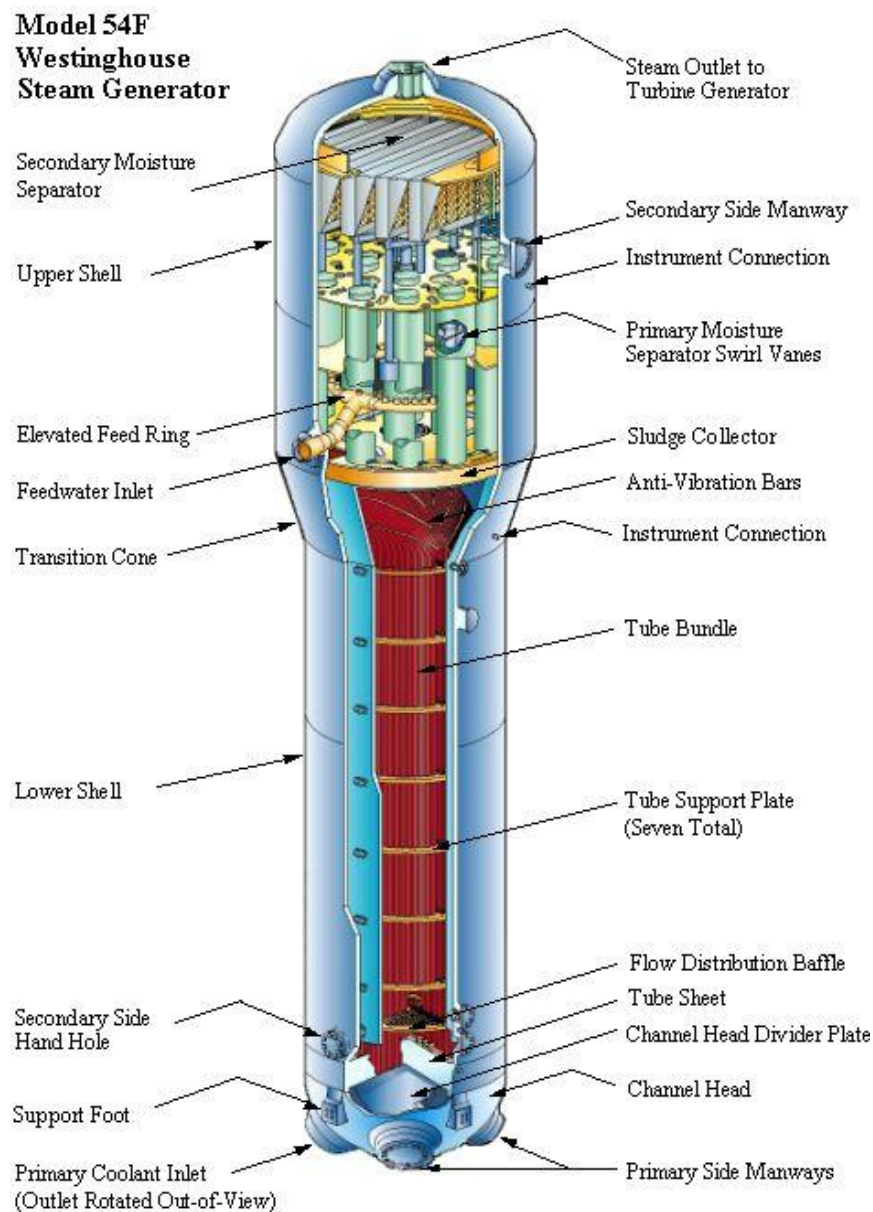
Eräs ratkaisu on Westinghousen usein käyttämä neljä höyrystintä reaktoria kohti, mutta esimerkiksi Combustion Engineering käyttää myös kahden höyrystimen ratkaisua. (Styrikovich et al. 1987 s. 4). Höyrystimien määrään vaikuttavat laitoskohtaiset ratkaisut kuten esimerkiksi reaktorin teho.

U-putkihöyrystimet tarvitsevat suuren lämmönsiirtopinta-alan joten ohuet putket, joissa primäärivesi kiertää, on porrastettu ja sijoitettu todella tiiviisti höyrystimen sisään. Putkien välisen etäisyyden suhde putken halkaisijaan on luokkaa 1,35-1,5. (Styrikovich et al. 1987 s. 16) Putkien sijoittelu on esitetty kuvassa 4.



**Kuva 4.** U-putkipystyhöyrystimen poikkileikkaus ja suurennos putkien sijoittelusta sekä värähtelynestolevyistä (AVB). (Pettigrew)

Sekundääripuolella muodostuva höyry kulkee höyrystimen yläosassa olevan höyrynerottimen läpi. Tästä höyry jatkaa matkaansa turbiinille, jossa se paisuu. Höyrystä erotettu vesi puolestaan syötetään suoraan takaisin syöttövesilinjaan, ja se kiertää uudestaan höyrystimen läpi. (Styrikovich et al. 1987 s. 16) Erään U-putkipystyhöyrystimen rakenne on esitetty kuvassa 5.



**Kuva 5.** Erään U-putkipystyhöyrystimen rakenne. (Nuclear Street)

Koska pystyhöyrystimissä höyrynerottimen poikkipinta-ala on pienempi kuin vaakahöyrystimissä, se vaatii suuremman höyrynerottimen korkeuden kuin vaakahöyrystin. Toisaalta pystyhöyrystimen korkeutta ei ole rajoitettu kuten vaakahöyrystimessä, joten korkeampi höyrynerotin on suhteellisen helppo asentaa höyrystimen yläpuolelle. (Styrikovich et al. 1987 s. 360) Tässä suhteessa höyrynerottimien tehokkuuden vertailu vaakahöyrystimiin on vaikeaa. Toisaalta pystyhöyrystin vaatii korkeamman höyrynerottimen, mutta koska sen toteutus on melko helppoa, ei ongelma tältä kannalta ole kovin paha. Toisaalta höyrynerotin voidaan myös rakentaa juuri tarvittavan kokoiseksi, mikä voi olla jopa etu vaakahöyrystimiin verrattuna.

Pystyhöyrystimissä vesi erotetaan höyrystä kahdessa vaiheessa: ensimmäisessä vaiheessa käytetään jakolevyjä, kalvoja tai sykloneita valmistajasta riippuen, esimerkiksi Westinghouse käyttää tässä vaiheessa sykloneita. Näitä erikoisratkaisuja tarvitaan avustamaan painovoimaa veden erotuksessa koska pienen poikkipinta-alan takia höyry on pakkaantunut pienemmälle alueelle. Toisessa vaiheessa käytetään höyrynerotus kanavia. (Styrikovich et al. 1987 s. 348,360)

U-putkihöyrystimen ongelmana on se, että sekundäärivesi pitää ensin lämmittää kiehumispisteeseen. Tähän kuluu jopa yli 15% lämmöstä. (Styrikovich et al. 1987 s. 16) Tämä heikentää laitoksen hyötysuhdetta, ja näin ollen taloudellista kannattavuutta.

Lämpö jakautuu putkissa hyvin epätasaisesti. Sisään tulevan primääriveden ja sekundääriveden lämpötilaero on suurimmillaan aivan putkien kuumahaaran alaosassa, eli heti primääriveden saavuttua höyrytimeen. Lämpötilaero tasoittuu noustaessa ensin kuumahaaraa ylöspäin ja se jatkaa edelleen laskuaan kun primäärivesi laskeutuu uudestaan alaspäin kylmähaaraa pitkin. Lämpötilaero primääriveden sisääntulossa on noin kolme kertaa suurempi kuin primääriveden poistuessa. Tämä johtaa siihen että kuumahaaran puolella höyrystyminen on voimakkaampaa. Lisäksi on huomionarvoista että kuumahaaran puolella höyrystyminen on voimakkainta höyrystimen alapäässä, kun taas kylmähaaran puolella höyrystimen tapahtuu voimakkaimmin höyrystimen yläpäässä. (Styrikovich et al. 1987 s. 16) Tämä johtaa lämmönsiirrolliseen epätasapainoon höyrystimessä, kun lämmönsiirto on voimakkaampaa lähempänä primääriveden sisääntuloa ja vastaavasti

heikompaa lähempänä primääriveden poistumista. Höyrystimen yläosassa tämä ero tasoittuu.

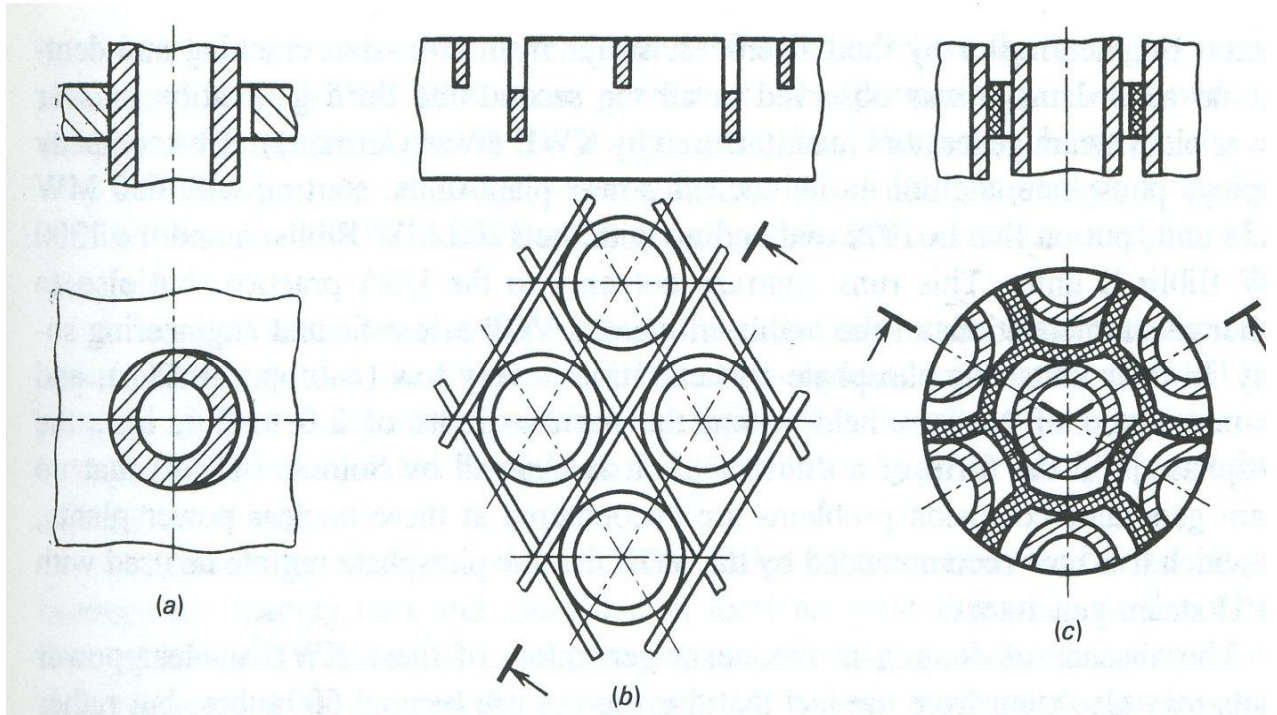
Lämpötilaeron vaihtelu U-putkihöyrystimissä kuumahaaran ja kylmähaaran välillä pyrkii aiheuttamaan putkissa liikettä vaakatasossa. Tätä varten höyrystimessä on 5-10 vaakatasoon asennettua tukea, jotka estävät putkien liikkeitä. Toisaalta nämä tuet myös haittaavat sekundääripiirin veden kiertoa höyrystimen läpi. (Styrikovich et al. 1987 s. 16) Näiden tukien rakenne vaihtelee valmistajasta riippuen ja erilaisilla ratkaisulla on vaikutusta paitsi sekundääriveden kiertoon höyrystimessä, myös höyrystimien korroosioaurioiden syntyyn.

Lämpötilan epätasainen jakautuminen aiheuttaa myös sekundääriveden epätasaisen jakautumisen höyrystimessä. Kohtiin joissa jäädyte ei kierrä kunnolla, kerääntyy epäpuhtauksia jotka aiheuttavat korroosioaurioita. Tämä on ollut eräs pahimmista ongelmista pystyhöyrystimien käytössä, varsinkin ennen vuotta 1972 rakennetuissa U-putkipystyhöyrystimissä. (Styrikovich et al. 1987 s. 16-17) Pienet epätasaisuudet veden jakautumisessa ovat odotettavia eivätkä aiheuta suurta ongelmaa. Suuret vaihtelut veden jakautumisessa voivat kuitenkin olla paha ongelma höyrystimen kestävyydelle.

Uusissa U-putkipystyhöyrystimissä on sisäänrakennettu esilämmitin höyrystimen kylmähaaran puolella. Tämä tasaa lämpötilaeroa höyrystimessä. Keskilämpötilan noustessa saadaan myös korkeampi höyrinpaine ja -lämpötila. (Tong & Weisman 1996. s. 520-521)

Kokeellisesti on kuitenkin havaittu, että veden haihtuminen ei nosta korroosioaineiden pitoisuutta lämpöpinnoilla yli 10 kertaiseksi normaalin käytön aikana. Suuremmat pitoisuudet ovat mahdollisia vain, jos syntyisi todella paksuja kerrostumia tai veden kierrossa esiintyisi häiriöitä. Tämän takia korroosiovahinkoja löytyy käytännössä vain kapeista väleistä, kuten putkien ja putkitukien välistä tai paksuista korroosioainekerrostumista vaakasuorilta pinnoilta. (Styrikovich et al. 1987 s. 17) Kun korroosioaurioiden oletettu esiintymisalue voidaan näin rajoittaa pienemmäksi, on mahdollista keskittää korroosion torjuntatoimet, kuten rakenteiden vahvistaminen nimenomaan näiden alueiden suojaamiseen.

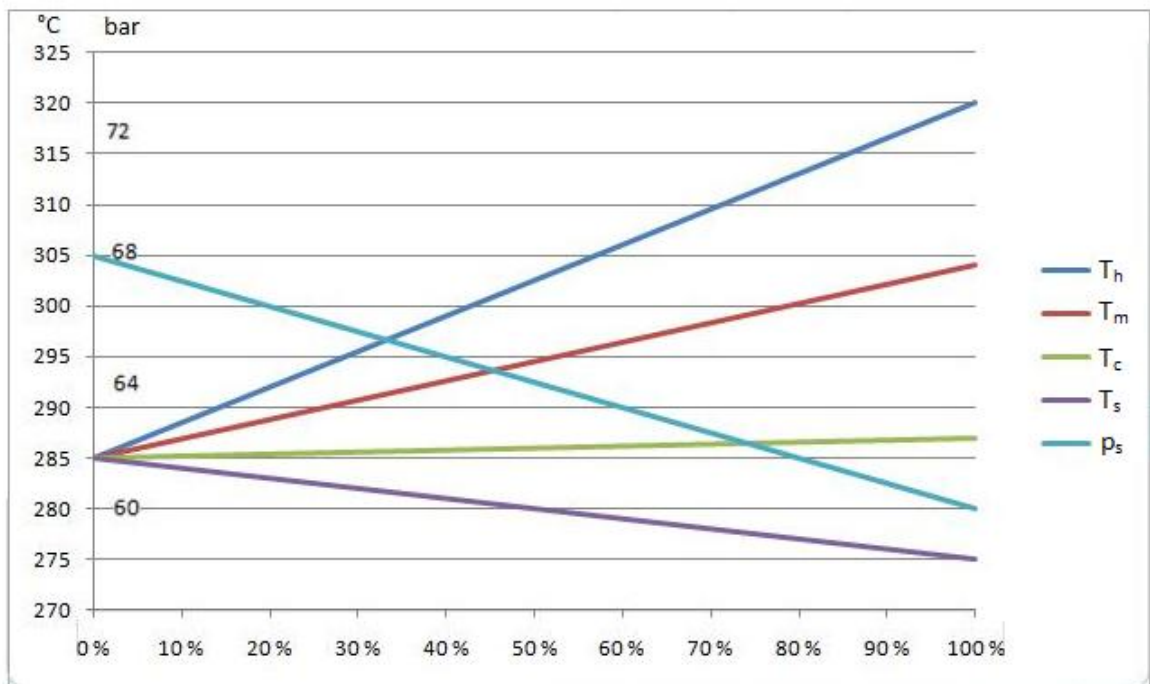
Toinen pystyhöyrystimissä ilmenevä kulumisongelma on lommoutuminen (denting). Tämän tyyppisiä kulumia aiheutuu, kun höyrystimen putki painautuu tiukasti tukilevyssä olevan putkireiän toista laitaa vasten. Putki syö hitaasti tukilevyä ja putken reikä muuttuu epäkeskoksi. Tämä aiheuttaa kulumaa sekä putkessa että tukilevyssä. Tästä syntyy lisää korroosioaineita jotka pakkautuvat aukkoon. Aukko saattaa tukkiutua jolloin vesi ei enää pääse virtaamaan sen läpi. Tämän seurauksena korroosioaineiden tiheys kasvaa ja korroosio kiihtyy entisestään. Koloontumista on tavattu ainoastaan Westinghouse-tyyppisissä tukilevyissä. Jotkut valmistajat, kuten Siemens, käyttävät tukirakenteena risteytyviä terästankoja joissa kyseistä ongelmaa ei esiinny. Toinen mahdollinen selitys on kestävämmän putkimateriaalin käyttö etenkin vanhemmissa höyrystimissä. Myös CANDU-laitokset ovat vältäneet vastaavat korroosio-ongelmat. Nykyään myös Westinghouse käyttää paremmin korroosiota kestävästä materiaalista uusimmissa höyrystimissä. Myös läpivirtaushöyrystimissä lommoutuminen on mahdollinen ongelma. Samoin kuin Siemens, myös Babcock ja Wilcox on onnistunut välttämään nämä ongelmat. Koska uudemmissa laitoksissa myös Westinghouse on siirtynyt käyttämään kilpailijoidensa suosimia ratkaisuja jotka ehkäisevät lommoutumista, voidaan tätä vikaa pitää lähinnä historiallisen erona, jolla ei ole vaikutusta tämän päivän uusien laitosten vertailussa. (Styrikovich et al. 1987 s. 18-20) Kuvassa 6 on esitetty Westinghousen vanhempi tukilevyratkaisu, sekä Siemensin ja Babcock & Wilcox tukilevyratkaisut. Tukilevyjen paikka höyrystimessä näkyy kuvassa 5.



**Kuva 6.** Westinghousen vanha tukilevyratkaisu (a), Siemensin kehittämä tukilevyratkaisu (b) sekä Babcock & Wilcox tukilevyratkaisu (c).

U-putkihöyrystimissä lämmönsiirtopinta-ala pysyy normaalin käytön aikana vakiona, joten niiden säädössä on turvauduttava kompromissiin, jossa sekä primääripiirin lämpötila että sekundääripiirin paine vaihtelevat hieman. Tämä on epäedullisempi, kuin OT-höyrystimissä mahdollinen säätö jossa sekä primääripiirin keskilämpötila että sekundääripiirin paine ovat vakioita. (Kyrki-Rajamäki. 2010. s.6-9) Sama ongelma koskee tässä tapauksessa myös vaakahöyrystimiiä. Kuvassa 7 on esitetty käytännön esimerkki U-putkihöyrystimellä varustetun laitoksen primäärilämpötilan ja sekundääripaineen vaihtelu kuorman suhteen. Optimaallisessa tilanteessa sekä sekundääripuolen paine,  $p_s$  että primääripiirin keskilämpötila,  $T_m$  olisivat muuttumattomia kaikilla kuormilla.

Vaikka EPR-tyyppisessä (European Pressurized Reactor) laitoksessa onkin U-putkihöyrystimet, on sen säätö poikkeuksellinen. Kun tehotaso saavuttaa 60% säädetään laitosta niin että primääripiirin lämpötila pysyy vakiona. Tämä mahdollistaa vuorokausisäädön laitoksella. (Areva 2006)



**Kuva 7.** Lämpötilojen ja paineen riippuvuus kuormasta U-putkihöyrystimillä varustetussa esimerkkilaitoksessa. Y-akselilla lämpötila [°C] sekä paine [bar], X-akselilla kuorma [%].  $T_h$  on sydämen ulostulolämpötila,  $T_m$  primääripiirin keskilämpötila,  $T_c$  sydämen sisäänmenolämpötila,  $T_s$  sekundääripiirin kyllästyslämpötila ja  $p_s$  on sekundääripiirin paine.

### **3.1 Käyttö maailmalla**

U-putkipystyhöyrystin on maailmalla selkeästi käytetyin höyrystintyyppi painevesilaitoksissa. Vuonna 2010 on toiminnassa 208 ydinvoimalaitosyksikköä, joissa käytetään U-putkipystyhöyrystimä. Tämä vastaa lähes 80% toiminnassa olevista painevesilaitoksista. (World Nuclear Association. 2010b) Tämä johtuu osin siitä että tämä on myös ainoa höyrystintyyppi jota useampi valmistaja hyödyntää laitoksissaan.

Perinteisesti merkittävimmät valmistajat ovat olleet Westinghouse Electric ja Combustion Engineering. Lisäksi monet yhtiöt valmistavat höyrystimä edellä mainittujen yhtiöiden lisenseillä. (Styrikovich et al. 1987 s. 16). Muita valmistajia voidaan mainita muun muassa eurooppalainen Areva, japanilainen Mitsubishi ja etelä-korealainen KOPEC.

### **3.2 Käyttö Suomessa**

Suomessa ei tällä hetkellä ole toiminnassa yhtään pystyhöyrystintä. Olkiluotoon valmistuu EPR-tyyppinen laitos, jossa on käytössä neljä U-putkipystyhöyrystintä. Lisäksi kolmessa, yhteensä kuudesta TVO:n ja Fennovoiman harkitsemasta uudesta reaktorityypistä, on käytössä pystyhöyrystimet. Loput vaihtoehdot ovat kiehutusvesilaitoksia. (TVO, Hyvärinen 2009)

### **3.3 Vaikutus turvallisuuteen**

U-putkipystyhöyrystimä on käytetty selvästi enemmän kuin muita höyrystintyyppijä. (World Nuclear Association. 2010b). Tästä johtuen voidaan olettaa että niistä on myös kertynyt eniten käyttökokemuksia.

Uusissa pystyhöyrystimissä on otettu mallia vaakahöyrystimistä ja pyritty lisäämään sekundääripuolen vesimäärää turvallisuuden lisäämiseksi. Nämä uudetkaan mallit eivät tosin yllä veden määrässä vaakahöyrystimien tasolle. (Vihavainen, Hyvärinen 2001 s.27)



### 3.4 Uuden sukupolven pystyhöyrytimet

Esimerkkinä uuden sukupolven U-putkipystyhöyrytimistä toimii Arevan EPR-laitoksen höyrytin. Se perustuu Arevan Vanhempaan N4-höyrytimeen. (UK-EPR. s.1)

EPR-höyrytimessä kaikki syöttövesi johdetaan kylmähaaran puolelle ja 90% takaisinkierrätetystä vedestä kuumahaaranpuolelle. Käytännössä tämä tapahtuu ohjaamalla takaisinkierrätysvettä oikein höyrytimen ulkokuoren ja sisemmän kuoren välissä olevan alavirtaustilan kautta ja lisäämällä jakolevy, joka erottaa kylmähaaran ja kuumahaaran toisistaan aina putkien tukipohjasta kuudenteen tukilevyyn asti. Tämä tehostaa lämmönsiirtoa ja mahdollistaa sekundääripiirin paineen nostamisen 3 baarilla. Tämän järjestelmän etuna on myös se, että putkiin ei kohdistu ristivirtauksia eikä putkien värinää esiinny. Tämä järjestelmä ei myöskään rajoita huoltomiesten mahdollisuutta tarkastaa ja huoltaa höyrytintä. (UK-EPR. s.1)

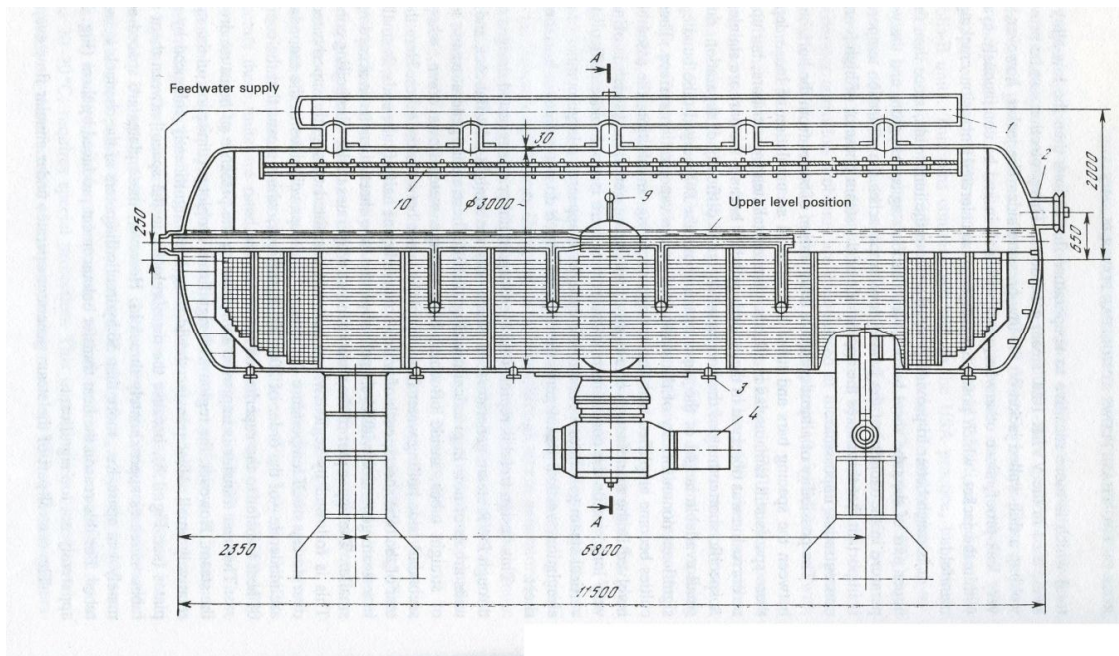
EPR-höyrytimen sekundääripuolen vesimäärää on kasvatettu N4-höyrytimeen verrattuna. Arevan vanhoissa N4-höyrytimissä sekundääripuolen tilavuus oli 61,5 kuutiometriä, kun EPR-höyrytimen tilavuus on 82,3 kuutiometriä. (UK-EPR s.6)

Myös höyryntuotto höyrytintä kohti on suurempi, 2200 tonnia tunnissa, kun vanhoissa Westinghousen U-putkipystyhöyrytimissä jäädytään 1850 tonniin tunnissa. Tosin läpivirtaushöyrytimet voivat tuottaa 2470 tonnia höyryä tunnissa. (UK-EPR, Kyrki-Rajamäki 2010. s.28-31)

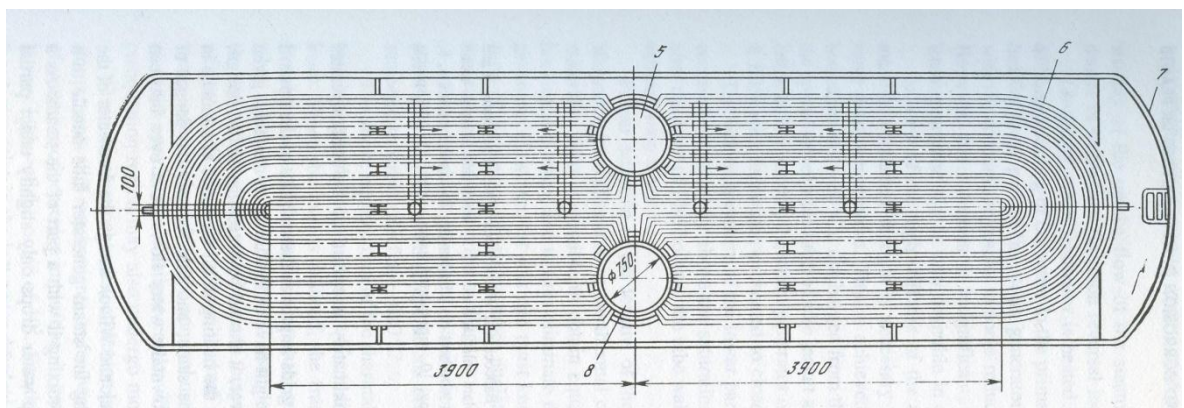
## 4 VAAKAHÖYRYTIMET

Vaakahöyrytin on Neuvostoliitossa kehitetty höyrytinratkaisu. Se on myös U-putkihöyrytin, mutta edellä käsitellystä länsimaisesta pystyhöyrytimeestä poiketen se sijoitetaan laitokseen vaaka-asentoon. Näitä höyrytimiä käytetään neuvostoliittolaisissa painevesilaitoksissa, joita on kahta eri tyyppiä: VVER-440 ja VVER-1000 (Vodo-vodjanoi energetitšeski rektor).

VVER-440 ja VVER-1000 tyyppisten höyrystimien erona on VVER-1000 -tyypin suurempi koko ja lämmönsiirtoputkien pienempi halkaisija. VVER-440 laitoksissa höyrystimiä on kuusi ja VVER-1000 laitoksissa neljä kappaletta. (Styrikovich et al. 1987 s. 3-4) Lisäksi VVER-1000 laitoksissa reaktorin teho on suurempi. Koska höyrystimiä on vähemmän ja reaktorin teho on suurempi, tarvitaan höyrystimeen suurempi lämmönsiirtopinta-ala. Suurempi lämmönsiirtopinta-ala saadaan kun pienennetään höyrystimen putkien halkaisijaa ja suurennetaan höyrystimen kokoa, jolloin siihen mahtuu enemmän putkia. Vaakahöyrystimen sivuprofiili on esitetty kuvassa 8. Kuvassa 9 on esitetty vaakahöyrystimen U-putket ylhäältä päin.



**Kuva 8.** Vaakahöyrystimen sivuprofiili (Styrikovich et al. 1987 s.22)



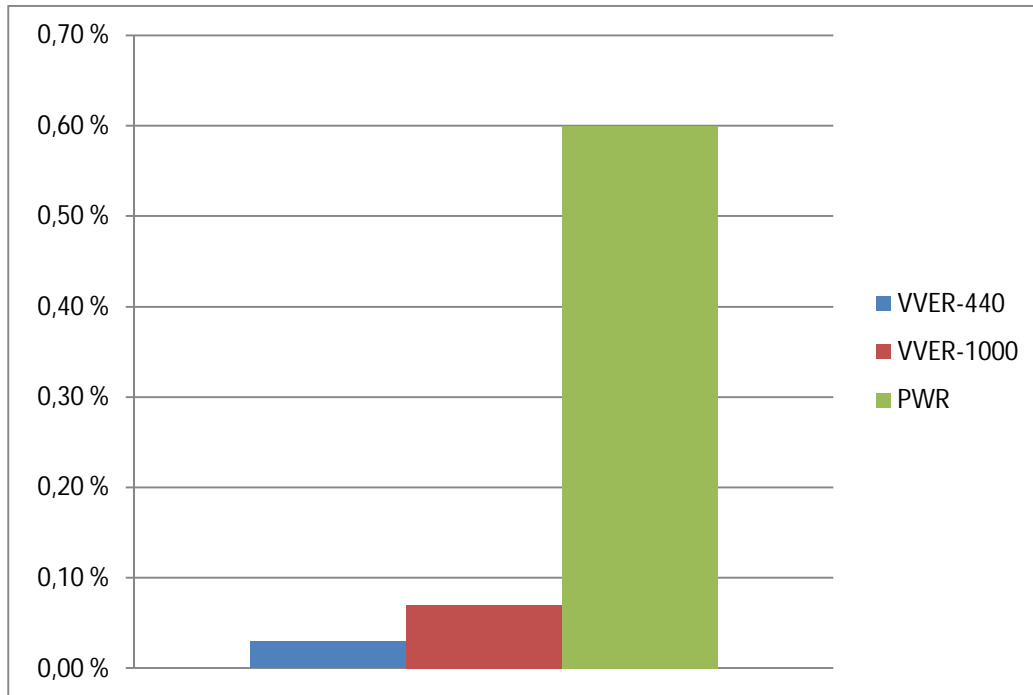
**Kuva 9.** Vaakahöyrystimen U-putket. (Styrikovich et al. 1987 s.23)

VVER-440 tuottaa selkeästi vähemmän höyryä höyrystintä kohti, vain 450 tonnia tunnissa, kun taas VVER-1000 tuottaa 1470 tonnia tunnissa. Molemmat jäävät silti vielä kauaksi pystyhöyrystimistä. Myös höyrynpaine jää VVER-440 laitoksissa alhaisemmaksi, 48 baariin, kun VVER-1000 laitoksessa se on 63 baaria. (Kyrki-Rajamäki 2010. s.28-31, Styrikovich et al. 1987 s. 3,5)

Vaakahöyrystimien sijoittelu suojarakennuksen sisään on haastavaa. Ne vievät enemmän pohjapinta-alaa kuin pystyhöyrystimet. (Styrikovich et al. 1987 s. 21)

Vaakahöyrystimissä tukilevyjen pinnoille ei pääse kertymään paksumia korroosioainekerroksia. (Styrikovich et al. 1987 s. 20) Tämä korroosioaineiden vähyys johtuu siitä että toisin kuin pystyhöyrystimissä, vaakahöyrystimissä tukilevyt voidaan asentaa virtauksen suuntaisesti.

Vaakahöyrystimissä on havaittu että höyrystimen putkien korjaustarve on keskimäärin 0,05% putkista käyttövuotta kohden. Vastaava luku länsimaisissa pystyhöyrystimissä on keskimäärin 0,6%. (Vihavainen, Trunov et al. 2001 s.15) Kuvassa 10 on esitetty keskimääräinen rikkoutuneiden putkien osuus käyttövuotta kohti pylväsdiagrammina, ennen vuotta 2001.



**Kuva 10.** Korjattujen höyrystinputkien määrä (%) käyttövuotta kohden eri VVER-laitoksilla ja länsimaisilla painevesilaitoksilla. (Vihavainen, Trunov et al. 2001 s.15)

Poikkeuksellisissa tilanteissa, kuten jäähdytteen menetyksen yhteydessä, voi veden pinta vaakahöyrystimissä heilahtella. Kun vedenpinnan taso heilahtelee vaakahöyrystimissä, joutuu osa putkien tukilevyistä kokemaan suhteellisen suuria lämmönvaihteluita kun ne ovat osittain kosketuksissa veden ja osittain höyryn kanssa. Nämä alueet kokevat kovaa rasitusta ja niitten kestävyys on kiinnitettävä erityistä huomiota. Ratkaisuna voidaan käyttää ylimääräistä päällyskerrosta joka hitsataan levyyn. Tämäkään ratkaisu ei tosin ole ongelmaton. Jos hitsi pääsee vuotamaan levyn ja vahvistavan päällyskerroksen väliin, vesi höyrystyy siellä ja voi aiheuttaa pahoja korroosioaurioita. VVER-1000-laitoksissa tukilevyt kestävät lämmönvaihteluita selvästi paremmin kuin vanhemmat VVER-440-laitosten tukilevyt. (Styrikovich et al. 1987 s. 20-21) Tukilevyjen raju lämmönvaihtelu on pystyyn asetettujen tukilevyjen heikkous. Toisaalta kuten korroosioaurioiden määrästä käyttöhistorian aikana voidaan havaita, on tämä ratkaisu aiheuttanut selkeästi vähemmän korroosioaurioita kuin vaakatasossa olevat tukilevyt pystyhöyrystimissä.

Putkivälien tukkeutuminen on melko vähäistä vaakahöyrystimissä. Tukkeutumisprosentti on yleensä selkeästi alle 1%, pahimmissakin tapauksissa on jääty alle 8%. (Vihavainen, Hyvärinen 2001 s.27) Pieni määrä tukittuja putkia ei juurikaan haittaa höyrystimen

toimintaa, koska putkien määrä on suuri ja yhden putken osuus lämmönsiirrosta pieni. Jos tukittujen putkien määrä nousee kuitenkin suureksi, vaikuttaa se jo höyrystimen lämmönsiirtoon. Putket voivat tukkeutua primääripiirin epäpuhtauksien takia, tai ne voidaan myös tarkoituksella tukkia jos yksittäisissä putkissa havaitaan primääri-sekundääri-vuoto.

Vedenpinnan alapuolelle on asetettu rei'itetty levy, joka jakaa höyryn tasaisesti koko höyrystimen alueelle. Vaakahöyrystimissä vesi erotetaan höyrystä kahdessa vaiheessa: ensimmäisessä vaiheessa vesi erotetaan höyrystä yksinkertaisesti painovoiman avulla. Toisessa vaiheessa höyry ohjataan aaltoilevien höyrynerotuskanavien läpi. Koska ensimmäinen erotusvaihe tapahtuu tilassa joka jää höyrystimen vedenpinnan ja höyrynerotuskanavien väliin, on höyrystimen pinnankorkeudella suuri vaikutus höyryn kosteuteen. Höyrynerottimelle jää melko pieni tila höyrystimen yläosaan. Pystyhöyrystimissä korkeutta voidaan tarvittaessa lisätä, mutta vaakahöyrystimissä se on hankalampaa ja kasvattaisi entisestään höyrystimen kokoa. Vaakahöyrystin on kokonsa puolesta hankala sijoittaa suojarakennukseen. Tästä johtuen tehokkaan höyrynerottimen mahtuminen suhteellisen pieneen tilaan vaakahöyrystimien yläosassa on ongelma. (Styrikovich et al. 1987 s. 3,21,348,357,359) Tätä asiaa käsiteltiin jo pystyhöyrystimien kohdalla. Toisaalta vaakahöyrystimissä höyrynerotus tapahtuu tehokkaammin, erottimen suuremman poikkipinta-alan johdosta, mutta erottimen koon muokkaus ei ole mahdollista koska höyrystimen korkeus on rajattu.

#### **4.1 Käyttö maailmalla**

VVER-440 ja VVER-1000 ovat yleisimmin käytettyjä ydinvoimalaratkaisuja entisen Neuvostoliiton alueella. Pidempiaikaisia vaakahöyrystimiä on käytössä pääasiassa itäisen Euroopan maissa. Kahdeksan vaakahöyrystimiä pidemmän aikaa käyttänyttä maata ovat: Venäjä, Armenia, Bulgaria, Tsekin Tasavalta, Suomi, Unkari, Slovakia ja Ukraina. (Vihavainen, Hyvärinen 2001 s.17, Styrikovich et al. 1987 s. 3)

2000-luvulla VVER-laitokset ovat leviämässä myös uusille alueille. Kiinaan on rakennettu Tianwaniin kaksi VVER-yksikköä ja Iraniin Bushehriin kaksi yksikköä. Lisäksi VVER-

laitoksia on suunnitteilla Intiaan ja Turkkiin. (Power-Technology 2010a, Power-Technology 2010b, World Nuclear News 2009, World Nuclear News 2010)

## **4.2 Käyttö Suomessa**

Suomessa on käytössä kaksi VVER-440 laitosta Fortumilla Loviisassa. Nämä laitokset ovat valmistuneet 1977 ja 1980. Vaikka niissä käytetäänkin myös monia länsimaisia ratkaisuja, ovat höyrystimet silti perinteisiä vaakahöyrystimiä. Toistaiseksi näiden laitosten käyttöluvut ovat voimassa vuosiin 2027 ja 2030 asti. (Valtioneuvoston päätös 6/330/2006)

## **4.3 Vaikutus turvallisuuteen**

Vaakahöyrystimet kestävät kohtalaisen hyvin melko vakaviakin käyttöhäiriöitä, kuten pitkiä sähkökatkoksia laitoksella, jäähdytteenmenetysonnettomuuksia tai suuria primääri-sekundääri -vuotoja. Tämä johtuu sekundääripuolen suuresta vesimäärästä. (Vihavainen, Hyvärinen 2001 s.27)

Vaakahöyrystimissä primäärikollektorin on pultattu paikalleen. Tämä ratkaisu lisää suuren primääri-sekundääri –vuodon riskiä. Tähän liittyvää käyttökokemusta on kerätty runsaasti ja ainoaksi toimivaksi keinoksi on todettu huolellinen tarkastus ja huoltotöiden teko. Myös rakenteellisten muutosten mahdollisuutta on tutkittu ja siitä saattaa muodostua eräs keino tulevaisuudessa. (Vihavainen, Hyvärinen, Misak 2001 s.27, 181-183)

Suuren primääri-sekundääri –vuodon sattuessa on käyttöhenkilökunnalla suuri vastuu sen hallinnasta. VVER-440-laitoksissa vaurioitunut höyrystin voidaan erottaa primäärikerrosta. VVER-1000-laitoksissa sekä länsimaisia höyrystimiä käyttävissä laitoksissa, joissa höyrystimiä on vähemmän, tätä ei enää voida tehdä. (Vihavainen, Misak 2001 s.185)

Vaakahöyrystimien heikkous turvallisuusnäkökohdasta, on niiden heikko kyky jäähdyttää reaktoria pelkällä luonnonkierrolla. Monissa vaakahöyrystimiä käyttävissä maissa tätä ei kuitenkaan lueta vakavaksi puutteeksi, koska se ei vaikuta niiden

suunnitteluperusteonnettomuuksiin. Suomi on tässä tapauksessa poikkeus koska Suomessa ATWS (Anticipated Transient Without Scram, odotettavissa oleva käyttöhäiriö, jossa pikasulku on estynyt) luetaan myös suunnitteluperusteiseksi onnettomuudeksi. (Vihavainen, Hyvärinen 2001 s.19) Vaakahöyrystimillä lämpöä voidaan yhä siirtää pelkällä luonnonkierrolla, mutta se ei yksin riitä reaktorin jäädyttämiseen, jos esimerkiksi pääkiertopumput menetetään normaalin käytön aikana. Jos pikasulku ei tällaisessa tilanteessa toimi, alkaa primääripiirin lämpötila nousta nopeasti. Tämä voi pahimmillaan johtaa paineen kasvamiseen primääripiirissä yli kriittisen rajan, jolloin paineenalennusventtiilit aukeavat ja primäärivettä purkautuu höyrynä suojarakennuksen sisään.

#### **4.4 Uuden sukupolven vaakahöyrystimet**

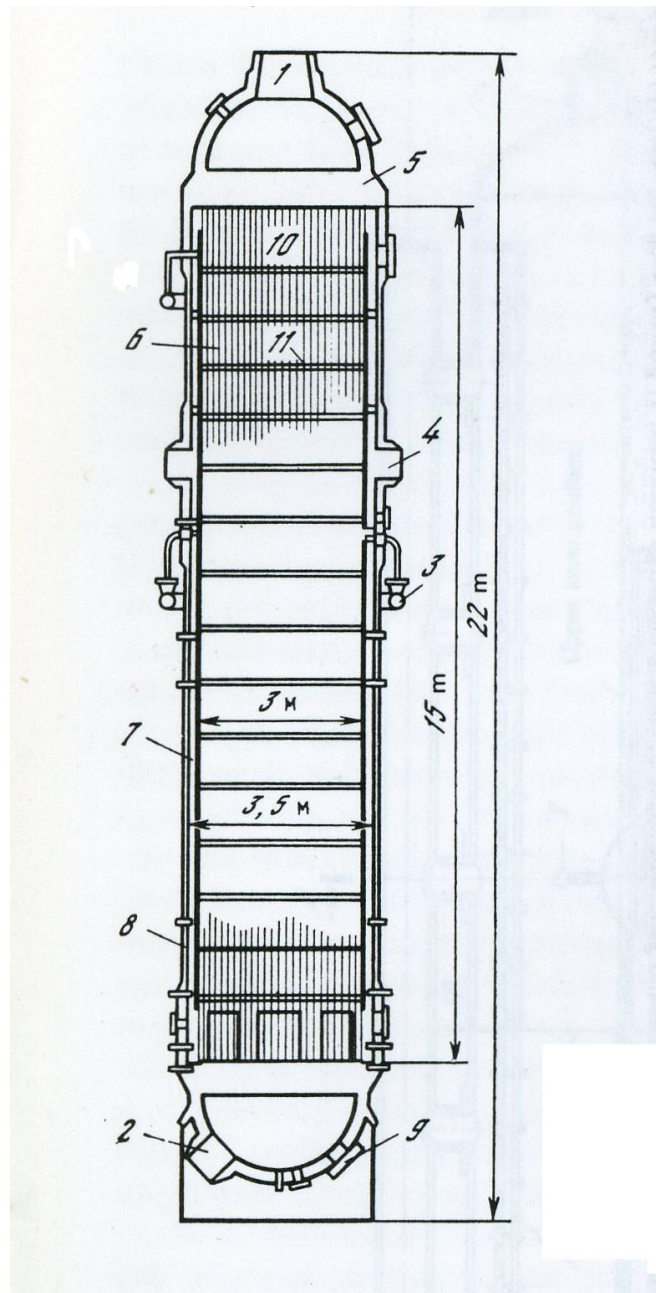
Venäläinen Atomstroyexport on kehittänyt uuden VVER-1200 -laitostyyppin, joka tunnetaan nimellä AES-2006. Se on suunniteltu VVER-1000 -laitoksen pohjalta. Suurimmat muutokset ovat kohotettu teho, pidempi käyttöaika ja parannettu hyötysuhde. Näillä näkymin ensimmäinen AES-2006 aloittaa toimintansa 2012 tai 2013. (World Nuclear Association. 2010c)

Atomstroyexportilla on tällä hetkellä kehitteillä uusi VVER-1500 painevesilaitostyyppi, joka on myös kehitetty VVER-1000 laitoksen pohjalta. Uudessa laitoksessa tulee olemaan neljä vaakahöyrystintä. Aivan kuten pystyhöyrystintenkin kohdalla, on myös uusia vaakahöyrystimiä pyritty parantamaan muun muassa nostamalla höyryn painetta, muuttamalla putkinippujen pohjaratkaisua, lisäämällä ekonomaiseriä ja pienentämällä putkien kokoa. (Stanislav et al.)

### **5 LÄPIVIRTAUSHÖYRYSTIMET**

Läpivirtaushöyrystimet ovat myös länsimaisia höyrystimiä. Ne ovat pystyasennossa, samoin kuin U-putkipystyhöyrystimet, mutta ovat rakenteeltaan hyvin erilaisia. Babcock & Wilcox on ainoa yhtiö joka on valmistanut kaupallisia läpivirtaushöyrystimiä. Tästä syystä läpivirtaushöyrystimiin viitataan usein myös pelkästään B&W-höyrystiminä.

Läpivirtaushöyrytimissä lämmitysputket eivät tee mutkaa kuten U-putkihöyrytimissä, vaan kulkevat suorina höyrytimen läpi. Tämän vuoksi lämmönsiirto jakautuu tasaisesti höyrytimen poikkipinta-alalle. Primäärivesi kulkee vain yhden kerran höyrytimen läpi, tullen sisään höyrytimen yläpäästä ja poistuen alhaalta. (Styrikovich et al. 1987 s. 21,24) Tästä tulee höyrytintyyppin nimitys. läpivirtaushöyrytimen poikkileikkaus on esitetty kuvassa 11.



**Kuva 11.** Babcock & Wilcoxin valmistama läpivirtaushöyrytin. (Styrikovich et al. 1987 s. 24)



Läpivirtaushöyrystimissä putkien määrä on selkeästi suurempi, 15 500 kappaletta, koska putket kulkevat vain yhteen suuntaan höyrystimessä. Vastaavasti esimerkiksi Westinghousen Yhdysvaltoihin toimittamien höyrystimien putki määrät vaihtelevat 3200 ja 5600 välillä. (Wade 1995 s.2) Lisäksi putkimäärän eroon vaikuttaa se että Bacoock & Wilcox -laitoksissa käytetään vain kahta höyrystintä, kun taas Westinghouse käyttää kahdesta neljään höyrystintä.

Läpivirtaushöyrystimen alaosassa, noin alimman kolmanneksen matkalla, kiehua tapahtuu kuplakiehuntana. Höyrystimen yläosassa tapahtuu filmikiehua. Tämän osan yläpuolella höyryn ja lämmitysputkien lämpötila ero on alhainen, mutta höyry saadaan silti lievästi tulistettua. (Styrikovich et al. 1987 s. 21,24) Tulistettu höyry on eräs läpivirtaushöyrystimien suurimmista eduista.

Läpivirtaushöyrystimissä sekundääripiirin vesi esilämmitetään ennen varsinaista höyrystintä. Tämä tapahtuu sekoittamalla syöttöveteen hiukan höyryä. Näin ollen syöttöveden lämpötila on jo höyrytimeen tultaessa lähellä kiehumispistettä. Tämä lisää sekundääripiirin virtauksen vakautta ennen kaikkea alhaisilla kuormilla. (Styrikovich et al. 1987 s. 24-25)

Kuitenkin alhaisemmat tehokuormat aiheuttavat joitakin ongelmia. Kun kuorma vähenee, kasvaa tulistimena toimivan höyrystimenosan osuus ja näin ollen myös lämpöputkien lämpötila nousee. Tulistetun höyryn lämpötilannousu on samaan aikaan merkityksettömän pientä. Tämän seurauksena pinnoille syntyy lämpörasitusta. Tämän vuoksi läpivirtaushöyrystimet vaativat tasaisen kuorman. (Styrikovich et al. 1987 s. 25). Lämpörasitus ei lyhytaikaisena vaaranna höyrystimateriaalien kestävyttä, mutta pitkällä aikavälillä se voi muodostaa uhan materiaalien kestävyydelle. Tämä rajoittaa läpivirtaushöyrystimien soveltuvuutta esimerkiksi vuorokausisäättöön.

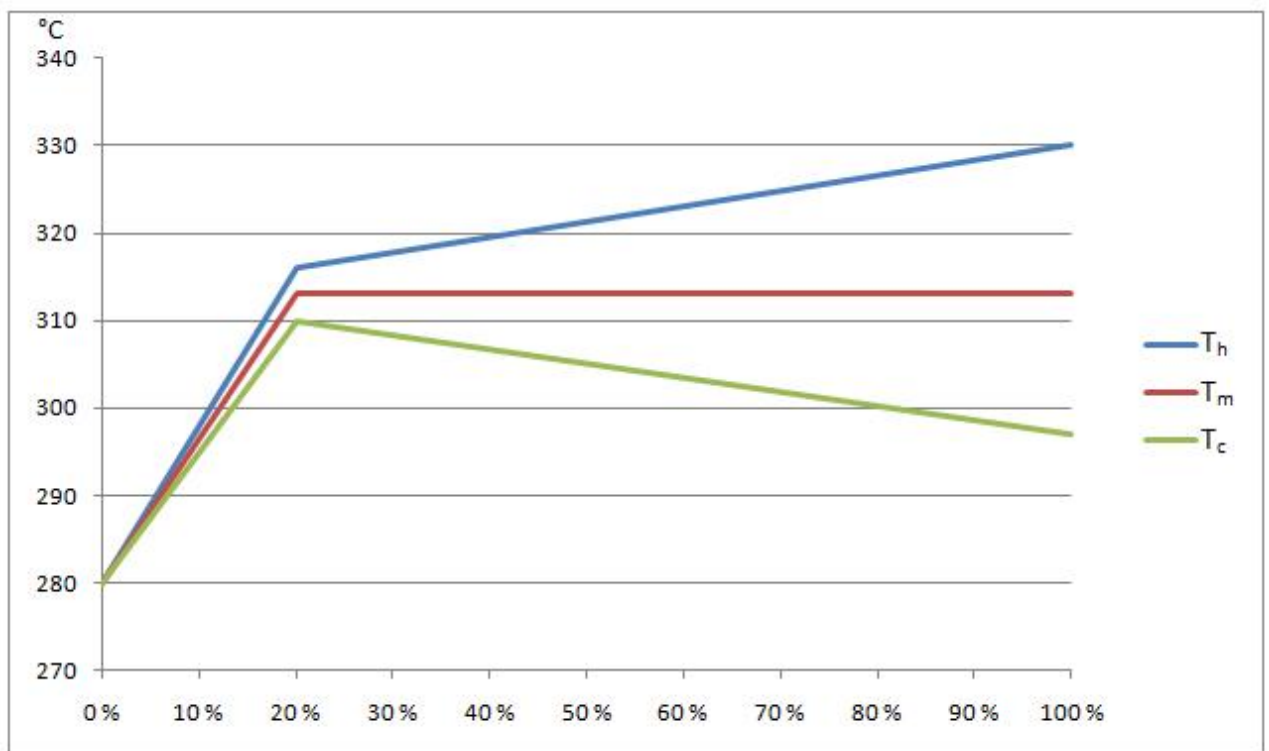
Läpivirtaushöyrystimissä on suuri mahdollisuus muodostua materiaalia korrosoivien aineiden keskittymiä höyryn läpivientiaukkoihin, joissa tulistettu höyry laajenee. (Styrikovich et al. 1987 s. 13) Korroosio-ongelma ei kuitenkaan ole yhtä paha kuin vanhoissa U-putkipystyhöyrystimissä.

Babcock & Wilcox –höyrytimissä ei esiinny samanlaisia lommoutumisongelmia kuin Westinghousen U-putkipystyhöyrytimissä. Tämä johtuu siitä että Babcock & Wilcox käyttää putkissaa ”kolmisiivekkeistä” tukirakennetta, joka on vielä joustavampi kuin Siemensin käyttämä risteytyvien terästankojen malli. Tämä malli laajenee tarvittaessa tehokkaasti ja toisaalta pitää kosketuspinnan putken ja levyn välissä minimissä. Lommoutumisen lisäksi tämä ehkäisee myös korroosioainekeskittymiä aiheuttavien höyrytaskujen syntymistä. (Styrikovich et al. 1987 s. 20) Tosin kuten jo edellä mainittiin, on lommoutumisongelma lähinnä vanhempien höyrytimien ongelma. Kyseessä on kuitenkin tukilevyratkaisu joka on mahdollista asentaa molempiin höyrytimimalleihin, joten kyseinen ero pätee lähinnä vanhempien höyrytimien kohdalla.

Läpivirtaushöyrytimin asettaa vedenlaadulle tiukat ehdot, monien korroosioaineiden jakautumisen takia. Kun vesi alkaa höyrystyä, saattaa viimeisiin vesipisaroihin keskittyä suuria määriä korroosioaineita. Kuitenkin jos epäpuhtauksien pitoisuus on pienempi kuin sen liukoisuus höyryyn, ei synny lainakaan korroosioaineiden keskittymiä. Käytössä on todettu, että hyvin puhtaalla syöttövedellä käytettäessä OT–höyrytimien korrosoituminen on hyvin pientä. Toisin kuin U-putkihöyrytimissä, kuplakiehua-alueella ei esiinny lainkaan korroosioaineiden kasaantumia kun syöttövesi on tarpeeksi puhdasta. Kuitenkin läpivirtaushöyrytimissä höyryn riittävän puhtauden takaaminen on vaikeampaa ja kalliimpaa kuin U-putkihöyrytimissä, joissa puhdistus saadaan helposti hoidettua alaspuhallusjärjestelmällä. (Styrikovich et al. 1987 s. 25-27). Kun nykyisissä laitoksissa vesikemian hallinta on parantanut, on syöttöveden laadun hallinta helpompaa ja tarkempaa. Näin ollen läpivirtaushöyrytimillä voidaan helposti välttää korroosioaineiden kasautumista ainakin normaaleissa käyttötilanteissa.

Tilanteet joissa putkinipun ja kuoren lämpötilaero on suuri, tässä tapauksessa kymmeniä asteita, voivat tuottaa ongelmia läpivirtaushöyrytimille. Tällaisessa tilanteessa muodostuu puristusvoima, joka saattaa ylittää materiaalien kestävyden kriittisen rajan. Tämäongelma on ratkaistavissa tietyillä muutoksilla höyrytimen rakenteessa, kuten pienentämällä kuoren jäykkyyttä. Ratkaisu vaatii kuitenkin höyrytimen parametrien tarkkaa tuntemusta. (Aliciano et al. 1989)

Läpivirtaushöyrystimillä varustetuissa laitoksissa säätö on helpompi toteuttaa kuin U-putkihöyrystimissä, koska niissä lämmönsiirtopinta-alan ei tarvitse olla vakio. Tämän ansiosta voidaan sekä sekundääripuolen paine että primääripuolen lämpötila pitää vakiona ja hoitaa kuorman vaihtelujen aiheuttama säätötarve säätämällä höyrystimen pinnankorkeutta. Tämän ansiosta primääripiirin jäähdytteen tilavuusvaihtelut jäävät pieniksi, tritiumpitoisen veden käsittely vähenee, eli moderaattorin tilan ollessa lähes vakio, tarvitaan tehonlisäykseen vain pieni reaktiivisuuden muutos. (Kyrki-Rajamäki. 2010. s.6-9). Tämä parempi säädettävyys auttaa lähinnä laitoksen hienosäädössä. Kuten edellä todettiin, soveltuu läpivirtaushöyrystin heikosti suurempaan tehonvaihteluun, sen aiheuttaman lämpörasituksen takia. Kuvassa 12 on esitetty läpivirtaushöyrystimellä varustetun laitoksen, primääripiirin lämpötilojen riippuvuus kuormasta. Samaan aikaan sekundääripuolen paine pysyy vakiona.



**Kuva 12.** Esimerkki läpivirtaushöyrystimellä varustetun laitoksen primääripiirin lämpötilojen riippuvuus kuormasta. Y-akselilla lämpötila [°C], X-akselilla kuorma [%],  $T_h$  on sydämen ulostulolämpötila,  $T_m$  primääripiirin keskimääräinen lämpötila ja  $T_c$  sydämen sisäänmeno lämpötila.

## 5.1 Käyttö maailmalla

Ainoa valmistaja jonka läpivirtaushöyrystimiä on tällä hetkellä teollisessa käytössä, on Babcock and Wilcox. (Styrikovich et al. 1987 s. 21) Toistaiseksi millään muulla yhtiöllä ei ole ollut riittävää kiinnostusta suunnitella omaa versiotaan ydinvoimaloiden läpivirtaushöyryrimestä, tai valmistaa niitä Babcock & Wilcox -lisenssillä.

Vuonna 2010 on toiminnassa vain seitsemän läpivirtaushöyrystimiä käyttävää ydinvoimalaitosyksikköä: Arkansas Nuclear 1, Crystal River 3, Davis Besse 1, Oconee 1. Oconee 2, Oconee 3 sekä Three Miles Island 1. Kaikki yksiköt ovat keskittyneet Yhdysvaltoihin ja ovat melko harvinaisia. Läpivirtaushöyrystimiä käyttävien laitosten osuus kaikista painevesilaitoksista on vain 2,6%. (World Nuclear Association. 2010b).

## 5.2 Käyttö Suomessa

Suomessa ei tällä hetkellä ole käytössä yhtään laitosyksikköä jossa olisi läpivirtaushöyrystimiä. Myöskään yhdessäkään laitosvaihtoehdossa joita TVO:n tai Fennovoiman kaavailee uusiin laitoksiinsa, ei ole käytössä läpivirtaushöyrystimiä. (TVO, Hyvärinen 2009)

## 5.3 Vaikutus turvallisuuteen

Läpivirtaushöyrystimien merkittävin turvallisuuteen vaikuttava tekijä on niiden vähäinen vesimäärä sekundääripuolella. Tämän vuoksi niille on taattava jatkuva ja häiriötön syöttöveden saanti. On myös huomioitava että nestemäinen vesi on pääasiassa höyrystimen alaosassa. (Styrikovich et al. 1987 s. 27)

## 6 HÖYRYSTINKONSTRUKTIOIDEN VERTAILU

Kaikilla kolmella höyrystintyyppillä on omat vahvuutensa ja heikkoutensa, joiden vertailu voi olla paikoin hankalaa. Vertailu tulisi suorittaa aina tapauskohtaisesti, eikä mitään

ratkaisua voida nostaa joka tilanteessa muita paremmaksi. Höyrystinkonstruktio on aina riippuvainen laitoksen toimittajasta, joten sitä ei tulisi tarkastella yksittäisenä osana.

Turvallisuuden kannalta vertailu on kaikkein vaikeinta. Eri höyrystinkonstruktioiden paremmuus vaihtelee paitsi muiden laitosratkaisujen, myös käyttötilanteiden mukaan.

Eri konstruktioissa jotkut höyrystimen tekniset arvot vaihtelevat jonkin verran, toiset taas ovat hyvin lähellä toisiaan höyrystimestä riippumatta. Taulukkoon 1 on koottu muutamia esimerkkejä höyrystinkonstruktioiden teknisistä eroista.

**Taulukko 1.** Höyrystimien teknisiä tietoja. Westinghousen tyyppillinen kolmannen sukupolven laitos, EPR, VVER-440, VVER-1000 sekä Oconeen ydinvoimalaitosyksikkö jossa on läpivirtaushöyräysytin. (Styrikovich et al. 1987. s.5, Kyrki-Rajamäki 2010. s.28-31, Pooock ja Levstek. 1974 s.3, International Atomic Energy Agency. 2003 s.7-8, Soldatov)

	Westinghouse	EPR	VVER-440	VVER-1000	Läpivirtaushöyrystin
Primääripiirin paine [bar]	155	155	126	157	152
Primääriveden sisääntulolämpötila [°C]	324	328	297	324	316
Primääriveden ulostulolämpötila [°C]	289	296	270	289	290
Höyrinpaine [bar]	70	78	48	63	62
Höyrystimien määrä yksikössä [kpl]	2-4	4	6	4	2
Höyryntuotto [t/h]	1850	2200	450	1470	2470

## 7 YHTEENVETO

Tässä työssä on tarkasteltu kolmea painevesilaitoksissa käytettyä höyrystinkonstruktiota. Lisäksi työssä on tarkasteltu höyrystimiä yleisesti ja ennen kaikkea niiden vaikutuksesta laitoksen turvallisuuteen.

Pääpaino on ollut höyrystimien kestävydessä ja turvallisuuteen liittyvissä seikoissa. Lisäksi on tarkasteltu eri höyrystinkonstruktioiden käyttöä maailmalla ja Suomessa sekä erilaisia teknisiä eroja höyrystinkonstruktioiden välillä.

Kolmesta höyrystinkonstruktioista selvästi käytetyin on U-putkipystyhöyrystin, joka on käytössä 80% painevesilaitoksista. Toinen paljon käytetty malli on vaakahöyrystin, joka on käytössä hieman alle 20% painevesilaitoksista. Läpivirtaushöyrystin on käytössä vain 2,6% painevesilaitoksista.

Merkittävänä erona voidaan nostaa esiin höyrystimen sekundääripuolen vesimäärät. Kuten tässä työssä on todettu, on sekundääripuolen vesimäärä suurin vaakahöyrystimissä ja pienin läpivirtaushöyrystimissä, U-putkipystyhöyrystimien sijoituessa näiden välille. Toisaalta vaakahöyrystin ei pysty hyödyntämään koko vesikapasiteettiaan onnettomuustilanteissa.

Westinghousen vanhat höyrystimet ovat kestäneet korroosiota selvästi huonommin kuin vaakahöyrystimet tai läpivirtaushöyrystimet. Lisäksi U-putkipystyhöyrystimissä kuuma- ja kylmähaaran lämpötilaero aiheuttaa poikittaissuuntaista liikettä putkissa. Toisaalta vaakahöyrystimissä on suhteellisen suuri riski suurelle primääri-sekundääri –vuodolle.

Vaakahöyrystimissä höyrynerottimen poikkipinta-ala on suurempi kuin pystyhöyrystimissä, mikä tehostaa höyrynerotusta. Toisaalta U-putkipystyhöyrystimissä höyrynerottimen korkeuden kasvattaminen on helpompaa. Läpivirtaushöyrystimissä höyry saadaan tulistettua.

## **LÄHTEET**

### **Kirjalliset lähteet**

Chull Jo, Jong; Jo Jhung, Myung; Sik Kim, Woong; Jung Kim, Hho. 2005. Dynamic Characteristics of steam generator U-tubes with defect. Julkaistu 16.7.2005 Nuclear Engineering and Design –lehdessä numero 235.

Kyrki-Rajamäki, Riitta; Jordan, Anne. 2010. Ydinvoimatekniikka 2 luentomoniste. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 106 s.

Styrikovich, Polonsky, Tsiklauri. 1987. Two-Phase Cooling and Corrosion in Nuclear Power Plants. Moskova: High Temperature Institute of the USSR Academy of Sciences. 415 s. ISBN: 0-0-89116-424-3 (sid.)

Todreas, Neil E. Kazimi, Mujid S. 1990. Nuclear Systems I Thermal Hydraulic Fundamentals. USA: Hemisphere Publishing Corporation. 705 s. ISBN: 0-89116-935-0 (nid.)

Tong, L.S. & Weisman, Joel. 1996. Thermal Analysis of Pressurized Water Reactors. 748 s. ISBN: 0-89448-038-3. (nid)

TVO. Ydinvoimalaitosyksikkö Olkiluoto 3 –esite. 60 s.

Vihavainen, Juhani. 2001. Proceeding of Fifth International Seminar on Horizontal Steam Generators. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. 255 s. ISBN: 951-764-582-1 (nid.)

### **Sähköiset lähteet**

Aliciano, Francesco; Ciocchio, Stefano; Fardi, Fulvio; Zampini, Giuseppe. 1989. Once-Through Steam Generators Subject to Severe Thermal Transients Compensation System

Optimization. [PDF julkaisu]. Saatavissa:

[<http://www.studioalicino.com/FA/PDF/1989%20-%20SMIRT%2010%20-%20Once-Through%20Straight%20Tube%20SG%20Subject%20to%20Severe%20Thermal%20Transients%20Compensation%20Systems%20Optimization.pdf>]. Viitattu [25.8.2010]

Antipov, Stanislav I. Rogov, Mikhail F. Novak, Valery P. Nuclear power plant with VVER-1500 Reactor. [PDF julkaisu]. Saatavissa: [<http://apw.ee.pw.edu.pl/tresc/-eng/13-VVER-1500reactor.pdf>]. Viitattu [20.07.2010]

Areva. Heavy Components: Critical for Plant Performance [Internet-tietokanta] Saatavissa: [<http://www.areva.com/EN/operations-1587/heavy-components-to-boost-performance.html>]. Viitattu: [14.7.2010]

Areva. 2006. Introduction to the EPR. [Power Point esitys]. Saatavissa: [<https://scapa.cc.lut.fi:8443/webct/urw/lc322177453001.tp464655088001//RelativeResourceManager?contentID=464655149001>]. Viitattu: [1.11.2010]

Choi, Young ja Kim, K R. 2003. A Study of the Mitigating Capability of an Auxiliary Feedwater System During SBO for APR1400. [PDF-julkaisu]. Saatavissa: [<http://www.iasmirt.org/SMiRT17/P01-3.pdf>]. Viitattu: [25.11.2010]

Godbole, Sadashiva S. B&W Nuclear Service Company. 1990. Comparing Dynamic Responses of Recirculating and Once-Through Steam Generators For Next Generation LWRS. [PDF julkaisu].

Saatavissa:[[http://www.nhancetech.com/nht\\_web.nsf/vwTechPapers/Comparing%20Dynamic%20Responses%20of%20Recirculating%20and%20Once-Through%20Steam%20Generators%20for%20Next%20Generation%20LWRs%2F\\$FILE%2Fftipr26.pdf!OpenElement](http://www.nhancetech.com/nht_web.nsf/vwTechPapers/Comparing%20Dynamic%20Responses%20of%20Recirculating%20and%20Once-Through%20Steam%20Generators%20for%20Next%20Generation%20LWRs%2F$FILE%2Fftipr26.pdf!OpenElement)]. Viitattu: [22.10.2010]

Hyvärinen, Juhani. 2009. Fennovoima, STUK hyväksyy Fennovoiman hankkeen. [PDF julkaisu]. Saatavissa:



[[http://www.fennovoima.fi/userData/fennovoima/ppt/20091020\\_tiedotustilaisuus.pdf](http://www.fennovoima.fi/userData/fennovoima/ppt/20091020_tiedotustilaisuus.pdf)].

Viitattu: [20.07.2010]

International Atomic Energy Agency. 2003. WWER-1000 Reactor Simulator. [PDF-julkaisu]. Saatavissa: [[http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TCS-21\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TCS-21_web.pdf)]. Viitattu: [22.11.2010]

Karjunen, Timo; Suksi, Seija; Tossavainen, Kirsti. Kokemukset onnettomuuksista ja poikkevista tapahtumista ydinvoimalaitoksilla. [PDF julkaisu]. STUK. Saatavissa: [[http://www.stuk.fi/julkaisut\\_maaraykset/kirjasarja/sv\\_FI/kirjasarja5/files/12222632510012670/default/kirjasarjaV\\_ydinturvallisuus\\_6.pdf](http://www.stuk.fi/julkaisut_maaraykset/kirjasarja/sv_FI/kirjasarja5/files/12222632510012670/default/kirjasarjaV_ydinturvallisuus_6.pdf)]. Viitattu: [22.10.2010]

Mitsubishi. Reactor coolant system. [Internetsivu]. Saatavissa:

[[http://www.mhi.co.jp/en/products/detail/reactor\\_coolant\\_system.html](http://www.mhi.co.jp/en/products/detail/reactor_coolant_system.html)]. Viitattu:

[19.11.2010]

Nuclear Street. Model 54F Westinghouse Steam Generator. [Kuva]. Saatavissa:

[<http://nuclearstreet.com/images/img/steamgen.jpg>]. Viitattu: [24.11.2010]

Pettigrew, Michail J. Master's Research Project In-flow fluidelastic instabilities of tube bundles subjected to a two-phase flow. [Internetsivu]. Saatavissa:

[[http://yakari.polytechnique.fr/people/revio/masters\\_research\\_subject.html](http://yakari.polytechnique.fr/people/revio/masters_research_subject.html)]. Viitattu:

[24.11.2010]

Pocock, F.J. and Levstek, D.F.. 1974. Once-Through Steam Generator Materials and Water Chemistry. [PDF-julkaisu]. Saatavissa:

[<http://www.osti.gov/bridge/purl.cover.jsp?purl=/5176499-NX18W8/>]. Viitattu:

[22.11.2010]

Power-Technology. 2010a. Tianwan 1- And 2- Nuclear Reactors, China. [Internet-

tietokanta]. Saatavissa: [<http://www.power-technology.com/projects/tianwan/>]. Viitattu:

[14.11.2010]

Power-Technology. 2010b. Bushehr I- And II- Nuclear, Iran. [Internetsivu]. Saatavissa: [http://www.power-technology.com/projects/bushehr-nuclear/]. Viitattu: [14.11.2010]

Soldatov, Aleksei. Russian Pressurized Water Reactor VVER-440. [Power Point –esitys]. Saatavissa:

[[http://www.google.fi/url?sa=t&source=web&cd=8&ved=0CEcQFjAH&url=http%3A%2F%2Fclasses.engr.oregonstate.edu%2Fne%2Ffall2001%2Fne361%2FPRESENTATIONS%2Fwer440.ppt&rct=j&q=VVER-440&ei=cGPqTMyxNcbvsgaj6\\_yqCw&usg=AFQjCNEFIxsvOb0H0ITiJ4hUPnwG8K9kdQ&cad=rja](http://www.google.fi/url?sa=t&source=web&cd=8&ved=0CEcQFjAH&url=http%3A%2F%2Fclasses.engr.oregonstate.edu%2Fne%2Ffall2001%2Fne361%2FPRESENTATIONS%2Fwer440.ppt&rct=j&q=VVER-440&ei=cGPqTMyxNcbvsgaj6_yqCw&usg=AFQjCNEFIxsvOb0H0ITiJ4hUPnwG8K9kdQ&cad=rja)]. Viitattu: [22.11.2010]

STUK. 2009. Alustava turvallisuusarvio Loviisa-3 ydinvoimalaitoksesta. [PDF julkaisu]. Saatavissa:

[http://www.stuk.fi/ydinturvallisuus/ydinvoimalaitokset/uudet\_laitosyksikot/fi\_FI/uudet\_laitosyksikot/\_files/82229809792876564/default/Alustava%20turvallisuusarvio\_PAP-Fortum3\_liite1\_laitosvaihtoehdot.pdf]. Viitattu: [13.11.2010]

TVO. Olkiluoto 4 – laitosvaihtoehdot. [Internettietokanta]. Saatavissa:

[http://www.olkiluoto4.fi/www/page/ol4\_laitosvaihtoehdot/#]. Viitattu [20.07.2010]

UK-EPR. Fundamental Safety Overview, Volume 2: Design and Safety, Chapter E: The Reactor Coolant System and Related Systems. [PDF-julkaisu]. Saatavissa:

[http://www.epr-reactor.co.uk/ssmod/liblocal/docs/V3/Volume%202%20-%20Design%20and%20Safety/2.E%20-%20The%20Reactor%20Coolant%20System%20and%20Related%20Systems/2.E.4/2.E.4.2%20-%20Steam%20Generators%20-%20v3.pdf]. Viitattu: [21.11.2010]

Wade, Kenneth Chuck. 1995. Steam Generator Degradation and Its Impact on Continued Operation of Pressurized Water Reactors in the United States. [PDF julkaisu]. Saatavissa:

[http://tonto.eia.doe.gov/ftproot/features/steamgen.pdf]. Viitattu: [25.10.2010]

Valtioneuvoston päätös 6/330/2006. 2007. [PDF-julkaisu]. Saatavissa: [http://www.tem.fi/files/25755/Lupa\_lopullinen\_26\_7.2007.pdf]. Viitattu: [25.11.2010]

World Nuclear Association. 2010a. Nuclear Power Reactors [Internet-tietokanta] Saatavissa: [<http://www.world-nuclear.org/info/inf32.html>]. Viitattu: [14.7.2010, 20.11.2010]

World Nuclear Association. 2010b. WNA Reactor Database [Internet-tietokanta] Saatavissa: [http://world-nuclear.org/NuclearDatabase/Default.aspx?id=27232]. Viitattu: [21.11.2010]

World Nuclear Association. 2010c. Nuclear Power in Russia [Internet-tietokanta] Saatavissa: [http://www.world-nuclear.org/info/inf45.html]. Viitattu: [18.12.2010]

World Nuclear News. 2009. Larsen, Ase to cooperate on VVER units. [Internetsivu]. Saatavissa: [http://www.world-nuclear-news.org/C-Larsen\_ASE\_to\_cooperate\_on\_VVER\_units-1504094.html]. Viitattu: [14.11.2010]

World Nuclear News. 2010. Russian plant for Turkey's Akkuyu. [Internet-tietokanta]. Saatavissa: [http://www.world-nuclear-news.org/NN-Russian\_plant\_for\_Turkeys\_Akkuyu-1305107.html]. Viitattu: [14.11.2010]