

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

LUT School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0200 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

**MAAILMAN YDINVOIMALOIDEN ALTTIUS
TULVILLE
NUCLEAR POWER PLANTS' VULNERABILITY
TO FLOODS**

Työn tarkastaja: Arto Ylönen

Työn ohjaajat: Otso-Pekka Kauppinen, Arto Ylönen

Lappeenranta 11.5.2015

Kari Lamberg

TIIVISTELMÄ

Kari Lamberg

Maailman ydinvoimaloiden alttius tulville

LUT School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö 2015

30 sivua ja 5 kuvaa

Hakusanat: ydinvoima, tulva, stressitestit, Fukushima

Fukushiman ydinvoimalaonnettomuus kiinnitti huomion ydinvoimaloiden turvallisuuden ulkoisia uhkia vastaan, jonka seurauksena laitosten alttiutta myös tulville alettiin tarkastella ympäri maailmaa. Eurooppalaisten laitosten turvallisuutta selvitettiin kattavien stressitestien avulla. Vaikka tulviin varaudutaan jo ydinvoimalaitoksia suunniteltaessa, laitosten turvallisuutta pyritään parantamaan jatkuvasti.

Tässä kandidaatin työssä tarkastellaan erilaisia tulvien syntymekanismia ja kerrotaan, kuinka näihin tulviin varaudutaan ydinvoimalaitoksilla etukäteen. Stressitesteissä havaittuja puutteita käydään läpi tulviin varautumisen osalta, jonka yhteydessä esitellään myös Fukushiman ydinvoimalaitosonnettomuuden jälkeen tehtyjä parannustoimenpiteitä. Euroopan ulkopuolisten laitosten alttiutta tulville on käsitelty Taiwanin ja Yhdysvaltojen osalta. Yhdysvaltoja käsitellään myös Fort Calhounin ydinvoimalan esimerkkitapauksessa. Esimerkeissä kerrotaan tarkemmin myös Fukushiman onnettomuudesta.

Suurin osa Fukushiman onnettomuuden jälkeen tehdyissä tarkasteluissa havaituista puutteista liittyi suunnitteluperusteiseen tulvaan. Puutteet olivat joko suunnitteluperusteisen tulvan korkeuden laskennassa tai laitoksen turvallisuudessa suunnitteluperusteisen tulvan ylittyessä. Yhdysvalloissa osa ydinvoimalaitoksista sijaitsee jokien varsilla. Tällöin yläjuoksulla äkillisesti murtuva pato voi aiheuttaa tulvan, joka on suurempi kuin mihin laitoksella on varauduttu.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä	2
Sisällysluettelo	3
Symboli- ja lyhenneluettelo	4
1 JOHDANTO	5
2 TULVIEN SYNTYMEKANISMIT	6
2.1 Myrskyaallot.....	6
2.2 Tsunamit.....	6
2.3 Muut tulvatyytit.....	7
3 TULVARISKIN TUNNISTAMINEN	8
3.1 Myrskyaallot.....	8
3.2 Tsunamit.....	8
3.3 Muut tulvatyytit.....	9
4 TULVIIN VARAUTUMINEN	11
4.1 Lainsäädäntö.....	12
4.2 Suunnitteluperusteinen tulva.....	13
5 EUROOPAN UNIONIN STRESSITESTIT	15
5.1 Euroopan ydinvoimaloiden alttius tulville.....	16
5.1.1 Yhteenveto stressitestien tuloksista.....	16
5.1.2 Belgia.....	17
5.1.3 Ruotsi.....	18
5.2 Suomen ydinvoimaloiden alttius tulville.....	19
5.2.1 Olkiluodon ydinvoimalaitos.....	20
5.2.2 Loviisan ydinvoimalaitos.....	20
6 TULVIIN VARAUTUMINEN MUUALLA MAAILMASSA	22
6.1 Taiwan.....	22
6.2 Yhdysvallat.....	24
6.2.1 Fort Calhounin ydinvoimala.....	25
6.2.2 Oconeen ydinvoimala.....	26
7 ESIMERKKITAPAUKSIA	28
7.1 Fort Calhoun 2011.....	28
7.2 Fukushima 2011.....	30
8 YHTEENVETO	33
Lähdeluettelo	35

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Lyhenteet

EIA	U.S. Energy Information Administration
ENSREG	European Nuclear Safety Regulators Group
FANC	Federal Agency for Nuclear Control
IAEA	International Atomic Energy Agency, Kansainvälinen atomienergiajärjestö
INES	International Nuclear Event Scale
NRC	United States Nuclear Regulatory Commission
OECD	Organisation for Economic Cooperation and Development, Taloudellisen yhteistyön ja kehityksen järjestö
STUK	Säteilyturvakeskus
YVL	Ydinvoimalaitos
WNA	World Nuclear Association

1 JOHDANTO

Tässä energiatekniikan kandidaatintyössä perehdytään maailman ydinvoimaloiden alttiuteen tulville. Ydinvoimalat rakennetaan yleensä vesistön välittömään läheisyyteen, joten myös tulvien mahdollisuuteen on laitosta suunniteltaessa kiinnitettävä huomiota. Fukushima ydinvoimalaonnettomuus 11.3.2011 nosti esiin luonnonilmiöiden aiheuttaman turvallisuusuhan. Tämän onnettomuuden jälkeen Euroopassa aloitettiin Euroopa-neuvoston vaatimuksesta varsin nopeasti kattavat selvitykset (stressitestit), joissa tutkittiin eurooppalaisten ydinvoimalaitosten turvallisuutta luonnon ääriolosuhteiden varalta.

Tavoitteena työssä on tarkastella ydinvoimalaitosten alttiutta erityyppisille tulville ja kuinka niihin on ydinvoimalaitoksilla varauduttu. Stressitesteissä esiin tulleita turvallisuuspuutteita tulvien osalta käydään läpi sekä kerrotaan, kuinka Fukushima onnettomuus vaikutti tulviin varautumiseen ydinvoimalaitoksilla.

Kaikkien maailman ydinvoimaloiden alttiutta tulville ei työn laajuuden puitteissa ollut mitenkään mahdollista käydä yksityiskohtaisesti läpi. Esimerkiksi Venäjän ydinvoimalaitokset on jätetty kokonaan tarkastelun ulkopuolelle, koska niistä on vaikea saada luotettavaa ja ajantasaista tietoa. Työssä perehdytään aluksi erilaisiin tulvatyyppeihin ja niiden syntymekanismeihin, sekä tulvariskin tunnistamiseen ydinvoimalaitoksilla. Seuraavaksi kerrotaan, kuinka tulviin voidaan varautua ja miten tulvariski on huomioitu lainsäädännössä. Tämän jälkeen käydään läpi stressitestejä, minkä yhteydessä käydään myös läpi, kuinka Suomen ydinvoimaloissa on varauduttu tulvan aiheuttamaan uhkaan. Kuudennessa ja seitsemännessä luvussa käsitellään tulvauhkaa muualla maailmassa muutaman esimerkin avulla. Viimeisillä sivuilla kootaan yhteenveto asiasta ja tehdään johtopäätökset.

2 TULVIEN SYNTYMEKANISMIT

Tässä luvussa esitellään tärkeimmät ydinvoimaloita uhkaavat tulvatyypit. Riittävä jäähdytysveden saaminen on ydinvoimaloille erittäin tärkeää, joten voimalaitokset pyritään sijoittamaan meren, joen tai riittävän suuren järven läheisyyteen. Laitosta uhkaavat tulvat ovatkin tavallisesti ympäröivän vesistön aiheuttamia.

2.1 Myrskyaallot

Kovan tuulen ja matalapaineen yhdistelmä synnyttää myrskyaaltoja, jolloin vedenpinta nousee rannikkoalueilla poikkeuksellisen korkealle. Myrskyaallot jaetaan kolmeen luokkaan esiintymisalueensa perusteella. Nämä alueet ovat avonaiset rannikkoalueet, puolisoljetut vesistöt (esimerkiksi satama-alueet) ja suljetut vesistöt (esimerkiksi järvet). Avonaisten rannikkoalueiden myrskyaaltoja voidaan kuvata meteorologisen häiriön aiheuttamalla yksittäisellä aallolla. Puolisuljetuilla ja suljetuilla vesialueilla meteorologinen häiriö aiheuttaa värähtelevän aaltoliikkeen, joka voi synnyttää monihuippuisen myrskyaallon. (STI/PUB/1506 2011, s. 45.)

2.2 Tsunamit

Tsunami on tulva-aalto, joka etenee jopa 800 kilometriä tunnissa ja saattaa olla yli sata kilometriä pitkä. Aallon korkeus on kuitenkin syvänmeren alueella sen pituuteen nähden hyvin pieni, vain muutamia kymmeniä senttimetrejä. Tsunami syntyy tavallisesti maanjäristyksen, tulivuorenpurkauksen tai maanvyörymän aiheuttamasta merenpohjan epätasapainosta tai muodonmuutoksesta. Myös valtameren iskeytyvä asteroidi, komeetta tai murtuva kallionkieleke voi aiheuttaa tsunamin. (Kakkuri 2007, s. 132 – 133.) Tsunamita voi muodostua valtamerien lisäksi myös järvissä ja muissa pienemmissä vesistöissä. Samasta syntylähteestä saattaa muodostua useita peräkkäisiä aaltoja. Tsunamiaallon saapuessa rannikkoalueelle sen nopeus laskee ja aalto lyhenee, kun madaltuva merenpohja jarruttaa aallon etureunaa enemmän kuin takareunaa. Samalla sen korkeus kuitenkin kasvaa. Myös aallon tielle osuva kapeikko, esimerkiksi kanjoni, voi kasvattaa sen korkeutta. (STI/PUB/1506 2011, s. 54.) Tsunamin valtavan aallonpituuden ja suuren vesimassan vuoksi se voi aiheuttaa tulvan myös sisämaassa kaukana rannikolta. Tulvi-
van veden lisäksi voimakkaat virtaukset satamissa, lahdelmissa ja jokien uomissa voivat aiheuttaa tuhoa. (STI/PUB/1506 2011, s. 55.)

2.3 Muut tulvatyyppit

Veden pintakerroksen ja tuulessa liikkuvan ilmassan välinen kitka synnyttää aaltoja, joiden eteneminen riippuu huomattavasti vesistön syvyydestä. Tuulen aiheuttamat aallot ovat muista tulvatyypeistä riippumaton ilmiö, joten niitä tulee tarkastella muiden tulva-aaltojen lisätapahtumina. (STI/PUB/1506 2011, s. 50.)

Erilaiset häiriötekijät, kuten tuulen nopeuden vaihtelut, maanvyörymät veteen tai vedenalaiset tulivuorenpurkaukset voivat aiheuttaa vesistöön seisovan aallokon. Seisova aallokko voi nostaa rannikolle tulevien aaltojen korkeutta yli metrillä. (STI/PUB/1506 2011, s. 63.)

Voimakas vesisade voi aiheuttaa tulvan ydinvoimalaitosalueella. Sateen vaikutuksia pahentaa, mikäli laitosalueelle pääsee valumaan vettä korkeammalta maaperältä. Rankkasateen aikana rakennusten katoille saattaa kertyä huomattavia määriä vettä, etenkin mikäli lumi, jää, roskat tai muut vastaavat esteet tukkivat viemärointiä. Myös rakennusten katoilta valuva vesi voi lisätä rankkasateen aiheuttamaa tulvariskiä. (STI/PUB/1506 2011, s. 66.) Roskat, lumi tai jää voi tukkia viemäreitä, jolloin sadevesi ei pääse poistumaan laitosalueelta. Piha-alueelle kerääntyvä vesi saattaa joissain tapauksissa estää laitoksen käyttöhenkilökunnan liikkumisen alueella. (STI/PUB/1506 2011, s. 89.)

Osa ydinvoimaloista sijaitsee jokien varsilla. Tulvan seurauksena joen virtausreitti voi muuttua ja jokivesi saattaa siten tulvia laitosalueelle. Toisaalta joen virtauksen muuttumisesta voi seurata myös voimalaitoksen jäähdytysveden menetys. (STI/PUB/1506 2011, s. 69.)

Äkillinen tulva voi aiheutua myös veden vapautuessa hallitsemattomasti esimerkiksi padosta, säiliöstä tai jään tai roskien tukkimasta joen uomasta. Tällainen tulva voi olla jopa voimakkaampi kuin luonnonilmiöiden aiheuttama tulva. Tämän tyyppisten tulvien aiheuttamaa vahinkoa lisää se, että ne saavuttavat laitoksen usein erittäin lyhyellä varoitusaikalla. (STI/PUB/1506 2011, s. 71.)

3 TULVARISKIN TUNNISTAMINEN

Tässä luvussa käydään läpi, kuinka ydinvoimalan alttiutta edellä esitellyille tulvatyypeille voidaan arvioida. Tulvariskin tunnistaminen on laitoksen turvallisuuden kannalta erittäin tärkeää, jotta laitoksen tulvasuojausta suunniteltaessa osataan varautua oikeantyyppisiin tulviin.

3.1 Myrskyaallot

Myrskyaaltojen aiheuttamaa turvallisuusuhkaa arvioitaessa on oletettava, että vesistön pinta on samaan aikaan mahdollisimman korkealla (STI/PUB/1506 2011, s. 45). Turvallisuusuhkan suuruuden arviointiin käytetään meteorologista ja hydrologista tilastotietoa, jotka on kerätty laitoksen sijaintipaikan lähiympäristöstä. Mikäli näiden tietojen perusteella myrskyaaltoja voi esiintyä laitospaikalla, täytyy myrskyaaltoriskistä tehdä ennakoarviointi. Mahdollisen myrskyn voimakkuuden arvioimiseksi tarkastellaan todellisia seudulla esiintyneitä rajuja myrskyjä. Tutkittavia suureita ovat muun muassa pienin myrskyn aikana esiintyvä ilmanpaine, tuulen suunta ja nopeus, myrskyn kesto sekä sen etenemisnopeus ja –suunta. Näitä suureita tarkastellaan erityisesti siinä paikassa, jossa myrskyrintama on lähimpänä rannikkoa. (STI/PUB/1506 2011, s. 45.) Avoimilla rannikkoalueilla sijaitsevia laitoksia arvioitaessa on huomioitava, että pitkäkestoinen myrskyrintama saattaa nostaa vedenpinnan korkeutta huomattavasti, vaikka aaltojen korkeus jäisikin matalaksi (STI/PUB/1506 2011, s. 48). Myrskyaaltojen mahdollisuus on huomioitava selvitettyä vedenpinnan nousemisen aiheuttamaa tulvavaaraa ydinvoimalalle (STI/PUB/1506 2011, s. 49).

3.2 Tsunamit

Arvioitaessa tsunamin uhkaa ydinvoimalaitokselle tutkitaan laitospaikan läheisyydessä aikaisemmin esiintyneitä tsunamitapauksia. Laitoksen riittävä jäähdytysveden saanti on varmistettava, sillä tsunami aiheuttaa vedenpinnan tilapäisen laskemisen. Tsunamivavaaraa ei tarvitse tarkastella tämän enempää, mikäli laitoksen sijaintipaikan läheisyydessä ei ole todistettavasti esiintynyt tsunameita ja laitos sijaitsee yli kymmenen kilometrin etäisyydellä meren rannikolta, yli kilometrin etäisyydellä järvestä tai yli viidenkymmenen metrin korkeudella merenpinnasta. Mikäli nämä ehdot eivät täyty, tehdään laitoksel-

le yksityiskohtainen riskiarviointi sen alttiudesta tsunameille. (STI/PUB/1506 2011, s. 56.)

Yksityiskohtaisessa riskiarviossa tutkitaan mahdollisuutta tsunamien syntymiseen sekä ydinvoimalaitoksen läheisyydessä että kauempana, koska tsunamit voivat aiheuttaa vahinkoa myös kaukana syntypaikastaan. Mikäli laitospaikan läheisyydessä olevan vesistön alueella esiintyy vedenalaista seismistä tai tulivuoriperäistä aktiivisuutta, mahdollisuus tsunamin osumiselle laitokseen on olemassa. Jos tsunamin syntyminen näiden tarkastelujen pohjalta todetaan mahdolliseksi, ydinvoimalaitokselle täytyy tehdä yksityiskohtainen tsunamiriskiarviointi. Arvioinnissa lasketaan, kuinka suuren tsunamin syntyminen on mahdollista ja sen perusteella määritellään suunniteluperusteinen tsunami, josta laitoksen on selvittävä. (STI/PUB/1506 2011, s. 57.)

Tsunamiriskiarvioinnissa täytyy huomioida tsunamin syntytapojen ja tsunamiaallon nousukorkeuden arviointiin vaikuttavat epävarmuustekijät. Osa riskiarvioinnissa käytetävistä datasta, kuten maanjäristyksiin liittyvät mittaustulokset, ei ole aina kerätty laitoksen sijoituspaikalta ja tästä johtuva epävarmuus on myös huomioitava riskiarvioinnissa. Arviointia tehdessä on erityisen tärkeää kiinnittää huomiota tehtyjen oletusten puolueettomuuteen. Arviointiryhmän tulee tarkastella kaikkia käyttökelpoisia ja mahdollisia tapahtumaskenaarioita, eikä suosia tai painottaa yksittäisen asiantuntijan tekemään mallia. (STI/PUB/1506 2011, s. 59.)

3.3 Muut tulvatyyppit

Arvioitaessa laitoksen alttiutta padon murtumisen aiheuttamalle äkilliselle tulvalle tarkastellaan patoja, jotka sijaitsevat laitoksesta katsoen yläjuoksuun päin. Arvioinnissa tutkitaan, onko padon virheellinen käyttö mahdollista. Padon käyttövirheen lisäksi tulva voi aiheutua myös patoluukkujen liian pienestä kapasiteetista. Jos patoaltaaseen virtaa enemmän vettä kuin siitä on mahdollista poistua, padon pinta voi nousta liian korkealle. Mikäli kyseessä on maa- tai kivirakenteinen pato, voi patoaltaan ylitäytyminen johtaa padon murtumiseen. (STI/PUB/1506 2011, s. 71.)

Ydinvoimalaitosalueen tulvariski voi aiheutua myös viemärien liian pienestä kapasiteetista tai tukkeutumisesta. Laitosalueen viemärointi onkin järjestettävä siten, että se pystyy poistamaan maahan satavan veden kaikissa tilanteissa. Arvioitaessa suurinta

mahdollista sademäärää laitosalueella tarkastellaan mittausdataa, joka on kerätty meteorologisesti laitospaikkaa vastaavalta alueelta. Arvioinnissa voidaan käyttää hyödyksi myös laitosalueella tehtyjä mittauksia. (STI/PUB/1506 2011, s. 33.)

4 TULVIIN VARAUTUMINEN

Tässä luvussa käydään läpi, kuinka tulviin voidaan varautua jo ydinvoimalaa suunniteltaessa. Aluksi kerrotaan tulviin varautumisesta yleensä ja sen jälkeen käydään läpi aiheeseen liittyvää lainsäädäntöä.

Tulviin varautuminen täytyy huomioida jo laitospaikkaa valittaessa ja laitosta suunniteltaessa. Suunnitteluperusteisen tulvan hallintaan voidaan suhtautua kahdella erilaisella tavalla tai joissain tapauksissa yhdistelemällä näitä kahta menetelmää. (STI/PUB/1506 2011, s. 86.)

Ensimmäinen vaihtoehto on suunnitella laitos siten, että suunnitteluperusteisessa tulvassa vesi jää niin alas, ettei se vahingoita laitoksen turvallisuuteen vaikuttavia laitteita. Tämä voidaan saavuttaa rakentamalla laitos paikkaan, joka on jo valmiiksi riittävän korkealla. Sijoituspaikeen korkeutta voidaan lisätä myös rakennusjärjestelyillä. Kaikki korkeutta lisäävät rakenteet määritellään turvallisuuteen vaikuttaviksi rakenteiksi, joten niiden kunnossapitoa koskevat samat vaatimukset kuin muitakin turvajärjestelmiä. (STI/PUB/1506 2011, s. 84.)

Toinen vaihtoehto on varustaa voimalaitosalue pysyvillä tulvaesteillä ja suojarahdoilla. Käytettävien tulvaesteiden tulee kestää tulvien lisäksi muutkin ydinvoimalaitoksen suunnitteluperusteiset onnettomuudet, esimerkiksi maanjäristykset. Tulvaesteet tulee tarkastaa säännöllisesti ja niiden kuntoa pitää pystyä valvomaan jatkuvasti riippumatta siitä, kuuluvatko ne ydinvoimalan omistajan vastuulle vai eivät. (STI/PUB/1506 2011, s. 84.)

Kumpaakin menetelmää käytettäessä täytyy laitos varustaa tulvan havaitsevalla varoitussjärjestelmällä. Järjestelmän tulee tunnistaa tulvariski riittävän ajoissa, jotta laitos ehditään ajamaan alas turvallisesti ennen tulvan syntymistä. (STI/PUB/1506 2011, s. 85.) Tulvavaroitusjärjestelmä tulee suunnitella laitospokohtaisen riskiarvion perusteella, jotta osataan seurata oikeita suureita. Seurannan tulee kattaa ainakin tavallisimmat ilmakehän muuttujat, kuten lämpötila, paine, kosteus ja tuulen suunta ja nopeus. Myös vedenpinnan korkeutta on mitattava ja järjestelmän on varoitettava myös harvinaisista ilmiöistä, kuten pyörremyrskyistä ja tsunamideista. Kaikkien turvallisuuteen vaikuttavien laitteiden

ja rakenteiden tulee kestää itse tulvan lisäksi myös niiden luonnonilmiöiden vaikutukset, jotka tulvan aiheuttavat. (STI/PUB/1506 2011, s. 93.)

Veden rakenteille aiheuttama rasitus voi olla luonteeltaan staattinen, dynaaminen tai näiden yhdistelmä. Tulvavesi kuljettaa usein mukanaan roskia tai jäätä, jotka saattavat vahingoittaa rakenteita. Nämä partikkelit voivat myös tukkia voimalaitoksen jäähdytysvedenottoaukkoja, mikä täytyy ottaa huomioon laitosta suunniteltaessa. Tulvavesi pääsee turvallisuuden kannalta merkittäviin rakenteisiin usein rakenteiden välisistä saumoista tai kaapeliläpivientien kautta. Tähän seikkaan tulee kiinnittää erityistä huomiota jo rakennusvaiheessa. (STI/PUB/1506 2011, s. 85.)

Laitospaikkaa valittaessa tulee selvittää, kuinka suurta rantaviivan siirtyminen on laitospaikalla. Tulva voi vaikuttaa jokien virtausreitteihin ja jokiin rakennettavat sillat saattavat vaikuttaa joessa virtaavan veden määrään. (STI/PUB/1506 2011, s. 86.)

Tulvien vaikutusta tarkasteltaessa pitää huomioida myös se, että tulvavesi saattaa katkaista sekä tie- että viestiyhteydet voimalaitokselle. Tämä voi estää sekä pelastusviranomaisten että työntekijöiden pääsyn tarpeeksi lähelle laitosta. (STI/PUB/1506 2011, s. 89)

Voimalaitoksen sadevesiviemäroinnin suunnittelussa tulee huomioida myös lumen ja raesateen vaikutus yhdistettynä rankkaan vesisateeseen. (STI/PUB/1506 2011, s. 65) Rakennuksia suunniteltaessa on varmistettava, ettei katoille kertyvän veden massa ylitä missään olosuhteissa katon suurinta sallittua kuormitusta. Vesikuorman kertymistä voidaan vähentää esimerkiksi suunnittelemalla katto siten, että katolle kertyvä vesi pääsee valumaan suoraan maahan katon reunan yli, mikäli viemärointi ei pysty poistamaan riittävästi vettä katolta. Lumen ja jään kertymistä katolle voidaan puolestaan ehkäistä lämmitysvastuksilla. (STI/PUB/1506 2011, s. 66.)

4.1 Lainsäädäntö

Ei ole olemassa kaikkia maailman ydinvoimaloita koskettavaa yhteistä lakia tai asetusta, joka määrittäisi kuinka laitosten tulee varautua mahdollisiin tulvatilanteisiin. Jokainen ydinvoimayhtiö noudattaa kunkin valtion alueella voimassa olevia paikallisia säädöksiä,

joihin tosin usein vaikuttavat useamman valtion yhdessä laatimat erilaiset suositukset ja asetukset. Stressitesteihin perehdytään tarkemmin viidennessä luvussa.

IAEA antaa Meteorological and hydrological hazards in site evaluation for nuclear installations -standardissa suosituksia siitä, kuinka tulviin tulee varautua ydinvoimalaitoksen suunnittelussa. Standardin mukaan laitosta suunniteltaessa tulee hankkia täydelliset tiedot laitoksen toimintaympäristöstä. Erityistä huomiota tulee kiinnittää patoihin, rantavalleihin ja muihin tulvilta suojaaviin rakenteisiin. (STI/PUB/1506 2011, s. 83.)

Ydinenergiain mukaan Säteilyturvakeskus (STUK) määrittää Suomessa ydinenergian käyttöä koskevat turvallisuusvaatimukset (YVL A.7 2013, s. 2). Ydinenergian käyttö edellyttää lupaa, ja luvanhakijan on toimitettava STUK:lle todennäköisyysperusteinen riskiarviointi (PRA) ja sitä täydentävät erillistarkastelut (YVL A.7 2013, s. 3). Tässä arvioinnissa on huomioitava myös ulkoiset uhat kuten laitoksen alttius tulville erilaisissa käyttötilanteissa.

4.2 Suunnitteluperusteinen tulva

Suunnitteluperusteisella tulvalla tarkoitetaan sellaista tulvaa, joka on huomioitu laitosta suunniteltaessa ja josta laitos selviää ilman merkittäviä vaurioita ja turvallisuuden vaarantumista. Yleisten laitoksen ulkopuolisia uhkia koskevien vaatimusten mukaan täytyy suunnitteluarvoihin sisällyttää riittävä vaihteluväli laitoksen ulkopuolella mitattuihin arvoihin nähden. Suunnitteluarvoissa on tarkasteltava vähintään ilmiöitä, joiden todennäköisyys tapahtua laitospaikalla on suurempi kuin 10^{-5} kertaa vuodessa. (YVL B.7 2013, s. 16.) Tätä harvemmin tapahtuvat ilmiöt on huomioitava oletetun onnettomuuden laajenuksina (YVL B.7 2013, s. 17). Meriveden korkeuden vaikutusta arvioitaessa on otettava lisäksi huomioon, että valittu suunnitteluarvo on suurempi, kuin keskimäärin kerran sadassa vuodessa esiintyvä meriveden korkeus lisättynä kahdella metrillä (YVL B.7 2013, s. 16).

Riskientarkastelussa on tutkittava myös laitoksen läheisyydessä olevien järvien ja jokien tulvimisen vaikutukset laitosturvallisuuteen. Arvioituun suurimpaan mahdolliseen vedenpinnan korkeuteen on lisättävä aallonkorkeuden vaikutus. Merenpinnan korkeuteen vaikuttavat tekijät täytyy tarkastelussa eritellä ja myös vuoroveden vaikutus on huomioitava. YVL-ohjeet edellyttävät selvittämään tulvivan veden tunkeutumisreitit

laitostiloihin ja estämään veden tunkeutumisen maanpinnan alapuolisiin huonetiloihin luotettavasti. (YVL B.7 2013, s. 18.)

5 EUROOPAN UNIONIN STRESSITESTIT

Tämä luku käsittelee Euroopan Unionin teettämiä ydinvoimalaitosten stressitestejä ja niiden tuloksia. Aluksi kerrotaan hieman stressitesteistä yleensä, jonka jälkeen paneudutaan eurooppalaisissa laitoksissa havaittuihin puutteisiin muutaman mielenkiintoisen esimerkin avulla. Lopuksi käydään vielä läpi, mitä Suomen ydinvoimaloihin tehdyissä testeissä tuli ilmi.

Maaliskuussa 2011 maanjäristyksen aiheuttama tsunami iski Japaniin aiheuttaen yhden pahimmista koskaan tapahtuneista ydinvoimalaitosonnettomuuksista. Onnettomuuden jälkiselvittelyssä kävi ilmi, ettei laitoksella oltu varauduttu riittävän hyvin erittäin epätodennäköisiin onnettomuuksiin. Tämän seurauksena Eurooppa-neuvosto vaati onnettomuuden jälkeen antamissaan päätelmissä, että kaikkien EU:n alueella olevien ydinvoimalaitosten alttius luonnon ääri-ilmiöiden aiheuttamille onnettomuuksille on selvitettävä. Selvitykset (stressitestit) toteutettiin riippumattomien kansallisten valvontaelimien sekä vertaisarvioinnin avulla ja ne koskettivat kaikkiaan 132 ydinreaktoria. Stressitesteihin osallistuminen perustui vapaaehtoisuuteen, sillä vastuu ydinvoimaloiden turvallisuusasioista on kansallisella tasolla. Neuvosto vaati myös, että kaikista stressitesteissä esiin tulleista puutteista ja niiden korjaustoimista on tiedotettava julkisesti. Myös EU:n naapurivaltiot kutsuttiin mukaan selvityksiin. (Euroopan komissio 2012, s. 2.) Stressitestien tarkoituksena oli parantaa ydinvoimaloiden turvallisuutta ja antaa näkemyksiä niin lainsäädännön kuin muidenkin määräysten tueksi (Euroopan komissio 2012, s. 3).

Käytännössä stressitestit toteutettiin siten, että kunkin ydinvoimalaitoksen toiminnanharjoittaja teki ensin laitoksestaan itsearvioinnin. Tämän jälkeen jokaisen valtion valvova viranomainen teki tuloksista oman valtionsa kattavan raportin. Testeihin liittyi myös vertaisarviointivierailuja, joita toteutettiin 23 valikoituun kohteeseen. Lopuksi kaikille 17 maaraportille tehtiin EU:n kattava vertaisarviointi, jonka lopputuloksena saatiin yleisraportin lisäksi jokaiselle jäsenvaltiolle oma raporttinsa toimenpidesuunnitelmiin. (Euroopan komissio 2012, s. 4.)

5.1 Euroopan ydinvoimaloiden alttius tulville

Seuraavaksi käydään läpi stressitesteissä esiin tulleita tulviin varautumiseen liittyviä turvallisuuspuutteita sekä kerrotaan, kuinka näihin puutteisiin on reagoitu. Tämän työn laajuuden puitteissa ei ole kuitenkaan mahdollista käydä jokaisen maan raporttia yksityiskohtaisesti läpi. Stressitesteissä esiin tulleista asioista esitellään lyhyt yhteenveto ja havaittuja turvallisuuspuutteita käydään tarkemmin läpi kahden esimerkkivaltion avulla.

5.1.1 Yhteenveto stressitestien tuloksista

Stressitestien yhteenvedossa todettiin jokaisen stressitesteihin osallistuneen valtion osalta, että suunnitteluperusteinen tulva oli määritelty asianmukaisesti. Kuitenkin vain pieni osa osallistujista oli tehnyt tulvalaskennan uusimpien suositusten mukaan. Näihin suosituksiin kuuluvat esimerkiksi jatkuva parannusmahdollisuuksien etsiminen sekä kriittisten ilmiöiden tunnistaminen. Kriittinen ilmiö voi olla esimerkiksi vedenpinnan nouseminen niin korkealle, että vesi ylittää tulvaesteet ja alkaa peittää nopeasti laitosalueen alleen. Suunnitteluperusteisen tulvan ylittävään tulvaan kiinnitettiin myös huomiota stressitesteissä. Yli kolmasosassa eurooppalaisista ydinvoimalaitoksista turvallisuuden kannalta kriittiset järjestelmät on sijoitettu huonetiloihin, jotka on suunniteltu kestäämään huomattavasti suunnitteluperusteista tulvaa vakavampi onnettomuus. Moni valtio puolestaan totesi todennäköisyyden tällaiselle tulvalle olevan niin pieni, ettei tehnyt tarkastelua tämän pidemmälle. Raportissa suositeltiin kuitenkin, että laitoksilla tehtäisiin järjestelmälliset tarkastukset myös suunnitteluperusteista suuremman tulvan osalta. (ENS-REG 2012, s. 19.)

Kaikki maat eivät ole ottaneet huomioon mahdollisuutta tulvariskin kasvamiseen vähitellen esimerkiksi ilmastonmuutoksen vuoksi. Kasvavan tulvariskin vuoksi riskiarviot tulva-alttiuden osalta täytyy päivittää säännöllisesti ja ryhtyä tarvittaviin parannustoimenpiteisiin. Ydinvoimalaitosten luvanhaltijoiden tulee myös tehdä yhdessä viranomaisten kanssa laitoskohtaisia tarkastuksia, jotta mahdolliset turvallisuuspuutteet voidaan havaita yhdenmukaisesti. Erilaisia liikuteltavia laitteita, kuten esimerkiksi pumpuja, käytetään ydinvoimalaitoksen pitämiseen turvallisessa tilassa tulvan aikana. Näiden turvallisuuteen vaikuttavien laitteiden varastointiin täytyy kiinnittää erityistä huo-

miota, jotta niihin päästään käsiksi myös onnettomuustilanteessa. (ENSREG 2012, s. 21.)

5.1.2 Belgia

Belgiassa on toiminnassa yhteensä seitsemän ydinreaktoria kahdella eri ydinvoimalaitoksella. Kaikki reaktorit ovat tyypiltään painevesireaktoreita (PWR) ja ne on otettu käyttöön 1970 ja -80 luvuilla. Reaktoreista neljä sijaitsee Doelin ydinvoimalaitoksella Scheldt-joen varrella ja loput kolme Tihangen voimalaitoksella Meuse-joen varrella. (FANC 2011, s. 3.)

Ainoa mahdollisuus veden tulvimiselle Tihangen laitosalueelle on viereisen Meuse-joen tulviminen. Tihangen laitoksella on varauduttu tulvan aiheuttamaan ulkoisen sähkönsyötön ja turvajärjestelmien menetykseen siirrettävillä pumpuilla, putkilla ja venttiileillä. Näille on myös oma niin ikään liikuteltava voimanlähteensä, joten laitos pystytään pitämään turvallisessa tilassa näiden avulla jopa 15 vuorokautta ilman ulkopuolista apua. (FANC 2011, s. 62.) Stressitesteissä havaittiin, ettei laitosalue pysyisi kuivana vaaditussa keskimäärin kerran 10 000 vuodessa esiintyvässä suunnitteluperusteisessa tulvassa. Tämän vuoksi laitoksen ympärille alettiin rakentaa suojevallia syksyllä 2013. Vallin pitäisi valmistua kesällä 2015 ja yhdessä vedenottoaukkoihin ja viemärointiin tehtyjen muutosten kanssa se parantaa laitoksen turvallisuuden vaaditulle tasolle. (FANC 2014, s. 10.)

Tulva Doelin ydinvoimalassa on puolestaan mahdollinen vain erittäin rajun myrskyn aikana. Tällöin aallot ovat niin korkeita, että ne ylittävät tulvapenkereet tai rikkovat ne. Ennakoinnilla on erittäin suuri merkitys tulviin varautumiseen. Laitoksella on varastoituna sähkö- ja diesikäyttöisiä pumppuja tulvaveden poistamiseksi rakennuksista. (FANC 2011, s. 63.) Aiemmin laitoksella oli myös hiekkasäkkejä, joita oli tarkoitus asetella tulvaesteiksi tarvittaviin paikkoihin mutta vuonna 2013 nämä hiekkasäkit kuitenkin korvattiin pumppuilla tulvaesteilla. (FANC 2014, s. 12.)

5.1.3 Ruotsi

Ruotsissa on tällä hetkellä yhteensä kymmenen kaupallisessa käytössä olevaa ydinreaktoria kolmella eri laitosalueella. Forsmarkin ja Oskarshamnin ydinvoimalaitoksissa on molemmissa kolme kiehutusvesireaktoria. Ringhalsin ydinvoimalaitoksessa puolestaan sijaitsee yksi kiehutusvesireaktori ja kolme painevesireaktoria. Kaikki laitokset on otettu käyttöön 1970- ja 1980 – luvuilla. (Strålsäkerhetsmyndigheten 2014, s. 8.) Ruotsalaiset ydinvoimalat sijaitsevat merien rannikoilla, eikä niiden läheisyydessä ole muita vesistöjä, joten todennäköisin mahdollisuus tulvaveden alkuperälle on meri. Alueilla ei esiinny voimakkaita maanjäristyksiä eikä näillä merialueilla voi muodostua merkittäviä tsunamieja niiden mataluuden vuoksi. Varsinaista tsunamiriskiä Ruotsissa ei käytännössä siis ole. Mahdollisten pienten tsunamien ja myrskyaaltojen vaikutukset on huomioitu tarkasteltaessa korkeinta mahdollista merenpinnan tasoa. (Strålsäkerhetsmyndigheten 2014, s. 103.)

Itämeren rannikolla sijaitsevalla Forsmarkin ydinvoimalaitoksella korkein mitattu merenpinnan nousu on 1,44 metriä yli normaalin korkeuden ja laitos on suunniteltu selviämään 3 metrin pinnan-noususta. Näin korkealle vesi nousee keskimäärin 10^{-6} kertaa vuodessa. Suunnitteluperusteiseen tulvaan on Forsmarkin ydinvoimalassa varauduttu sijoittamalla turvallisuuden kannalta kriittiset järjestelmät huonetiloihin, jotka ovat vesitiiviitä tai riittävän korkealla merenpinnasta. (Strålsäkerhetsmyndigheten 2011, s. 86.) Veden noustessa Forsmarkissa yli 1,6 metrin korkeudelle normaalitasosta (Forsmark 3:ssa 1,8 m) joudutaan laitosten tehoa rajoittamaan, sillä vesi alkaa tulvia kanavaan, jota pitkin jäähdytysvedestä suodatettu kuona-aines poistetaan. Vedenpinnan noustessa kahden metrin korkeudelle (Forsmark 3:ssa 2,2 m) kanavan jätteenpoistokapasiteetti laskee niin, että laitos joudutaan ajamaan alas. Veden noustua kolmen metrin korkeudelle jätettä joudutaan poistamaan käsin, jotta voimalaan voidaan pumpata jälkilämmön poistoon tarvittava jäähdytysvesi. (Strålsäkerhetsmyndigheten 2011, s. 87.) Forsmark 3:ssa veden nousu näin korkealle aiheuttaa veden tulvimisen laitosalueelle sadevesiviemäriä pitkin. Laitosalueen tulviessa vesi pääsee myös rakennuksiin, joissa on turvallisuuteen vaikuttavia järjestelmiä. (Strålsäkerhetsmyndigheten 2011, s. 95.)

Oskarshamnin ydinvoimala sijaitsee Forsmarkin tavoin Itämeren rannikolla. Laitos on suunniteltu selviämään 2,02 metrin merenpinnan noususta normaalitason yläpuolelle.

Vesi nousee näin korkealle Oskarshamnin alueella keskimäärin 10^{-5} kertaa vuodessa. (Strålsäkerhetsmyndigheten 2011, s. 92.) Merenpinnan noustessa yli kolme metriä normaalitason yläpuolelle Oskarshamn 1:ssä ja 2:ssa vesi alkaa tulvia nopeasti merivesipumppaamoon syöttövesikanavien kautta. Vesi saattaa myös vahingoittaa reaktori-rakennuksen ulkoseiniä. (Strålsäkerhetsmyndigheten 2011, s. 95.)

Ringhalsin ydinvoimalan suunnitteluperusteisessa tulvassa meriveden on arvioitu nousevan 2,65 metriä yli normaalin korkeuden. Tämä tapahtuu keskimäärin 10^{-5} kertaa vuodessa. (Strålsäkerhetsmyndigheten 2011, s. 96.) Vedenpinnan noustessa yli kolme metriä normaalitasosta nousee vesi laitosalueelle ja pääsee tulvimaan rakennusten sisäpuolelle. Meriveden korkeuden ylittäessä neljä metriä rikkoutuvat pääovet ja vesi pääsee esteettä sisälle rakennuksiin. Tällöin myös polttoainevaurion riski kasvaa huomattavasti. (Strålsäkerhetsmyndigheten 2011, s. 99.)

Kaikki ruotsalaiset voimalaitokset on suunniteltu siten, että merivesi voi nousta kolme metriä normaalitason yläpuolelle polttoaineen tiiveyden vaarantumatta. (Strålsäkerhetsmyndigheten 2011, s. 103.) Stressitestien tuloksena suositeltiin jatkoselvitysten tekemistä. Lisää tietoa haluttiin laitoksen turvallisuudesta vedenpinnan noustua suunnitteluperusteista tulvaa korkeammalle. Selvityksiä toivottiin tulvaveden käyttäytymisestä sen päästyä rakennusten sisälle sekä siitä, kuinka laitosten kykyä selvitä tulvista voitaisiin entisestään parantaa. (Strålsäkerhetsmyndigheten 2011, s. 104.)

5.2 Suomen ydinvoimaloiden alttius tulville

Fukushiman onnettomuuden jälkeen aloitettiin Suomessa varsin nopeasti Työ- ja elinkeinoministeriön (TEM) ja STUK:n aloitteesta selvitykset suomalaisten ydinvoimalaitosten varautumisesta ulkoisiin tapahtumiin. Jokainen Suomen kaupallisessa käytössä olevasta neljästä ydinreaktorista on rakennettu Itämeren rannikolle. Itämeri on matala, joten siinä ei voi syntyä korkeita hyökyaaltoja. Tanskan salmet ja matala Pohjanmeri suojaavat Itämerta myös Atlantilta saapuvilta hyökyaalloilta. Pitkällä aikavälillä maan kohoaminen ja ilmastonlämpenemisen aiheuttama merenpinnan nousu voivat vaikuttaa tulvaherkkyyteen. (Routamo 2011, s. 117.) Laitosalueella todennäköisin tulvan aiheuttaja on myrsky tai rankkasade (Routamo 2011, s. 8). Suomessa laitokset on pyritty suojaamaan ulkoisia tulvia vastaan rakentamalla ne tarpeeksi korkealle merenpinnan tasos-

ta. Tämän lisäksi rakennusten maanalaiset osat, joissa sijaitsee tärkeitä turvajärjestelmi- en toimilaitteita, ovat vesitiiviitä. (STUK 2012, s. 8.)

5.2.1 Olkiluodon ydinvoimalaitos

Olkiluodossa on kaksi nettosähkötehoaan 880 MW kiehutusvesireaktoria, jotka ovat valmistuneet vuosina 1979 ja 1982 (Kyrki-Rajamäki 2011, s.140). Voimalaitoksen suunnittelussa on varauduttu merenpinnan nousevan 3,5 metriä yli normaalin korkeu- den. Vesi nousee tätä korkeammalle alle 10^{-9} kertaa vuodessa. Suurin alueella mitattu merenpinnan korkeus on 1,04 metriä yli normaalikorkeuden. (STUK 2012, s. 8.)

Käytetyn polttoaineen väliaikaisvaraston polttoainealtaan jäähdytyspumput ovat puoli metriä meren pinnan yläpuolella. Rakennus on suunniteltu selviämään 1,2 metrin me- renpinnan noususta, jonka jälkeen sisään pääsevä vesi saattaa vahingoittaa pumppuja ja niiden sähkönsyöttöä. Merenpinnan noustua yli 1,2 metriä vesi alkaa tihkua sisälle, mut- ta se voidaan pumpata ulos uppopumpuilla. Stressitesteissä havaittiin, että merenpinnan noustua 2,5 metrin korkeudelle vesi alkaa vuotaa myös merivesipumppaamon ja meri- vesiputken välisestä saumasta. (STUK 2012, s. 8.) Sauman tiiveyttä parannettiin tämän jälkeen. Merenpinnan noustua yli 3,5 metriä vesi alkaa tulvia nopeasti ovien kautta. (STUK 2014, s. 9.)

5.2.2 Loviisan ydinvoimalaitos

Hästholmenin saarella Loviisassa on kaksi vuosina 1977 ja 1981 valmistunutta paine- vesireaktoria, joiden kummankin nettosähköteho on 490 MW (Kyrki-Rajamäki 2011, s.140). Meren syvyys saaren lähistöllä on noin 5 - 20 metriä. Loviisassa tulvariski on suurempi kuin Olkiluodossa. Laitos on suunniteltu selviämään tehoajolla 3,0 metrin korkeudelle nousevasta merenpinnasta ja tämä korkeus ylittyy $4 \cdot 10^{-7}$ kertaa vuodessa. Merenpinnan noustua tätä korkeammalle alkaa vettä tulvia ovien ja muiden luukkujen kautta voimalaitosrakennuksen sisäpuolelle. Veden pääsy sisälle on mahdollista jo ve- den pinnan noustessa 2,5 metriin, mikäli kova tuuli epäsuotuisasta suunnasta työntää vettä laitoksen pihalle. (Routamo 2011, s. 58.) Alueella on mitattu merenpinnan kor- keudeksi suurimmillaan 1,75 m. (STUK 2012, s. 9.)

Vuoden 2012 vuosihuollossa parannettiin huoltoseisokin aikaista tulvansietokykyä niin, että laitos selviää veden pinnan noususta 2,95 metrin korkeudelle entisen 2,1 metrin asemesta. Loviisan vuosihuollot ajoittuvat alkusyksyyn, mutta merenpinta on korkeimmillaan talvella, joten tulva-alttius ei ole aivan niin suuri kuin pelkkien numeroiden perusteella vaikuttaa. Loviisan ydinvoimalaitoksen kykyä selviytyä tulvista parannetaan tulevaisuudessa. (STUK 2014, s. 10.)

6 TULVIIN VARAUTUMINEN MUUALLA MAAILMASSA

Tähän lukuun on valittu mielenkiintoisimpia esimerkkejä Euroopan ulkopuolisten ydinvoimalaitosten alttiudesta tulville. Taiwanin ydinvoimalaitokset on valittu tarkasteltavaksi, sillä niistä löytyi stressitestejä vastaavassa menettelyssä enemmän puutteita kuin eurooppalaisista ydinvoimalaitoksista. Yhdysvaltojen ydinvoimalaitokset on taas valittu tarkasteltavaksi laitosten läheisyydessä olevien patojen muodostaman tulvariskin vuoksi.

6.1 Taiwan

EU:n stressitestien yhteydessä myös taiwanilaisille laitoksille tehtiin testejä vastaava tarkastelu. Taiwanissa on kuusi käytössä olevaa ydinreaktoria kolmella eri laitosalueella siten, että kullakin laitoksella sijaitsee kaksi keskenään samanlaista reaktoria. Laitoksista Chinshan ja Kuosheng ovat saarivaltion pohjoisrannikolla ja Maanshan puolestaan etelärannikolla. Lisäksi pohjoisrannikolla sijaitsee vielä rakenteilla oleva Lungmenin ydinvoimala, jonka rakennustyöt on toistaiseksi keskeytetty. (Taiwan regulatory body 2013, s.1.)

Stressitestien tuloksena todettiin tsunamin olevan merkittävin laitoksia uhkaava tulvatyyppi. Analyyseissä todettiin laitosten kuitenkin selviytyvän tsunamin aiheuttamasta tulva-aallosta, sillä vesi ei pääse nousemaan laitosalueille saakka. Tsunamin korkeuden laskentaan liittyy kuitenkin epävarmuuksia, joten jokaiselle laitokselle rakennetaan tsunamivallit suojaamaan laitoksia. (Taiwan regulatory body 2013, s.59.) Kaikilla laitoksilla on varauduttu tulviin myös siirrettävillä dieselgeneraattoreilla, pumpuilla ja hiekkasäkeillä (Taiwan regulatory body 2013, s.69). Jotta tsunamin osumiseen ehditään varautua ajoissa, voimalaitoksia operoiva Taiwan Power Company on ottanut käyttöön tsunameista ja maanjäristyksistä varoittavan hälytysjärjestelmän. Laitoskohtaisia tulva-varoitussjärjestelmiä on parannettu ja vedenpinnan nousun aikana tehtäviin toimenpiteisiin on kiinnitetty erityistä huomiota. Näiden toimenpiteiden ansiosta laitokset selviävät entistä paremmin myös rankkasateiden aiheuttamista tulvista. (Taiwan regulatory body 2013, s.73.) Stressitesteissä todettiin myös, että jokaisella laitoksella tsunami aiheuttaa tilanteen, jossa laitoksen lämpönielu menetetään. Kun lämpöä ei voida poistaa mereen,

edellyttää laitoksen turvallisessa tilassa pitäminen, että kaikki turvallisuuteen vaikuttavat osajärjestelmät toimivat. (Taiwan regulatory body 2013, s.74.)

Kuoshengin ydinvoimalan hätäpumppuhuoneen lattian korkeus on 6,72 metriä ja tsunamin suurin laskennallinen nousukorkeus 10,3 metriä merenpinnasta. Tämän vuoksi tsunamin aiheuttama tulva saattaa vaarantaa hätäpumppujen toiminnan veden päästessä rakennukseen. Stressitestien valmistumisen jälkeen hätäpumppaushuoneesta tehtiin vesitiivis, jolloin laitos selviää 12 metrisestä tsunamiaallosta. (Taiwan regulatory body 2013, s.70.) Tarkastelussa laitoksen todettiin selviytyvän rankkasateen aiheuttamasta tulvasta riittävän hyvin. Sään ääri-ilmiöt saattavat kuitenkin aiheuttaa entistä voimakkaampia sateita, joten laitokselle asennettiin 63 tulvapuomia tärkeimpien rakennusten sisäänkäynneille. Tämän toimenpiteen ansiosta laitos selviää metrin aiempaa korkeammasta tulvasta. (Taiwan regulatory body 2013, s.71.)

Lungmenin rakenteilla olevasta laitoksesta löydettiin myös joitakin turvallisuuspuutteita. Yksi puute oli pieni vuoto valvomohuoneen ulkoseinien läpivientireikien maanalaisissa osissa, joka on jo korjattu. Vakavampia puutteita löytyi reaktorirakennuksen huoltovesipumppaamoista. Mikäli tsunamiaalto nousee yli 8,6 metrin korkeudelle merenpinnasta, törmää se pumppurakennuksen ulkoseiniin. Pumppaamon seinien rakenteet vaativat vahvistamista, jotta ne kestäisivät sekä veden paineen että aallon iskeytymisen aiheuttamat rasitukset. Myös pumppurakennuksen aukkojen tiivistykseen käytetyn materiaalin kyky kestää veden aiheuttamaa painetta vaatii lisäselvityksiä. (Taiwan regulatory body 2013, s.70.) Reaktorirakennukseen asennettiin myös vesitiiviit ovet, jottei korkealle nouseva vesi pääsisi rakennuksen sisätiloihin. Lisäksi useisiin rakennuksiin asennettiin myös tulvavevyjä. (Taiwan regulatory body 2013, s.72.)

Chinshan ydinvoimalan tulvaportteihin lisättiin stressitestien jälkeen automaattisesti toimivat avaus- ja sulkutoiminnot. Näiden tarkoituksena on parantaa varautumista yllättäen iskevään tsunamiaaltoon. Vedenottorakennuksen rakennetta muokattiin niin, että tsunamin kuljettamat roskat eivät pääse tukkimaan jäähdytysveden virtaamista. Pumpuhuoneiden läpivientien tiiveyttä ja vedenpoistoa maanalaisista huonetiloista parannettiin. Myös Chinshanissa tärkeimpien rakennusten sisäänkäynneille asennettiin tulvapuomeja. (Taiwan regulatory body 2013, s.70.)

Maanshanin voimalaitoksella tehtiin testien jälkeen lukuisia parannuksia. Apujärjestelmien jäähdytysjärjestelmärakennuksen turvallisuutta parannettiin asentamalla sinne useita vesitiiviitä ovia ja seiniä sekä tulvaveyjiä (Taiwan regulatory body 2013, s.71). Polttoainevarastoon, jätteenkäsittelyrakennukseen, hätädieselgeneraattorirakennukseen ja valvomorakennukseen asennettiin tulvaveyjiä estämään veden pääsy rakennuksiin (Taiwan regulatory body 2013, s.72). Huoltovesialtaan päälle on asennettu verkkoja, jotta tsunamiaallon mukanaan kuljettamat roskat eivät pääse tukkimaan altaassa olevia vedenottoaukkoja. Viidennen hätädieselgeneraattorin asennuskorkeutta tullaan myös nostamaan seitsemän metriä nykyistä korkeammalle, jotta tulvavesi ei vaaranna sen toimintaa. (Taiwan regulatory body 2013, s.77.)

6.2 Yhdysvallat

Fukushiman ydinvoimalaonnettomuuden jälkeen Yhdysvaltojen ydinturvallisuudesta vastaava viranomaisena, United States Nuclear Regulatory Commission (NRC), määräsi ydinvoimaloiden luvanhaltijat tekemään tarkat selvitykset ulkoisten uhkien vaikutuksesta laitosten turvallisuuteen. Näihin ulkoisiin uhkiin kuuluvat myös tulvat. (NRC 2011a, s. 1.) Tulva-alttiuden arvioimiseksi laitokset jaettiin kahteen ryhmään. Toiseen ryhmään kuuluvat laitokset, jotka on rakennettu korkeammalle, kuin mihin suunnitteluperusteinen tulva yltää. Toisen ryhmän muodostavat laitokset, joiden tärkeät huonetilat pidetään kuivina kiinteästi asennetuilla tai siirrettävillä tulvaesteillä tai vesitiiviillä ovilla. Ydinvoimaloiden turvallisuuden lähtökohdaksi on otettu siis se, ettei tulvavesi pääse tunkeutumaan rakennuksiin, joissa on turvallisuuden kannalta merkittäviä laitteita. (Mega-Tech Services 2014, s. 12.) Vuonna 2010 tehtiin jonkin verran mediahuomiota saanut selvitys siitä, millaisen tulvariskin jokien yläjuoksilla sijaitsevat padot muodostavat ydinvoimalaitoksille. Tässä kandidaatintyössä keskitytäänkin Yhdysvaltojen osalta Fort Calhoun ja Oconeen ydinvoimalaitoksiin, joissa patojen murtuminen aiheuttaisi suuremman tulvan, kuin mihin laitosta suunniteltaessa on varauduttu. Fort Calhounin ydinvoimalaa käsitellään myös esimerkkitapausten yhteydessä.

6.2.1 Fort Calhounin ydinvoimala

Fort Calhounin ydinvoimala sijaitsee Nebraskan osavaltiossa Missouri-joen varrella. Vuonna 1973 käyttöön otetun painevesilaitoksen nettosähköteho on 476 MW. (EIA 2010a.) Kuvassa 1 on esitetty ilmakuva Fort Calhoun voimalaitosalueesta ja ohi virtaavasta Missouri-joesta.



Kuva 1. Ilmakuva Fort Calhounin ydinvoimalasta. (NRC, 2011)

Laitoksen rakennusvaiheessa määritelty suunnitteluperusteinen tulva nostaisi vedenpinnan ainoastaan 306,6 metrin korkeudelle merenpinnasta. Vuonna 1993 armeijan insinöörijoukot tekivät kuitenkin laskelmia, joiden perusteella suurin mahdollinen tulva nostaisi veden pinnan 307,6 metriin. Tässä laskelmassa ei ole kuitenkaan otettu huomioon yläjuoksulla murtuvan padon aiheuttamaa tulvaa. Syöttövesipumppaamo on rakennettu 307,1 metrin korkeudelle merenpinnasta, mutta sen suojausta parannettiin, kun suunnitteluperusteisen tulvan havaittiin olevan liian pieni. Hiekkasäkkien ja tulvapuomien avulla syöttövesipumppaamo pysyy nyt tiiviinä 307,7 metriin saakka. (NRC 2011a, s. 2.) Tulvan noustessa tätä korkeammalle pääsee vesi myös apurakennukseen ja turbiinihalliin. Laitoksen kaikki normaalit järjestelmät menetetään tulvaveden noustessa yli 307,8 metrin korkeudelle. Vedenpinnan noustessa vielä 0,3 metriä lisää tulvii se myös hätägeneraattoreiden huonetiloihin. (NRC 2011a, s. 3.)

Nykyään koko laitoksen tulvasuojausta on parannettu entisestään hiekkasäkkien, maan muokkauksen sekä tulvaesteiden avulla. Tämän ansiosta laitos pystytään ajamaan turvallisesti alas vaikka vesi nousisi 309,0 metrin korkeudelle merenpinnasta. Tämä edellyttää kuitenkin, että tulvasta saadaan ennakkovaroitus ja siihen pystytään siten varautumaan etukäteen rakentamalla tilapäisiä tulvaesteitä. (Mega-Tech Services 2014a, s. 12.) Fukushima onnettomuuden jälkeisten selvitysten perusteella Fort Calhounin ydinvoimalan laitosalueelle tullaan rakentamaan myös säilytyspaikka hätätilanteessa tarvittaville varusteille. Näihin varusteisiin kuuluu muun muassa vesikulkuneuvo, jonka avulla pystytään liikkumaan veden peittämällä laitosalueella. (Mega-Tech Services 2014a, s. 12.)

Armeijan insinöörijoukkojen tekemässä selvityksessä tutkittiin myös patojen murtumisen aiheuttamaa tulvaa. Missouri-joen varrella Fort Calhounin laitokselta yläjuoksulle päin sijaitsevat lähekkäin Gravins Pointin, Fort Randallin, Big Bendin ja Oahen padot. Mikäli Oahen pato murtuisi, saattaisi se aiheuttaa myös sitä seuraavien kolmen muun padon murtumisen. Tämän seurauksena tulvavesi nousisi niin korkealle, että se ylittäisi myös kaikki väliaikaiset tulvaesteet. Patojen yhtäaikaisen rikkoutumisen todennäköisyys on kuitenkin niin pieni, että sitä ei ole otettu suunnitteluperusteiseksi tulvaksi. (NRC 2011, s. 4.) Fort Calhounin ydinvoimalan tulvasuojauksesta on esitetty viranomaisten ja median taholta runsaasti kritiikkiä. Tulviin varautumista on parannettu paljon alkuperäisestä, mutta patojen murtuminen aiheuttaisi silti edelleen suuremman tulvan, kuin mihin laitoksella pystytään varautumaan.

6.2.2 Oconeen ydinvoimala

Oconeen ydinvoimalaitos sijaitsee Etelä-Carolinan osavaltiossa Keowee-järven rannalla. Laitosalueella on kolme vuosina 1973 ja 1974 käyttöön otettua painevesireaktoria, joista kunkin teho on 846 MW. (EIA 2010b.) Laitokselta yläjuoksulla sijaitsee Jocasseen pato ja laitoksen vieressä puolestaan Keoween pato. Kauempana sijaitsevan Jocasseen padon rajaaman lammen pinta on noin 90 metriä korkeammalla kuin laitoksen viereisen Keowee-järven pinta. Veden ollessa korkeimmillaan Keowee-järven pinta puolestaan on noin metrin korkeammalla kuin Oconeen ydinvoimalaitoksen piha-alue. (NRC 2011a, s. 5.) Kuvassa 2 on esitetty ilmakuva Oconeen laitosalueesta.



Kuva 2. Ilmakuva Oconeen ydinvoimalasta. Keowee-pato näkyy kuvan yläreunassa oikealla. (NRC, 2011)

Jocassee-padon äkillinen murtuminen aiheuttaisi tulva-aallon, joka vyöryisi Keowee-padon yli ja peittäisi laitoksen piha-alueen alleen. Tämän seurauksena laitoksen sähkönsyöttö olisi enää hätägeneraattoreiden varassa. Vuonna 1983 tehtiin selvitys padon murtumisen vaikutuksista. Selvityksen perusteella päädyttiin rakentamaan puolitoista metriä korkea tulvavalli suojaamaan laitoksen alasajon kannalta kriittisiä järjestelmiä. Myöhemmät tutkimukset ovat kuitenkin osoittaneet, että rakennettu valli on liian matala suojaamaan laitosta, mikäli Jocassee-pato murtuu kokonaan. (NRC 2011a, s. 8.) Padon murtumisen aikaan saama tulva voi johtaa laitoksen reaktorisydämen vaurioon. Tällaisen onnettomuuden todennäköisyyden on laskettu olevan samaa suuruusluokkaan kuin muiden vakavien onnettomuuksien, esimerkiksi tulipalon tai maanjäristyksen. (NRC 2011a, s. 9.) Oconeen ydinvoimalaa suunniteltaessa padon murtumista ei huomioitu määriteltäessä suunnitteluperusteista tulvaa. NRC onkin vaatinut Fukushima-onnettomuuden jälkeen lisäselvityksiä padon murtumisen aikaan saamasta tulvasta ja laitoksen luvanhaltija on luvannut tutkia asiaa ja parantaa laitoksen tulvasuojausta. (Mega-Tech Services 2014b, s. 13.)

7 ESIMERKKITAPAUKSIA

Tässä luvussa on esitetty kaksi vuonna 2011 sattunutta tapausta, joissa tulva on uhanut ydinvoimalaa ja vaatinut toimenpiteitä laitosoperaattoreilta. Ensimmäisenä käsitellään Missouri-joen tulvaa, joka uhkasi Fort Calhounin ydinvoimalaitosta. Tämän jälkeen kerrotaan Japanissa Fukushiman ydinvoimalaonnettomuuteen johtaneesta tsunamista.

7.1 Fort Calhoun 2011

Kuudennessa luvussa käsiteltiin jo Fort Calhounin ydinvoimalaa ja patojen aiheuttamaa tulvauhkaa. Konkreettinen tulvan aiheuttama vaaratilanne koettiin kuitenkin kesällä 2011, kun harvinaisen kostean syksyn, lumisen talven ja ennätysateisen maaliskuun yhteisvaikutus sai Missouri-joen tulvimaan poikkeuksellisen voimakkaasti. (U.S. Department of Commerce 2012, s. 11.)

Fort Calhounin voimalaitoksesta vastaava Omaha Public Power District antoi 6.6.2011 ilmoituksen NRC:lle poikkeustilanteesta, kun Missouri-joen pinta ylitti 306,0 metrin korkeuden merenpinnasta. Laitos oli tapahtumahetkellä jo valmiiksi ajettu alas vuosi-huollon vuoksi. Laitoksen henkilökunta toimi hätätilanneohjeiden mukaisesti, ja alkoi asettaa hiekkasäkkejä ja väliaikaisia tulvaesteitä voimalan pitämiseksi kuivana. Laitos-alueelle myös toimitettiin polttoainetta hätägeneraattoreita ja siirrettäviä pumppuja var-ten (NRC 2011b.) Seuraavana päivänä sähkökomponentti sytytti pienen tulipalon yhdessä laitoksen huonetiloista. Tämän seurauksena käytetyn polttoaineen varastointiallas oli ilman jäädytystä puolentoista tunnin ajan. Mikäli jäädytystä ei olisi pystytty palauttamaan, olisi altaan vesi alkanut kiehua 88 tunnin kuluttua. (NRC 2011c.) Kuvassa 3 on esitetty, kuinka tulvavesi on saartanut Fort Calhounin voimalaitoksen kesällä 2011.



Kuva 3. Ilmakuva Fort Calhounin ydinvoimalasta kesällä 2011. (Nebraska Power Association, 2011)

Missouri-joen tulviminen jatkui edelleen, kun väliaikainen, kumista valmistettu vesitäytteinen tulvavalli romahti 26.6. pienen kauhakuormaajan puhkaistua sen. Vallin hajottua tulvavesi pääsi ympäröimään apurakennuksen ja reaktorin suojarakennuksen. Vettä oli rakennusten ympärillä yli puoli metriä ja vesi ympäröi myös sähkömuuntajat, minkä seurauksena sähkönsyöttö laitokselle ulkopuolisesta sähköverkosta menetettiin. Sähkönsyöttö oli tästä eteenpäin generaattoreiden varassa. Tulvavesi huuhtoi mukaansa myös lähes 400 litraa polttoainetta, joka oli tarkoitettu tulvaveden pumppaamiseen käytettäviä siirrettäviä pumppuja varten. Uusi tulvavalli pystytettiin 11.7. (NRC 2011d.) Romahtaneen kaltainen tulvavalli on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Väliaikainen tulvavalli Fort Calhoun ydinvoimalaitoksella. (Nebraska Power Association, 2011)

Veden pinta Missouri-joessa laski normaalille tasolle vasta syyskuussa tulvan kestätyä yli kolme kuukautta (U.S. Department of Commerce 2012, s. 17). Korkeimmillaan vesi nousi 306,9 metrin korkeudelle merenpinnasta (Mega-Tech Services 2014a, s. 10). Fort Calhoun ydinvoimalassa tehtiin tulvan jälkeen mittavia tarkastuksia vahinkojen selvittämiseksi. Tulvavahinkojen lisäksi korjattiin myös muita tarkastuksissa havaittuja puutteita ja laitos sai käynnistyslupaa vasta joulukuussa 2013 oltuaan kylmäseisokissa lähes kolme vuotta. (NRC 2013, s.1.)

7.2 Fukushima 2011

Fukushimassa sijaitsee lähekkäin kaksi ydinvoimalaitosta, Fukushima Daiichi ja Fukushima Daini. Daiichin ydinvoimalaitoksella on kuusi kiehutusvesireaktoria ja Dainin ydinvoimalaitoksella neljä. Japanissa tapahtui Sendain maanjäristys 11.3.2011, joka oli voimakkuudeltaan 9,0 magnitudia ja kesti noin kolme minuuttia. Maanjäristyksen keskipiste sijaitsi merellä 32 kilometrin syvyydessä ja noin 180 kilometrin etäisyydellä Fukushiman ydinvoimalaitoksista. Kuvassa 5 on esitetty Sendain maanjäristyksen sijainti. Maanjäristyksen keskipiste (epicenter) on merkitty karttaan rastilla ja punaisella

merkityt etäisyydet ovat joidenkin kaupunkien etäisyyksiä Fukushiman ydinvoimalaitoksesta. (WNA 2015.)



Kuva 5. Sendain maanjäristyksen sijainti. Maanjäristyksen keskipiste on merkitty karttaan rastiilla (epicenter). (UBE Industries, 2011.)

Fukushima Daichin ydinvoimalaitos on rakennettu 10 metriä merenpinnan yläpuolelle ja suunniteltu kestävänsä 13,1 metriä korkea tsunamiaalto. Fukushima Daini puolestaan on rakennettu 13 metriä merenpinnan yläpuolelle ja suunnitteluperusteisen tsunamin korkeus on 18,7 metriä. Sendain maanjäristyksen aikaansaama tsunamiaalto oli Fukushima Daichin ydinvoimalaitokselle saapuessaan 15,7 metriä korkea ja Dainin ydinvoimalaitokselle saapuessaan 9 metriä korkea. (WNA 2015.)

Maanjäristys itsessään ei vaurioittanut Fukushiman ydinvoimalaitoksia merkittävästi, vaikka laitosten suunnitteluperusteinen maanjäristys ylittyikin noin 20 prosentilla. Fukushima Dainissa kaikki neljä reaktoria ajettiin automaattisesti alas maanjäristyksen sattuessa. Tsunami vahingoitti laitoksen hätädieselgeneraattoreita, mutta yksi voimalinja säilyi vahingoittumana. Dainin ydinvoimalaitoksen sähkönsyöttö ja reaktorin jälkiläm-

mönpoisto pystyttiin tämän ansiosta turvaamaan, eikä laitoksen reaktorisydän vaurioitunut. (WNA 2015.)

Fukushima Daichi sen sijaan kärsi suuremmat vahingot. Laitoksen kuudesta reaktorista kolme oli jo valmiiksi ajettu alas huoltotöitä varten ja loput kolme reaktoria ajettiin alas automaattisesti maanjäristyksen sattuessa. Tsunamiaalto vahingoitti sekä jälkilämmön poistoon käytettäviä pumppuja että hätädieselgeneraattoreita. Ainoastaan ilmajäähdytteinen hätägeneraattori, jolla syötettiin sähköä reaktoreiden 5 ja 6 tarpeeseen, säilyi toimintakykyisenä. Laitosyksöiden 1,2 ja 4 sähkönsyöttö menetettiin täysin, mutta laitosyksikkö 3:n akkuvarmennus toimi vielä 30 tunnin ajan. Tämän jälkeen myös tämä laitosyksikkö jäi ilman ulkoista sähkönsyöttöä. Reaktori 4 oli huoltotöiden vuoksi tyhjenetty polttoaineesta, mutta reaktoreissa 1-3 polttoaineen jälkilämpöteho aiheutti lämpötilan nousemisen ja polttoaineen osittaisen sulamisen. Kaikilla neljällä laitosyksiköllä tapahtui myös vetyräjähdymiä, jotka rikkoivat suojarakennuksia ja levittivät radioaktiivisia päästöjä ympäristöön. Reaktoreihin 1-3 pumpattiin merivettä niiden jäähdyttämiseksi ja ulkoinen sähkönsyöttö saatiin palautettua vasta noin kahden viikon kuluttua onnettomuudesta. Toimintakykyisenä pysyneen hätägeneraattorin ansiosta reaktoreiden 5 ja 6 reaktorisydämet säilyivät vahingoittumina. (WNA 2015.)

Fukushiman ydinvoimalaitosonnettomuus luokiteltiin aluksi vakavuudeltaan INES 5 -luokan onnettomuudeksi. Kuukausi tsunamin jälkeen onnettomuus nostettiin kuitenkin suurten radioaktiivisten päästöjen takia vakavimpaan INES 7 -luokkaan. Ydinvoimalaitosonnettomuus ei aiheuttanut yhtään lyhytaikaisesta säteilyannoksesta johtuvaa kuolemaan, mutta yli 100 000 ihmistä jouduttiin evakuoimaan laitoksen lähialueilta. Dekontaminointityöt jatkuvat edelleen Fukushimaa ja alueen puhdistuksen on arvioitu kestävän vielä 40 vuotta. (WNA 2015.)

8 YHTEENVETO

Fukushiman ydinvoimalaonnettomuus oli ensimmäinen luonnonilmiöiden aiheuttama vakava ydinonnettomuus. Onnettomuuden jälkeen alettiin tutkia ympäri maailmaa, olisiko vastaavanlainen onnettomuus mahdollinen myös muualla. Tulva voi vaarantaa ydinvoimalaitoksen turvallisuuden, sillä tulvavesi saattaa rikkoa reaktorin jäähdytykseen tarvittavat laitoskomponentit. Myös sähkönsyöttö laitokselle ulkopuolisesta verkosta voidaan menettää tulvaveden saarrettua voimalaitosalueen. Pahimmassa tapauksessa ydinvoimalaitoksen reaktorisydän kuumenee niin paljon, että polttoaine sulaa ja ympäristöön vapautuu radioaktiivisia päästöjä.

IAEA suosittelee, että laitoksen alttiutta tulville tarkastellaan korkean merenpinnan, tsunamien, rankkasateen, myrskyaaltojen ja lumen sulamisen osalta. Tarkastelussa on tarvittaessa huomioitava myös veden äkillinen vapautuminen esimerkiksi padon tai laitosalueella sijaitsevan suuren säiliön hajotessa. Tulvariskiä arvioidaan tarkastelemalla laitosalueen lähiympäristöstä kerättyjä meteorologisia ja hydrologisia tilastotietoja. Eri-laisten tulvamahdollisuuksien tunnistaminen on ensisijaisen tärkeää, jotta niihin voidaan varautua riittävän hyvin.

Tavallisesti ydinvoimalaitoksilla tulviin varautumisen lähtökohdaksi otetaan se, että tulvaveden pääseminen laitosalueelle estetään korkeuserojen tai kiinteiden tulvaesteiden avulla. Tämän lisäksi poikkeuksellisen korkealle nousevaan veteen on varauduttu tekeillä turvallisuuden kannalta kriittisten järjestelmien huonetilat vesitiiviiksi. Yleensä tulvasta saadaan ennakkovaroitus ennen kuin vesi nousee niin korkealle, että se uhkaa laitoksen turvallisuutta. Tällöin laitos ehditään ajamaan alas ja tulvasuojausta on mahdollista parantaa edelleen hiekkasäkkien ja siirrettävien tulvaesteiden avulla. Lainsäädäntö ohjaa tulviin varautumista kansallisella tasolla, mutta kansainvälisen yhteistyön tulokset vaikuttavat huomattavasti myös kansallisiin määräyksiin. Lakisäädösten mukaan laitokselle on määriteltävä suunnitteluperusteinen tulva, jota käytetään referenssitulvana tulvasuojausta suunniteltaessa.

EU:n stressitesteissä tarkasteltiin perusteellisesti eurooppalaisten ydinvoimaloiden turvallisuutta ulkoisia uhkia vastaan. Tulviin varautumisen osalta puutteita löydettiin suunnitteluperusteisesta tulvasta. Tulvariskiä ei ollut laskettu kaikkialla uusimpien suo-

situsten mukaan. Myös suunnitteluperusteista suurempaa tulvaa ei ollut tutkittu kaikilla ydinvoimalaitoksilla. Esimerkiksi Belgiassa suunnitteluperusteisen tulvan ei katsottu olevan riittävän suuri ja Tihangen voimalaitoksen ympärille rakennetaan tulvavalli lisäsuojaksi joen tulvimisen varalta. Ruotsin ydinvoimaloiden kohdalla haluttiin lisäselvityksiä suunnitteluperusteista suuremman tulvan vaikutuksista. Suomen laitoksista merkittävimmät havainnot olivat Olkiluodossa käytetyn polttoaineen varaston puutteellinen tulvasuojaus ja Loviisassa huono varautuminen tulvaan laitoksen ollessa huoltoseisokissa. Molempia on parannettu stressitestien jälkeen.

Euroopan ulkopuolelta esimerkkeinä on käsitelty Taiwania ja Yhdysvaltoja. Taiwanissa suurin tulvariski aiheutuu tsunamiaista, joihin varautumista on parannettu tsunamiaallon korkeuden laskentaan liittyvien epävarmuuksien vuoksi. Yhdysvalloissa puolestaan patojen murtuminen Fort Calhounin ja Oconeen ydinvoimaloiden yläjuoksulla saisi aikaan suunnitteluperusteista suuremman tulvan. Vuonna 2011 Missouri-joen tulviminen aiheutti Fort Calhounin ydinvoimalassa laitoksen turvallisuuden vaarantumisen. Käytetyn polttoaineen varastointialtaan jäähdytys menetettiin puoleksitoista tunniksi. Mikäli jäähdytystä ei olisi saatu palautettua, olisi jäähdytysaltaan vesi alkanut kiehua alle neljässä vuorokaudessa. Muutama viikko myöhemmin väliaikainen tulvavalli romahti, jolloin laitoksen sähkönsyöttö ulkoisesta verkosta menetettiin. Varajärjestelmät kuitenkin toimivat, joten laitoksen reaktorisydämen jäähdytys ei vaarantunut missään vaiheessa. Japanissa vuonna 2011 Sendain maanjäristys aiheutti tsunamiaallon, joka osui Fukushima Daichin ydinvoimalaitokseen. Tsunami oli suurempi, kuin mihin laitoksella oli varauduttu ja seurauksena oli sähkönsyötön täydellinen menetys. Kolmen reaktorin jälkilämpötehoa ei pystytty poistamaan, joten polttoaine kuumentui niin paljon, että se suli osittain. Radioaktiivisia aineita vuoti ympäristöön ja onnettomuus luokiteltiin yhdeksi pahimmaksi koskaan sattuneista ydinvoimalaitosonnettomuuksista.

LÄHDELUETTELO

EIA, 2010a. Nebraska Nuclear Profile 2010. [EIA:n www-sivuilla]. Päivitetty 26.4.2012. [viitattu 18.4.2015]. Saatavissa: <http://www.eia.gov/nuclear/state/nebraska/>

EIA, 2010b. South Carolina Nuclear Profile 2010. [EIA:n www-sivuilla]. Päivitetty 26.4.2012. [viitattu 18.4.2015]. Saatavissa: <http://www.eia.gov/nuclear/state/southcarolina/>

ENSREG, Stress Test Peer Review Board, 2012. Final report on the Peer Review of EU Stress Tests. 53 s. Verkkojulkaisu. Päivitetty 26.4.2012. [viitattu 26.4.2015]. Saatavissa: <http://www.ensreg.eu/node/407>

Euroopan komissio, 2012. Komission tiedonanto neuvostolle ja Euroopan parlamentille Euroopan unionin ydinvoimalaitosten kattavista riski- ja turvallisuusarvioinneista (”stressitesteistä”) ja niihin liittyvistä toimista. Verkkojulkaisu. Päivitetty 4.10.2012. [viitattu 12.2.2015]. Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:52012DC0571&from=EN>

FANC, 2011. Belgian stress tests, national report for nuclear power plants. 210 s. Verkkojulkaisu. Päivitetty 2.1.2012. [viitattu 13.2.2015]. Saatavissa: <http://www.ensreg.eu/node/359>

FANC, 2014. Belgian stress tests, national progress report on the stress tests of nuclear power plants. 27 s. Verkkojulkaisu. Päivitetty 20.1.2015. [viitattu 16.2.2015]. Saatavissa: <http://www.ensreg.eu/node/3783>

Kakkuri Juhani, 2007. Muuttuva maa. Hämeenlinna: WSOY. 159s. ISBN 978-951-0-32275-8

Kyrki-Rajamäki Riitta, 2011. Reaktorimateriaalit ja yleisimmät reaktortyyppit, Ydinvoimatekniikka I. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto, teknillinen tiedekunta, ydinvoimatekniikan laboratorio. 182 s.

Mega-Tech Services, 2014a. Technical Evaluation Report Related to Order Modifying Licenses with Regard to Requirements for Mitigation Strategies for Beyond-Design-Basis External Events, EA-12-049, Fort Calhoun Station. 81 s. Verkkajulkaisu. Päivitetty 7.4.2015. [viitattu 16.4.2015].

Saatavissa: <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1400/ML14007A693.pdf>

Mega-Tech Services, 2014b. Technical Evaluation Report Related to Order Modifying Licenses with Regard to Requirements for Mitigation Strategies for Beyond-Design-Basis External Events, EA-12-049, Oconee Nuclear Station. 116 s. Verkkajulkaisu. Päivitetty 7.4.2015. [viitattu 18.4.2015].

Saatavissa: <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1336/ML13365A258.pdf>

Nebraska Power Association, 2011. Missouri River Flooding of 2011. [Nebraska Power Associationin [www-sivuilla](http://www.nepower.org)]. [viitattu 19.4.2015]. Saatavissa: <http://www.nepower.org/our-business/resource-mix/missouri-river-flooding-of-2011/>

NRC, Office of Nuclear Regulatory Research, Division of Risk Analysis, 2011a. Screening Analysis Report for the Proposed Generic Issue on Flooding of Nuclear Power Plant Sites Following Upstream Dam Failures. 47s. Verkkajulkaisu. [viitattu 15.4.2015]. Saatavissa: <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1135/ML113500495.pdf>

NRC, Office of Nuclear Regulatory Research, Operations Center, 2011b. Event Notification Report for June 6, 2011. [NRC:n [www-sivuilla](http://www.nrc.gov)]. Päivitetty 29.3.2012. [viitattu 20.4.2015]. Saatavissa: <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/event-status/event/2011/20110606en.html#en46929>

NRC, Office of Nuclear Regulatory Research, Operations Center, 2011c. Event Notification Report for June 8, 2011. [NRC:n [www-sivuilla](http://www.nrc.gov)]. Päivitetty 29.3.2012. [viitattu 20.4.2015]. Saatavissa: <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/event-status/event/2011/20110608en.html#en46932>

NRC, Office of Nuclear Regulatory Research, Operations Center, 2011d. Event Notification Report for June 27, 2011. [NRC:n www-sivuilla]. Päivitetty 29.3.2012. [viitattu 20.4.2015]. Saatavissa: <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/event-status/event/2011/20110627en.html#en46989>

NRC, Office of Nuclear Regulatory Research, 2013. Confirmatory Action Letter – Fort Calhoun Station. 4s. Verkkojulkaisu. Päivitetty 17.12.2013. [viitattu 20.4.2015]. Saatavissa: <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1335/ML13351A395.pdf>

Ohje YVL A.7. 15.11.2013 / Ydinvoimalaitosohje. ISBN 978-952-478-923-3.

Ohje YVL B.7. 15.11.2013 / Ydinvoimalaitosohje. ISBN 978-952-478-872-4.

Routamo Tomi, 2011. European Stress Tests for Nuclear Power Plants, National Report, Finland. STUK. 3/0600/2011. 236 s. Verkkojulkaisu. Päivitetty 2.1.2012. [viitattu 13.2.2013]. Saatavissa: <http://www.ensreg.eu/node/361>

STI/PUB/1170. Safety standards series no. NS-G-3.5. 2003. Flood hazard for nuclear power plants on coastal and river sites: safety guide. International Atomic Energy Agency. Itävalta, Vienna: IAEA. 83 s. ISBN 92-0-112803-7.

STI/PUB/1506. Specific safety standards series no. SSG-18. 2011. Meteorological and hydrological hazards in site evaluation for nuclear installations: safety guide. International Atomic Energy Agency. Itävalta, Vienna: IAEA. 146 s. ISBN 978-92-0-115210-7.

Strålsäkerhetsmyndigheten (Swedish Radiation Safety Authority). 2011. European stress tests for nuclear power plants, The Swedish National Report. 247 s. Verkkojulkaisu. Päivitetty 30.12.2011. [viitattu 24.2.2015]. Saatavissa: <http://www.ensreg.eu/node/358>

Strålsäkerhetsmyndigheten (Swedish Radiation Safety Authority). 2014. Swedish action plan for nuclear power plants, Response to ENSREG's request Rev.1. 70 s. Verkkojulkaisu. Päivitetty 5.1.2015. [viitattu 24.2.2015]. Saatavissa: <http://www.ensreg.eu/node/3775>

STUK, 2012. European Stress Tests for Nuclear Power Plants, National Action Plan, Finland. 45 s. Verkkojulkaisu. Päivitetty 21.12.2012. [viitattu 13.2.2013]. Saatavissa: <http://www.ensreg.eu/node/688>

STUK, 2014. European Stress Tests for Nuclear Power Plants, National Action Plan, Finland. 51 s. Verkkojulkaisu. Päivitetty 5.1.2015. [viitattu 9.2.2015]. Saatavissa: <http://www.ensreg.eu/node/3766>

Taiwan regulatory body, 2013. Taiwan Stress Test National Report for Nuclear Power Plants. 239 s. Verkkojulkaisu. Päivitetty 13.11.2013. [viitattu 30.3.2015]. Saatavissa: <http://www.ensreg.eu/node/3780>

U.S. Department of Commerce, 2012. The Missouri/Souris River Floods of May - August 2011. 104 s. Verkkojulkaisu. [National Weather Servicen www-sivuilla]. Päivitetty 12.12.2014. [viitattu 20.4.2015]. Saatavissa: <http://www.nws.noaa.gov/os/assessments/>

UBE Industries, 2011. Impact on Ube Group from the Great East Japan Earthquake. [UBE Industriesin www-sivuilla]. Päivitetty 21.4.2011. [viitattu 1.5.2015]. Saatavissa: http://www.ube-ind.co.jp/english/index_news/index_news_03.htm

WNA, 2015. Fukushima Accident. [WNA:n www-sivuilla]. Päivitetty 1.2.2015. [viitattu 27.4.2015]. Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/info/safety-and-security/safety-of-plants/fukushima-accident/>