



OULUN YLIOPISTO
UNIVERSITY of OULU

KONETEKNIIKAN KOULUTUSOHJELMA

YDINVOIMALAN RAKENNESUUNNITTELUN ERITYISPIIRTEET

Jani Koskela

KANDIDAATINTYÖ
2016

Ohjaaja: Hannu Liedes

TIIVISTELMÄ

Ydinvoimalan rakennesuunnittelun erityispiirteet

Jani Koskela

Oulun yliopisto, Konetekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö 2016, 31 s. + 1 s. liitteitä

Työn ohjaajat: Hannu Liedes

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena oli selvittää ydinvoimaloiden rakennesuunnittelun erityispiirteitä suhteessa tavanomaiseen rakentamiseen kuormitusten ja kantavien rakenteiden osalta. Työssä selvitettiin myös ydinvoimarakentamista sääntelevää laidäädäntöä ja määräyksiä erityisesti rakennuksia ja rakenteita koskien. Työ tehtiin kirjallisuuskatsauksena.

Asiasanat: Ydinvoimalat, rakennesuunnittelu, määräykset.

ABSTRACT

Special features in structural design of a nuclear power plant

Jani Koskela

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis 2016, 31 p. + 1 p. appendixes

Supervisors: Hannu Liedes

The object of this bachelor's thesis was to find out features which separate structural design of nuclear power plants from conventional building design. Legislation and regulations governing nuclear power building, especially those related to structures, are also reviewed in this thesis. This thesis was conducted as a literature review.

Keywords: Nuclear power plant, structural design, regulations.

ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö on tehty osana tekniikan kandidaatin tutkintoa Oulun yliopistossa. Työssä tutkitaan ydinvoimarakentamisen rakennesuunnitteluun liittyviä erityispiirteitä verrattuna tavanomaiseen rakentamiseen sekä tutustutaan ydinvoimarakentamista koskevaan lainsäädäntöön.

Kiitokset Hannu Liedekselle työn ohjauksesta ja Mikko Malaskalle avusta tiedonhankinnassa.

Oulu, 14.4.2016

Jani Koskela

SISÄLLYSLUETTELO

| | |
|---------------------------------------------------------|----|
| TIIVISTELMÄ | 2 |
| ABSTRACT | 3 |
| ALKUSANAT | 4 |
| SISÄLLYSLUETTELO..... | 5 |
| 1 JOHDANTO | 6 |
| 2 YDINVOIMALAITOS | 7 |
| 2.1 Toiminta | 7 |
| 2.2 Laitoksen rakenne | 10 |
| 2.3 Turvallisuus..... | 11 |
| 2.3.1 Periaate | 11 |
| 2.3.2 INES –asteikko | 12 |
| 2.3.3 Turvallisuusluokat | 13 |
| 3 LAINSÄÄDÄNTÖ | 15 |
| 3.1 Lait | 15 |
| 3.2 YVL -ohjeet | 16 |
| 3.3 Lupaprosessi..... | 16 |
| 4 KUORMAT JA KUORMITUSYHDISTELMÄT | 18 |
| 4.1 Mitoittavat tilanteet ja kuormat..... | 18 |
| 4.2 Kuormitusyhdistelmät ja sallittavuuskriteerit | 20 |
| 5 RUNKORAKENTEET | 22 |
| 5.1 Suunnittelu | 23 |
| 5.2 Betonirakenteet | 24 |
| 5.3 Teräs- ja liittorakenteet | 26 |
| 6 YHTEENVETO | 28 |
| 7 LÄHDELUETTELO..... | 29 |
| LIITE | |

1 JOHDANTO

Ydinvoima tuottaa neljänneksen Suomen energiasta ja on näin ollen suurin yksittäinen energian tuotantomuoto Suomessa. Ydinvoima on teknisesti haastava tuotantomuoto, jonka käytön ja turvallisuuden eteen tehdään jatkuvasti töitä. Laitoksen rakennesuunnittelu on perustavaa laatua oleva osa laitoksen koko elinkaaren aikaista turvallisuutta. Tavallisten eurokoodikäytäntöjen lisäksi ydinvoimalaitoksen rakennesuunnittelu vaatii erityiskuormien huomioimista. Tällaisia kuormia voivat olla muun muassa säteily, korkeat ja matalat lämpötilat sekä erilaiset törmäysilmiöt onnettomuustilanteissa. Ydinvoima on juuri nyt ajankohtainen aihe erityisesti Pohjois-Pohjanmaan maakunnalle, mutta myös koko Suomelle. Suomen eduskunta hyväksyi joulukuussa 2014 Fennovoiman ydinvoiman lisärakentamista koskevan periaatepäätöksen täydennyshakemuksen ja kesäkuussa 2015 Fennovoima jätti rakentamislupahakemuksen valtioneuvostolle. Samalla tukirakennuksia ja infrastruktuuria alueelle on jo alettu rakentaa. Tämän työn valmistumisen aikaan Pyhäjoen Hanhikivelle kaavailtu laitos on siis hyvin lähellä toteutumista. On tullut ajankohtaiseksi luoda katsaus tällä hetkellä voimassa oleviin ydinvoimalaitoksen rakennesuunnittelun perusteisiin sekä asianomaisiin sääntöihin.

Ydinvoimaloita koskeva ohjeistus on muuttunut sitten Olkiluoto 3:n rakennustöiden alkamisen ja tässä tutkimuksessa käydään läpi olennaiset tämän hetkiset säädökset tiivistetysti. Tutkimuksella on tarkoitus selvittää rakennesuunnitteluun liittyvät, ydinvoimalalle ominaiset piirteet. Tämä käsittää voimalan eri osien vaatimukset rakenteiden kestävyydelle ja onnettomuuskuormille. Tutkimuksessa selvitetään tyypillisimpien runkorakenteiden huomioon otettavat erityispiirteet ydinvoimalaitoksissa.

Tutkimus rajoittuu Suomen lainsäädännön piiriin. Tutkimuksessa keskitytään ydinvoimalaitokselle ominaisiin piirteisiin, joten tavanomaisen rakentamisen tapauksia ei juurikaan käsitellä, vaikka niitä osittain sovellettaisiinkin. Maanjäristysmitoitukseen ei paneuduta tarkasti ja paloturvallisuuden käsittely jätetään pois kandidaatintyön laajuuden pitämiseksi tarkoituksen mukaisena.

2 YDINVOIMALAITOS

Ydinvoimaa on tuotettu kaupalliseen käyttöön 1950-luvulta lähtien. Ensimmäinen sähköverkkoon liitetty ydinvoimalaitos aloitti toimintansa vuonna 1954 Obninskissa Neuvostoliitossa ja ensimmäinen kaupallinen laitos Seascalessa Englannissa vuonna 1956. Ydinreaktoreiden määrä maailmassa kasvoi voimakkaasti aina 1980-luvulle saakka. Reaktoreiden määrän kasvu kuitenkin lähes pysähtyi 1980-luvun puolivälissä voimistuneen kansalaisvastustuksen sekä Three Mile Islandin ja Tšernobylin onnettomuuksien jälkeen. Ydinvoimarakentamisen elpymistä koettiin vuosituhannen vaihteen jälkeen muun muassa kasvavan energian- ja energiavarmuuden tarpeen sekä kasvihuoneilmiön hillitsemisen vuoksi. Samaan aikaan saataville tuli kehittyneempiä ja paranneltuja III+ -tyypin reaktoreita, joiden turvallisuus on aikaisempia parempi. Näistä ensimmäinen on Olkiluoto 3. (IAEA 2004a; WNA 2014).

Ydinvoima energiantuotannossa perustuu atomiytimien sidosenergian vapauttamiseen. Nykytilanteessa tämä tarkoittaa lähinnä atomeista fissioreaktiossa vapautuvan energian hyödyntämistä. Atomiytimien haljetessa osa niiden massasta muuttuu energiaksi, jolla ydinreaktorissa oleva vesi muutetaan turbiineita pyörittäväksi höyryksi ja saatu liike-energia edelleen generaattoreilla sähköksi. Ydinpolttoaineen energiasisältö verrattuna tavanomaisiin polttoaineisiin on hyvin suuri ja sitä kuvaa Albert Einsteinin vuonna 1905 esittämä energian, massan ja valonnopeuden yhteys $E = mc^2$. Maaliskuusa 2015 maailmassa oli 440 toimivaa ydinreaktoria, jotka tuottivat noin 378 GW sähköä. Rakenteilla oli 68 reaktoria lisää, joista yksi Suomeen. Fissioreaktiolla tuotettu ydinvoima, poislukien ydinkäyttöiset alukset, vastasi vuonna 2012 13 %:sta maailman sähköntuotantoa. (IAEA 2015; WNA 2016).

2.1 Toiminta

Ydinreaktio saadaan ydinvoimalassa aikaan pommittamalla neutronilla atomiydintä, joka yleisimmin on uraanin U-235 isotooppi. Tämä saa ytimen halkeamaan, jolloin vapautuu uusia neutroneja, jotka puolestaan törmäävät uusiin atomiytimiin ja syntyy ketjureaktio. Ydinten haljetessa osa niiden massasta muuttuu atomien ja neutronien

liike-energiaksi, mikä puolestaan muuttuu hyvin nopeasti lämmöksi neutronien törmäillessä läheisiin atomiytimiin. Saadun lämmön avulla höyrystetään vettä, joka pyörittää turbiinia ja generaattorin avulla liike-energia muutetaan sähköksi. (Energiateollisuus ry 2009).

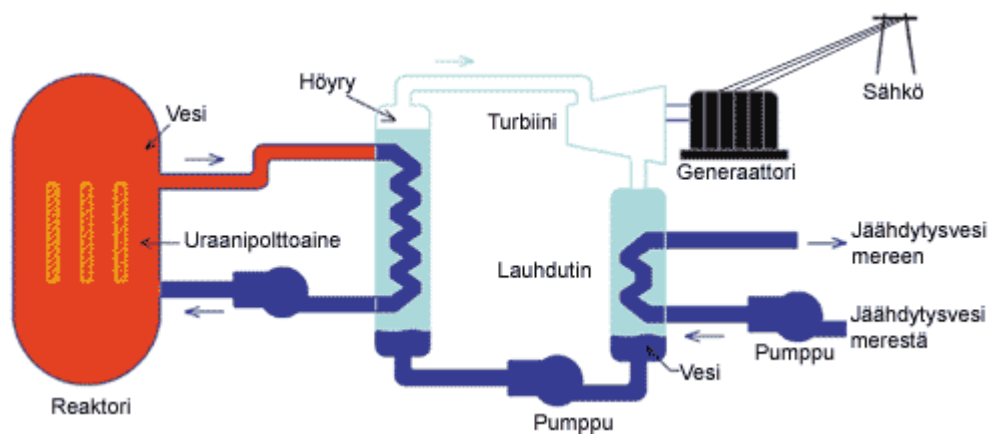
Reaktiota hallitaan hidasteen ja säätösauvojen avulla. Halkeamisessa vapautuneet neutronit liikkuvat keskimäärin 10000 km/s, kun optimaalinen nopeus ketjureaktion ylläpitämiseksi on huomattavasti pienempi. Tämän vuoksi neutronit hidastetaan esimerkiksi veden tai grafiitin avulla joihinkin tuhansiin metreihin sekunnissa, mikä moninkertaistaa uraaniytimien halkeamisen todennäköisyyden. Jos polttoaineena on plutonium, voi reaktorin toiminta perustua hidastamattomien neutronien käyttöön. Tällaiset laitokset eivät tosin toistaiseksi ole taloudellisesti kannattavia. Reaktorin tehoa säädetään säätösauvojen avulla. Sauvat sisältävät tehokkaasti neutroneja absorboivaa ainetta, jolloin vietyinä polttoainesauvojen väliin ne vähentävät ketjureaktiossa olevien neutronien määrää. Täten atomiytimiä halkeilee vähemmän ja teho reaktorissa pienenee. (Energiateollisuus ry 2009).

Maailmalla toimii ydinvoimareaktoreita, jotka käyttävät erityyppisiä tekniikoita ja ne voidaan jaotella useammalla tavalla. Reaktortyyppit voidaan jaotella esimerkiksi käytettävän hidasteen mukaan:

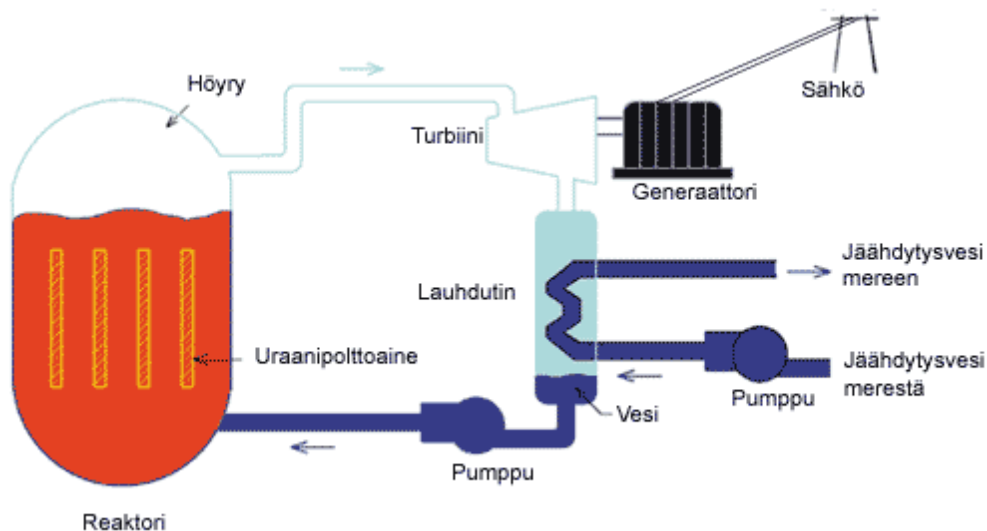
- Kevytvesireaktorit: painevesireaktorit (PWR) ja kiehutusvesireaktorit (BWR) kuuluvat tähän ryhmään. Polttoaineena käytetään rikastettua urania ja hidasteena sekä jäähdyttimenä käytetään tavallista vettä. Noin 80% maailman reaktoreista on kevytvesireaktoreita.
- Raskasvesireaktorit: yleisin raskasvesireaktori on kanadalaisten kehittämä Canadian Deuterium Uranium Reactor (CANDU). Nämä reaktorit rakenteeltaan paineputkireaktoreita ja sekä hidasteena, että jäähdyttimenä on raskas vesi. Polttoaineena voidaan käyttää luonnonuraa, joka ei vaadi jalostamista.
- Grafiittihidasteiset reaktorit: kevytvesijäähdytteisessä grafiittihidasteisessa reaktorissa (neuvostoliittolainen RBMK) polttoaineena on rikastettu uraani ja polttoaine-elementit ovat omissa paineputkissaan, joissa jäähdytysvesi kulkee. Nämä reaktorit eivät tarvitse suurta painekattilaa ja polttoainetta voidaan vaihtaa

reaktorin toimiessa. Kaasujäähdytteisessä grafiittihidasteisessa reaktorissa (britannialaiset AGR ja Magnox) jäähdytteenä toimii hiilidioksidi ja polttoaineena käytetään luonnonuraania.

- Muut: edellisistä poikkeavat reaktorityypit ovat joko toistaiseksi taloudellisesti kannattamattomia, tai vasta tutkimusasteella. Tällaisia ovat esimerkiksi hyötöreaktori (FBR) ja fuusioreaktori: Hyötöreaktorissa ei käytetä hidastetta lainkaan ja polttoaineena on plutonium. Fuusioreaktorissa energia syntyy fission sijaan vedyn isotooppien yhdistyessä heliumytimeksi. (WNA 2016).



Kuva 1. Painevesireaktorin toimintakaavio. (Energiateollisuus ry 2016a)



Kuva 2. Kiehumisvesireaktorin toimintakaavio (Energiateollisuus ry 2016b)

Kevytvesireaktorit jakautuvat siis painevesi- ja kiehutusvesireaktoreihin ja 80% maailman reaktoreista on niitä. Painevesireaktorissa (ks. kuva 1) polttoaine-elementit lämmittävät yleensä 15 MPa:n paineessa vettä noin 300 °C asteiseksi. Vesi kiertää edelleen nestemäisenä höyrystimelle, jossa se luovuttaa lämpönsä sekundääripiirissä pienemmässä, noin 7 MPa:n paineessa virtaavalle vedelle. Sekundääripiirin vesi höyrystyy ja se ohjataan pyörittämään turbiinijärjestelmää. Sekundääripiirin ansiosta painevesireaktorin turbiinilaitoksessa ei ole radioaktiivisuutta. Kuvan 2 mukaisessa kiehutusvesireaktorissa vesi höyrystyy noin 7 MPa:n paineessa olevassa reaktorissa ja höyry ohjataan suoraan turbiinijärjestelmälle. Sekundääripiirin puuttuessa myös turbiinilaitos on radioaktiivinen eikä turbiinin läheisyydessä voi oleskella laitoksen käydessä. Toisaalta vähäisempi laitteisto tekee kiehutusvesilaitoksesta yksinkertaisemman. (Energiateollisuus ry 2009).

2.2 Laitoksen rakenne

Ydinvoimalaitoksen rakennukset voidaan jakaa karkeasti reaktorilaitoksen rakennuksiin (reaktorisaareke), turbiinilaitoksen rakennuksiin (turbiinisaareke) ja muihin rakennuksiin (esimerkiksi toimistorakennus). Laitoksen kokoonpano vaihtelee laitostyyppin ja käytettyjen ratkaisujen mukaan. Moderneissa paine- ja kiehutusvesilaitoksissa on kuitenkin yleensä tietyt peruselementit:

- Reaktorirakennus pitää sisällään nimensä mukaisesti reaktorin, jonka sisällä sydän ja primääripiiri (painevesireaktorissa) sekä turvalaitteita ja järjestelyjä onnettomuuksien varalle. Reaktorirakennus on yleensä suojattu kahdella, sisemmällä ja ulommalla suojarakennuksella säteilyturvallisuuden ja ulkoisten uhkien varalta.
- Polttoainerakennuksessa säilytetään käyttämätön polttoaine sekä radioaktiivinen käytetty ja käsitelty polttoaine omissa tiloissaan.
- Turvajärjestelmärakennuksiin sijoitetaan turvallisuuteen ja onnettomuus-, vika- ja häiriötilanteisiin liittyvät järjestelmät. Turvallisuusjärjestelmät ovat moderneissa laitoksissa toisistaan riippumattomia ja ne sijoitetaan erillisiin rakennuksiin.

- Dieselrykennuksessa on dieselpolttoaineella toimiva generaattori ja siihen liittyvät apujärjestelmät. Tilanteessa jossa laitoksen virransaanti häiriintyy, generaattorit tuottavat sähköä turvallisuusjärjestelmille.
- Reaktorin apurakennuksessa on reaktorin päivittäiseen käyttöön ja huoltoon (kemiallinen testaus, polttoaineen vaihto yms.) liittyvät laitteistot.
- Jätteenkäsittelyrakennukseen kerätään radioaktiivinen jäte, se varastoidaan ja käsitellään.
- Turbiinirakennukseen sijoitetaan turbiinit, generaattorit, lauhduttimet ja laitteistot joilla höyryn energia muutetaan sähköksi. (Gonyeau 2005; Myllymäki 2012).

2.3 Turvallisuus

Turvallisuus ydinvoimalassa edellyttää kaikissa tilanteissa toimivaa jäähdytystä reaktorissa olevalle polttoaineelle. Ydinreaktiossa polttoaineeseen kertyy radioaktiivisia aineita, joiden säteily tuottaa reaktorin sammuttamisen jälkeenkin jälkilämpöä. Mikäli reaktorin sydäntä ei jatkuvasti jäähdytetä, polttoaineen tuottama lämpö sulattaa polttoaineen suojakuoret ja radioaktiiviset aineet voivat päätyä suojarakennukseen. (Energiateollisuus ry 2009).

2.3.1 Periaate

Ydinenergialain (990/1987) 7 b §:n mukaan ydinvoimalaitosten turvallisuus varmistetaan Suomessa niin sanotulla syvyysuuntaisella turvallisuusperiaatteella (ks. taulukko 1), joka on kehitetty turvallisuussuunnittelun perusideaksi jo 1950-luvulla. Tässä käytetään peräkkäisiä, toisistaan riippumattomia toiminnallisia ja rakenteellisia suojausjärjestelmiä, joiden avulla minimoidaan sekä inhimillisten erehdysten, että laitevikojen mahdollisuus ja seuraukset. Toiminnallisten suojausten ideana on ensin ennaltaehkäistä vahingot ja onnettomuudet. Ennaltaehkäisyä peitetään varaudutaan maksimoimalla vahinkojen kestävyys, eli hallitaan vikatilanteet ja onnettomuudet. Pahimmassa tapauksessa rajoitetaan vakavista onnettomuuksista johtuvia päästöjä ja lievennetään onnettomuuden seurausten vaikutuksia. (Myllymäki 2012; YVL B.1).

Taulukko 1. Syvyysuuntainen turvallisuusperiaate. (mukaillen Myllymäki 2012; YVL B.1).

| ONGELMA | VASTATOIMI |
|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Häiriöiden ja vikojen yms. ennaltaehkäisy | Turvallisuusmarginaalit, tekninen laatu |
| Häiriöiden ja vikojen hallinta | Säätö, rajoitus, suojaus, häiriönohjaus |
| Onnettomuustilanteiden hallinta | Turvallisuusjärjestelmät, hätätilaohjeet |
| Vakavien onnettomuuksien päästön rajoittaminen | Vakavan onnettomuuden hallintajärjestelmät ja -ohjeet |
| Seurausten lieventäminen | Valmiustoiminta, vastatoimet laitoksen ympäristössä |

2.3.2 INES –asteikko

Kansainvälinen atomienergiajärjestö IAEA on luonut International Nuclear Event Scale (INES) –asteikon kuvaamaan ydinlaitoksissa tapahtuvien onnettomuuksien vakavuutta. Asteikon avulla kansainvälinen yhteiso voi vertailla eri tyyppisissä laitoksissa tapahtuvia tapahtumia ja onnettomuuksia ydin- ja säteilyturvallisuuden näkökulmasta. Asteikon alemmilla luokilla 1-3 kuvataan tapahtumia, joilla on vaikutusta laitosturvallisuuteen. Luokat 4-7 kuvaavat onnettomuuksia, joilla voi olla säteilysuojelutoimenpiteitä aiheuttavia päästöjä ympäristöön. Luokat 1-3 ovat siis tapahtumia ja 4-7 onnettomuuksia:

- INES 7: Erittäin vakava onnettomuus
- INES 6: Vakava onnettomuus
- INES 5: Ympäristölle vaaraa aiheuttava onnettomuus
- INES 4: Laitosonnettomuus
- INES 3: Vakava turvallisuuteen vaikuttava tapahtuma
- INES 2: Merkittävä turvallisuuteen vaikuttava tapahtuma
- INES 1: Poikkeuksellinen turvallisuuteen vaikuttava tapahtuma
- INES 0: Poikkeuksellinen tapahtuma, jonka turvallisuusmerkitys on kuitenkin niin vähäinen, että sitä ei voida sijoittaa varsinaiselle asteikolle. (IAEA 2013).

Suomessa ei ole ollut INES -asteikon mukaisia onnettomuuksia. Laitosturvallisuuteen vaikuttaneita INES 1 -tapahtumia on keskimäärin muutama vuodessa ja INES 2 -tapahtumia on ollut 7 vuosina 1977-2008. Erittäin vakavia INES 7 -luokan onnettomuuksia on ollut historiassa kaksi, Tšernobylässä Ukrainassa vuonna 1986 ja Ōkumassa Japanin Fukushimassa vuonna 2011. (Energiateollisuus ry 2009).

2.3.3 Turvallisuusluokat

Ydinlaitos jaetaan rakenteellisiin ja toiminnallisiin kokonaisuuksiin eli järjestelmiin laitoksen turvallisuustoimintojen hallitsemiseksi. Järjestelmät jaetaan edelleen rakenteisiin ja laitteisiin siten, että jokainen toimintaan tai turvallisuuteen vaikuttava rakenne tai laite kuuluu johonkin järjestelmään. Järjestelmät, laitteet ja rakenteet ryhmitellään turvallisuusmerkityksensä perusteella turvallisuusluokkiin 1, 2, 3 ja EYT (ei ydinteknisesti turvallisuusluokiteltu). Luokitus perustuu turvallisuustoimintojen toimivuuteen ja radioaktiivisen aineen leviämisen estämiseen asetettuihin osakohtaisiin vaatimuksiin. (YVL B.2).

Rakenteelliselle kestävyydelle, eheydelle ja tiiveydelle asetettujen vaatimusten perusteella turvallisuusluokkaan 1:een kuuluvat ydinpolttoaine sekä rakenteet ja laitteet joiden vaurioituminen voi vaatia välitöntä turvalisuustoimintojen käynnistämistä. Näitä rakenteita ja laitteita ovat reaktorin painesäiliö sekä primääripiirin osat joiden toimintaa ei voida korvata muilla laitoksen normaaliin käyttöön liittyvillä järjestelmillä. (YVL B.2).

Turvallisuusluokkaan 2 kuuluvat primääripiirin osat, jotka voidaan tarvittaessa korvata muilla normaalikäyttöön liittyvillä järjestelmillä. Luokkaan 2 kuuluvat myös rakenteet ja laitteet, joita tarvitaan luokan 1 rakenteiden ja laitteiden vaurioitumisesta aiheutuvien vaarojen rajoittamiseen tai niiden eheyden turvaamiseen. Rakenne tai laite on turvallisuusluokassa 2 myös mikäli sen vaurioituminen aiheuttaa vaaran hallitsemattomasta ketjureaktiosta. Tällaisia rakenteita ovat muun muassa reaktorin suojarakennus ja siihen liittyvät rakenteet sekä reaktorin tukirakenteet. (YVL B.2).

Turvallisuusluokassa 3 ovat rakenteet ja rakennukset, jotka varmistavat luokan 2 toimintoja ja niiden fyysistä erottelua, sekä rakenteet ja laitteet, jotka varmistavat

luokan 3 toimintoja. Luokassa 3 ovat myös ylempiin luokkiin kuulumattomat rakenteet ja laitteet joiden vaurio voi aiheuttaa merkittävän radioaktiivisten aineiden vapautumisen laitokseen tai sen ympäristöön. (YVL B.2).

Ydinlaitoksen järjestelmät, rakenteet ja laitteet luokitellaan myös suunnittelumaanjäritystä varten kestävyysvaatimustensa perusteella maanjäritysluokkiin S1, S2A ja S2B. (YVL B.2).

3 LAINSÄÄDÄNTÖ

Ydinvoimarakentaminen on luonteensa vuoksi tarkoin säänneltyä Suomessa. Tiukat laatuvaatimukset voivat tulla yllätyksenä kokeneillekin rakentajille ja esimerkiksi Olkiluoto 3:n rakentamisen viivästymisen osasyynä pidetään suhtautumista ydinvoimarakentamiseen tavanomaisen rakentamisen tapaan. (Öster 2009).

3.1 Lait

Ydinturvallisuuteen keskeisesti vaikuttavat tällä hetkellä ydinvastuulaki (484/1972), ydinenergialaki (990/1987) ja -asetus (161/1988) sekä valtioneuvoston asetukset ydinvoimalaitoksen turvallisuudesta (717/2013), ydinenergian käytön turvajärjestelyistä (734/2008), ydinvoimalaitoksen valmiusjärjestelyistä (716/2013) ja ydinjätteiden loppusijoituksen turvallisuudesta (736/2008). (STUK 2016a).

Ydinvastuulaki säättää nimensä mukaisesti vastuukysymyksistä liittyen ydinlaitoksessa, ydinaineen kuljetuksessa ja muussa käsittelyssä syntyneestä ydinvahingosta. Ydinenergialaki säättää ydinenergian käytöstä ja sen tarkoitus on ydinvoiman pitäminen turvallisena ihmisen ja ympäristön kannalta, ydinaseiden leviämisen estäminen sekä yhteiskunnan yleisen edunmukaisuuden varmistaminen. Tämän perusteella laki säättää ydinvoiman käytön yleisistä periaatteista, ydinjätehuollosta, lupaperusteista, valvonnasta ja toimivaltaisista viranomaisista. Säteilylaki (592/1991) ottaa myös kantaa ydinenergian käyttöön säteilyaltistusta aiheuttavan työn teettämisen osalta lain 2. §:ssä ja 9. luvussa. Rakennesuunnittelijan kannalta olennaisin osa ydinenergialaissa on luvun 2 a pykälässä 7 r säädetty säteilyturvakeskuksen (STUK) vastuu yksityiskohtaisten turvallisuusvaatimusten asettamisesta lain vaatiman turvallisuustason toteuttamiseksi. Tämän perusteella STUK on luonut ydinturvallisuusohjeet (YVL -ohjeet), jotka ohjaavat ydinvoiman käyttöä seikkaperäisesti.

Ydinenergia-asetus määrittää tarkemmin mikä on ydinainetta, millainen ydinenergia on luvanvaraista, valtioneuvoston periaatepäätöksen hakemisesta ja ydinlaitosluvista (rakentamislupa ja käyttölupa). Asetus säättää ydinaineiden ja laitteiden tuonnista, viennistä ja kuljetuksesta sekä ydinjätteeseen varautumisesta ja sen käsittelystä.

Valtioneuvoston asetukset täydentävät, tarkentavat ja nykyaikaistavat varsinaisia lakeja nimiensä mukaisilta osin.

3.2 YVL -ohjeet

STUK:n tehtävänä on asettaa ydinenergiain mukaisen turvallisuustason toteuttamista koskevat yksityiskohtaiset turvallisuusvaatimukset. (Ydinenergiainlaki (990/1987) 7 r §). Tämän määräyksen pohjalta STUK on luonut ydinvoimalaitos- eli YVL-ohjeet joita uudistettiin Olkiluoto 3:n rakentamisen ja Fukushima ydinvoimalaitosonnettomuuden antamien kokemusten ja opetusten, sekä yleisen ydinturvallisuuden kehittymisen pohjalta (TEM 2013). Uudet turvallisuusvaatimukset tulivat voimaan vuosien 2013 ja 2014 aikana osana suurempaa ydinenergiainsäädännön uudistusta. Ydinenergiain mukaan ydinenergian käytön turvallisuus on pidettävä niin korkealla tasolla kuin käytännöllisin toimenpitein on mahdollista ja sitä tulee parantaa siten kuin yleisen kehityksen puitteissa on perusteltua (Ydinenergiainlaki (990/1987) 7 a §). Näin ollen osaa ohjeista on jo päivitetty ja päivityksiä on tulevaisuudessakin odotettavissa. Uudet YVL-ohjeet jaetaan ryhmiin A-E:

- Ryhmä A: Ydinlaitoksen turvallisuuden hallinta
- Ryhmä B: Ydinlaitoksen ja sen järjestelmien suunnittelu
- Ryhmä C: Ydinlaitoksen ja ympäristön säteilyturvallisuus
- Ryhmä D: Ydinmateriaalit ja jätteet
- Ryhmä E: Ydinlaitoksen rakenteet ja laitteet (STUK 2016b).

3.3 Lupaprosessi

Uuden ydinvoimalayksikön lupaprosessi alkaa ympäristövaikutusten arviointimenettelyllä (YVA). Sen tarkoituksena on käsitellä hankkeen positiiviset ja negatiiviset ympäristövaikutukset ympäristöllisistä, sosiaalisista ja taloudellisista näkökulmista. Menettelyssä annetaan niille, joiden oloihin tai etuihin hanke saattaa vaikuttaa, mahdollisuus mielipiteensä esittämiseen. Samalla käydään läpi joukko muita selvityksiä hankkeen toteuttamismahdollisuuksista. (Energiateollisuus ry 2009).

Alustavien selvitysten jälkeen luvanhakija jättää valtioneuvostolle periaatepäätöshakemuksen, jossa käydään läpi ydinenergialain mukainen poliittinen harkinta ydinvoimalan kokonaisedunmukaisuudesta yhteiskunnalle. Työ- ja elinkeinoministeriö hankkii hakemuksesta säteilyturvakeskuksen alustavan turvallisuusarvion sekä lausunnot ympäristöministeriöltä, suunnitellun laitoksen kunnanvaltuustolta ja naapurikunnilta. Mikäli valtioneuvosto päättää hyväksyä hakemuksen, tulee eduskunnan vielä jättää se voimaan. (Energiateollisuus ry 2009).

Periaatepäätöksen hyväksymisen jälkeen luvanhakija voi alkaa tehdä hankintasopimuksia alihankkijoiden kanssa ja hakea rakentamislupaa. Rakentamislupa edellyttää laajaa turvallisuusselvitystä laitoksen rakenteesta, ympäristöstä ja toiminnasta niin normaali-, kuin poikkeusolosuhteissa. Esimerkiksi Fennovoiman Hanhikivi 1:n rakentamislupahakemus on 180 sivua pitkä selostus voimalahankkeesta. (Energiateollisuus ry 2009; Fennovoima 2015b).

Rakentamisen aikaisten johtamis-, rakentamis- ja suunnitteluorganisaatioiden laadunhallinnan toteuttaminen kuvataan laadunhallintajärjestelmässä. YVL-ohjeissa laadunhallintaa koskevia vaatimuksia esitetään tarkemmin kyseessä olevaa alaa koskevissa ohjeissa. (Myllymäki 2012; YVL A.3).

Valtioneuvosto myöntää käyttöluvan laitokselle kun se on kokonaisuudessaan valmis käyttöönottoa varten. Ennen luvan myöntämistä STUK toteaa, että laitos täyttää sille asetetut turvallisuusvaatimukset, käyttöhenkilökunnan kelpoisuus ja koulutus on asianmukainen sekä ydinhuollon järjestelyt ja rahoitus ovat riittävät. (Energiateollisuus ry 2009).

Kun laitos on otettu käyttöön, STUK suorittaa laitokselle valvontaa käytön tarkastusohjelmaan (KTO) perustuen ja laitoksella tehtävien toimenpiteiden yhteydessä tai oman harkintansa mukaan. Valvontaa suorittavat myös paikallisvalvojat ja turvallisuutta arvioidaan perustuen käyttöluvan myöntämisen jälkeen käyttökokemuksin ja tutkimuksin saatuun tietoon. (YVL A.1).

4 KUORMAT JA KUORMITUSYHDISTELMÄT

Ydinvoimalan suunnittelu perustuu tavallisessa käytössä esiintyvien kuormien ja oletettujen onnettomuuskuormien mitoittamiseen. Tällaisia kuormia ovat ominaiskuormat (omapaino, paine, lämpölaajeneminen) sekä satunnaiset ja oletetut kuormat, kuten erilaiset testikuormat (esimerkiksi paine- ja tiiveyskokeet), vakavat luonnonilmiöt ja putkien katkeamiset. Analyyseissä käsitellään myös vakavia onnettomuustilanteita ja muita oletetut kuormat ylittäviä tilanteita. Suunnittelussa on kiinnitettävä erityistä huomiota reaktorirakennukseen. (Antaki & Gilada 2014; Myllymäki 2012).

4.1 Mitoittavat tilanteet ja kuormat

Tärkeimmät mitoittavat tilanteet kohdistuvat ydinvoimalaitoksissa reaktorirakennukseen ja sen suojarakennuksiin. Laitosten elinikävaatimus on Suomessa 60 vuotta rakennusajan lisäksi. (Myllymäki 2012)

Suojarakennuksen tiiveysvaatimus kohdistuu sisempään suojarakennukseen ja sen katsotaan olevan tiivis, kun YVL B.3:n mukaisesti tehtyjen suojarakennusanalyysien avulla saadussa suunnittelupaineessa suojarakennus vuotaa enintään 0,5% sisällöstään vuorokaudessa. Sisemmän suojarakennuksen paine- ja tiiveyskokeet tehdään määrääjoin 1,15 kertaisessa suunnittelupaineessa. Suojarakennus suunnitellaan siten, että se säilyttää tiiveytensä mitoittavien onnettomuustilanteiden toteutuessa. Mitoittavia tilanteita ovat oletetut onnettomuudet, kuten jonkin laitoksen järjestelmän, rakenteen tai komponentin pettäminen tai inhimillinen virhe (IAEA 2012; YVL B.6). Sisäisiä uhkia ovat ainakin putkikatkokot sekä niistä johtuvat putkihuitaisut ja suihkuvoimat paineen purkautuessa, missiilit kuten rikkoutuneen turbiinin osat, tulvat, valokaaret, sähkömagneettiset häiriöt, putoavat esineet ja huonetilojen LVI-järjestelmien pettäminen. Vakavampina tulipalot ja räjähdykset (IAEA 2004b; YVL B.7). Pahimmassa tapauksessa reaktorisydän pääsee sulamaan esimerkiksi ytimen jäähdytys menetettäessä LOCA:n (loss-of-coolant accident) seurauksena. Ainakin kaikki yllämainitut sisäiset uhat on otettava huomioon ja tarkasteltava suunnittelussa

(Myllymäki 2012; YVL B.7). Sisempään suojarakennukseen voivat vaikuttaa myös ulkoa tulevat uhat kuten maanjäristys. Suunnittelun tavoitteena on suojarakennuksen tiiveyden säilyttäminen kaikissa mitoitettavissa tilanteissa (Myllymäki 2012; YVL B.6). Tšernobylin ja Fukushimaa kaltaisissa INES 7 –luokan onnettomuuksissa tyypillistä ovat äärimmäiset lämpötilat reaktorisydämen sulaessa sekä vety- ja höyryräjähdykset. (WNA 2015; WNA 2016b).

Ulomman suojarakennuksen tärkein tehtävä on suojata reaktoria ulkoisilta uhilta. Ulkoisia luonnollisia ulkoisia uhkia ovat sääilmiöt joista on tarkasteltava ainakin seuraavia:

- Ulkoilman korkea ja matala lämpötila
- Voimakas tuuli, mukaan lukien trombit ja syöksyvirtaukset
- Korkea ja matala ilmanpaine sekä ilmanpaineen vaihtelut
- Vesisade, lumisade, raesade
- Jäätävä sade ja jäätävät roiskeet merestä tai vesistöistä
- Ilman kosteus, sumu, huurtuminen
- Salammat
- Kuivuus
- Auringon hiukkaspurkausten aiheuttamat sähkömagneettiset häiriöt (YVL B.7).

Laitoksen suunnittelussa on kuitenkin otettava huomioon kaikki laitospaikalle mahdollisiksi arvioituiden sääilmiöt, joten tarkasteltavia ilmiöitä voi olla useampia. Suomessa on tyypillisesti otettava huomioon merenpinnan korkeuden vaihtelut ja jääolosuhteet, kun rakennetaan rannikolle. Näiden lisäksi on tehtävä tarkastelu maanjäristyksen varalle. Ihmisen aiheuttamia uhkia vastaan mitoitettaessa otetaan huomioon suuren matkustajalentokoneen törmäys ja tahallinen, esimerkiksi biologinen ja kemiallinen terrori sekä räjähdyspaineaalto ja sähkömagneettinen häirintä (EMP). (Myllymäki 2012; YVL B.7).

Vähäisempi vaikutus suojarakennusten rakenteisiin on normaalikuormituksilla, kuten hyötykuormat, tavanomaiset käyttölämpötilat, dynaamiset putkistokuormat, lauhdutusaltaiden puhalluskuormat, testikuormat ja rakennusaikaiset kuormat.

Suojarakennusten lisäksi laitoksen muut rakennukset on suunniteltava siten, että yllä mainitut uhat toteutuessaan eivät vaaranna laitoksen turvallista alaspäästä ja jälkilämmön poistoa. Toisin sanoen esimerkiksi vedenottorakenteet eivät saa tukkeutua ahojäästä, maanjäristys ei saa tuhota kaikkia dieselmoottoreita ja päävalvomorakennuksen on myös kestävä edellä mainitun suuren matkustajakoneen törmäys. (IAEA 2003; Myllymäki 2012).

4.2 Kuormitusyhdistelmät ja sallittavuuskriteerit

Rakenteiden kuormitusyhdistelmät tehdään jokaiselle laitokselle erikseen rakennuspaikan olosuhteet huomioiden. Mitoittavat ulkoiset kuormitukset ovat luonteeltaan hyvin lyhytkestoisia ja tapahtuvat harvoin, joten kuormitusyhdistelmissä ne yleensä yhdistetään vain normaalien käyttökuormitusten kanssa. Yksittäisen ulkoisen kuorman aiheuttamat vaikutukset ja seuraukset on kuitenkin syytä arvioida, ja mikäli kuorma ja sen vaikutukset fysikaalisesti ovat yhteydessä toisiinsa, tulisi ne huomioida samassa kuormitusyhdistelmässä. Esimerkiksi lentokoneen törmäys oletusarvoisesti aiheuttaa jonkinlaisia missiilejä, voimakkaita värähtelyjä ja polttoainepaloja, jotka tulisi sisällyttää samaan kuormitusyhdistelmään. (IAEA 2003).

Tunnistetut kuormitukset tulisi yhdistää kuormitusyhdistelmiin ottaen huomioon kuormituksen tyyppi, kuten staattinen, dynaaminen, globaali tai paikallinen. Ovatko kuormitukset toisistaan johtuvia vai yhdenaikaisia kuten LOCA:sta johtuvat paineet ja lämpötilat. Kuormitusten aikariippuvuus voi määrittää voivatko kuormitukset realistisesti vaikuttaa yhtä aikaa. Myös kunkin kuormitusyhdistelmän todennäköisyys toteutua käytännössä tulisi ottaa huomioon. Kun nämä tekijät otetaan asianmukaisesti huomioon mahdollisia yhdistelmiä etsittäessä löydetään kuormitusyhdistelmien määrä, joista vaativimmille tapauksille suoritetaan analyysi. (IAEA 2004c).

Asianmukaiset sallittavuuskriteerit kullekin kuormitusyhdistelmälle määritetään sallittavien jännitysten, muodonmuutosten ja tiiveyden perusteella soveltuvilta osin. Sallittujen jännitysten ja muodonmuutosten määrittämiseen suunnittelu- ja testikuormille Suomessa käytetään YVL E.6:n mukaan standardeja EN-1992, ASME III Div. 2 ja ASME III Div. 1 Section NE. IAEA antaa Design on Reactor Containment

Systems for Nuclear Power Plants –julkaisussa ehdotuksena turvallisuuskriteereiksi kolme tasoa rakenteelliselle eheydelle ja tiiveydelle, jotka soveltuvat kaikenlaisille reaktorityypeille. Näitä IAEA:n ohjeita sovelletaan myös tällä hetkellä Suomessa. (IAEA 2004c; Myllymäki 2012).

Rakenteelliselle eheydelle taso I on elastinen alue, jolla pysyviä muodonmuutoksia tai vaurioita ei tapahdu ja eheys varmistetaan suurilla osavarmuuksilla. Tasolla II pienet pysyvät muodonmuutokset ovat mahdollisia paikallisesti. Rakenteellinen eheys varmistetaan, mutta käytetään pienempiä osavarmuuksia kuin tasolla I. Tasolla III suuret pysyvät muodonmuutokset ja jonkinasteiset paikalliset vauriot ovat odotettavia. Tätä tasoa käytetään normaalisti vain vakavien, ei-oletettujen onnettomuustilanteiden analyysiin. (IAEA 2004c).

Tiiveydelle taso I on tiivis rakenne. Suojarakennuksesta tapahtuva vuoto ei ole suunnitteluarvoa suurempi ja on suhteessa sisäiseen paineeseen. Tasolla II vuotomäärä voi ylittää suunnitteluarvon, mutta se pystytään asianmukaisesti arvioimaan ja ottamaan huomioon suunnittelussa. Tasolla III suojarakenteen suurten muodonmuutosten vuoksi tiiveyttä ei voida varmistaa, mutta rakenteellinen eheys voidaan säilyttää. (IAEA 2004c).

Tyypillisiä kuormituksia ja kuormitusyhdistelmiä sallittavuuskriteeteineen esitetään liitteessä.

5 RUNKORAKENTEET

Runkorakenteissa käytettävien rakennusmateriaalien ja -tuotteiden on täytettävä alansa suomalaiset vaatimukset. Mikäli suomalaiset määräykset, ohjeet ja standardit ovat riittämättömiä, voidaan käyttää alan ulkomaisia vastaavia. Materiaaleilla on oltava CE-merkintä, eurooppalainen tekninen arviointi (ETA) tai ympäristöministeriön hyväksymän tahon myöntämä tyyppihyväksyntä tai varmennustodistus. Tuotetta varten on myös laadittava laadunvalvonnan sisältävä asennusohje, mikäli asennustyö ei sisällä kelpoisuutta osoittavaan todistukseen. (YVL E.6).

Suojarakennuksen sisäpuolisten rakenteiden pinnoitteet joutuvat onnettomuustilanteissa todennäköisesti poikkeuksellisten kuormitusten kohteeksi, minkä vuoksi pinnoitteiden riittävä kestävyys ja pysyvyys on varmistettava. Suojarakennuksen sisäpuolisille pinnoitteille käytetään STUK-YTO-TR 210 –raportissa vuonna 2004 esitettyjä vaatimuksia. Näitä vaatimuksia sovelletaan myös ulkopuolisille pinnoitteille, joita koskee dekontaminoitavuus- tai säteilynkestävyysvaatimuksia. (YVL E.6).

Reaktorisaarekkeen rakennusten runkorakenteet kuuluvat pääsääntöisesti turvallisuusluokkiin 2 ja 3. Turbiini- ja muiden rakennusten rakenteet puolestaan yleensä luokkaan EYT (YVL B.2). Turvallisuusluokkiin 2 ja 3 kuuluvien betoni-, teräs- ja liittorakenteiden suunnittelu perustuu rakenteelliseen vaatimusmäärittelyyn, joka laaditaan ennen suunnittelutyön aloittamista. Määrittely sisältää suunnittelu- ja laatuvaatimukset ja siinä on ainakin esitettävä:

- Käytettävät määräykset, ohjeet ja standardit
- Suunnittelun lähtötiedot
- Käytetyt kuormitusyhdistelmät ja osavarmuuskertoimet
- Laitteiden, putkistojen ja radioaktiivisen säteilyn aiheuttamat kuormitukset onnettomuustilanteissa YVL B.6:n YVL B.7:n ja standardin ASME III Div. 2 mukaisesti.
- Materiaalien ominaisuudet ja soveltuvuus
- Palomitoituksessa käytetyt menetelmät ja niiden kelpoisuus
- Käytettävät pinnoitteet ja niiden koetulokset. (YVL E.6).

5.1 Suunnittelu

Ydinlaitoksen luvanhaltijan on määriteltävä johtamisjärjestelmässään tavat, joilla se arvioi ja valitsee rakenteiden suunnittelu-, valmistus- ja toteutusorganisaation. Organisaatioista ja niiden laadunvarmistuksesta toimitetaan selvitykset STUK:lle hyväksyttäväksi. Rakenteiden suunnitteluorganisaatioilla on oltava soveltuvan standardin mukainen johtamisjärjestelmä. Suunnitteluorganisaation arviointiin ja valvontaan sovelletaan YVL A.4 luvun 8 vaatimuksia. (YVL E.6).

Huhtikuussa 2016 vielä voimassa olevan YVL E.6:n mukaan ydinlaitoksen rakennuksen tai rakenteen vastaavalla rakennesuunnittelijalla on oltava syyskuussa 2014 vanhentuneen vaatimusluokan AA pätevyys betoni- tai teräsrakenteiden suunnitteluun riippuen kohteen kantavasta rakenteesta. Valtioneuvoston asetuksen 214/2015 mukaisesti ydinvoimaloiden ja niiden rakenteiden suunnittelu vastaa nykyistä poikkeuksellisen vaativien suunnittelutehtävien vaatimusluokkaa. Vastaava suunnittelija hyväksyy vastuualueensa suunnitelmat. Turvallisuusluokkiin 2 ja 3 kuuluvien runkorakenteiden rakentamisen aikana suunnittelijan, tai tämän edustajan on oltava työmaalla paikalla tai välittömästi sinne saatavissa. Edustajalla on myös oltava samat pätevyudet kuin rakenteen suunnittelijalla. (YVL E.6).

Suunnittelussa käytettävien laskentaohjelmien on oltava verifioituja käytetyssä laskentaympäristössään ja numeeristen menetelmien (esimerkiksi FEM) tulokset on tarkistettava vertailumenettelyllä ja varmennettava yksinkertaisemmilla analyyseillä. Betonirakenteiden käyttöikämitoitus on tehtävä betoninormin BY50 2012 mukaisesti ja rasitusluokat valittava SFS-EN 206-1:n mukaan. Teräskokoonpanojen ympäristön rasitusluokat valitaan SFS-EN ISO 12944:n mukaan. Turvallisuusluokkien 2 ja 3 rakenteet kuuluvat seuraamusluokkaan CC3, ellei CC2:n käyttöä erikseen perustella. Maanjäristysluokkaan S1 kuuluvien rakenteiden seismisessä suunnittelussa on otettava huomioon suunnittelumaanjäristyksen aiheuttamat kuormat rakenteen sijaintiin rakennuksessa nähden. (YVL E.6).

Suojarakennuksen tiiveys varmistetaan vuoraamalla se teräslevyllä. Teräslevyn ja sen läpivientien mitoitukseen on sovellettava standardia ASME III Div. 2.

Suojarakennuksen teräksisten henkilö- ja muiden sulkujen mitoituksessa sovelletaan standardin ASME III Div. 1 Subsection NE ohjeita. Vaihtoehtoisia standardeja voidaan käyttää sillä edellytyksellä, että ne todetaan käyttökelpoisiksi ja niitä on aiemmin käytetty ydinlaitosten suunnittelussa. Betonisen suojarakennuksen mitoitukseseen voidaan käyttää eurokoodia EN 1992:sta, kuitenkin siten, että ASME III Div. 2:n mukainen varmuus murtumista vastaan saavutetaan. Käytettävissä kuormissa ja kuormitusyhdistelmissä on otettava huomioon YVL B.1:ssä ja YVL B.6:ssa esitetyt suunnitteluvaatimukset ja ne on osavarmuus- ja yhdistelykertoimien esitettävä rakenteellisessa vaatimusmäärittelyssä. Suojarakennuksen vuoto- ja vaurioitumismekanismeja sekä rakenteellista varmuutta on analysoitava todennäköisyysperusteisesti YVL A.7:n osoittamalla tavalla. Rakenteellista varmuutta mitattaessa käytetään kuormien ja materiaalien ominaisuuksien todennäköisyysjakaumia, jotka muodostetaan rakennusaikaisen laadunvalvonnan dokumentoinnista. Suojarakennuksen suojakuoren mitoitus onnetomuustilanteita vastaan varmennetaan kattavasti toisella riippumattomalla taholla. (YVL E.6).

Radioaktiivisia aineita sisältävien altaiden betonin on oltava vesitiivistä ja ne on vuorattava ruostumattomalla teräslevyllä vesitiiviiden varmistamiseksi. Vuorauslevyn on säilytettävä tiiveytensä kaikissa mitoitus tilanteissa. (YVL E.6).

5.2 Betonirakenteet

Ydinlaitoksen betonirakenteista tärkeimpiä ovat tyypillisesti suojarakennuksen sisä- ja ulkokuori, reaktorirakennuksen sisäosat, suoja lentokoneen törmäystä vastaan ja polttoaine- sekä turvarakennukset. Suojarakennuksen ulkoseinät ja reaktorialtaan ulokeosat ovat yleensä jännitettyjä teräsbetonirakenteita. (Myllymäki 2012).

Betonirakenteissa ja tuotteissa käytettävä betoni määritellään standardin SFS-EN 206-1 ja sen kansallisen soveltamisstandardin SFS-7022 mukaisesti ja rakenteet suunnitellaan betoninormin BY50 2012 mukaisesti. Betonirakenteet toteutetaan standardin SFS-EN 13670 ja sen kansallisen soveltamisstandardin SFS 5975 mukaisesti. Turvallisuusluokkiin 2 ja 3 kuuluvat betonirakenteet ja niiden betoniterästen voima- ja kiinnitysluokitukset valmistetaan toteutusluokassa 3. Voimaliitosten hitsausohjeet

hyväksytetään STUK:lla. Toteutusluokkaan 3 kuuluvat myös korkealujuusbetonista valmistetut ja jännitetyt betonirakenteet. Betonivalmisosien ja -elementtien valmistuksessa on noudatettava myös standardia EN 13369 ja turvaluokiteltuja osia valmistavasta tehtaasta toimitetaan STUK:lle hyväksyttäväksi organisaatioselvitys, käytetyt standardit ja laadunvalvontasuunnitelma. Betonielementeille ja -valmisosille tehdään ennen betonointia aloitustarkastus, jolla todetaan betonoitavan rakenteen suunnitelmanmukaisuus. Luvanhaltija tekee aloitustarkastuksen turvallisuusluokan 3 rakenteille ja STUK luokan 2 rakenteille. Aloitustarkastukset tehdään ensimmäiselle ja vähintään 10%:lle osista ja elementeistä. (YVL E.6).

Betoniterästen ja jännemenetelmien laadunvalvonnan tulee täyttää betoninormin BY50 2012 vaatimukset. Turvallisuusluokan 2 rakenteisiin käytettävästä betoniteräksestä otetaan kolme näytekappaletta jokaisesta sulatuksesta sekä veto- että taivutuskokeita varten ja betoniterästankojen jatkosmuuveista otetaan vetokokeeseen yksi jokaista alkavaa 200:a jatkosta kohti. Turvallisuusluokan 3 rakenteisiin käytettävästä betoniteräksestä otetaan näytteitä tarvittaessa. Työmaalla tehtävien betoniterästen hitsaukset tehdään toteutusluokassa 3. Jännemenetelmän osien asennusta, kaapelien jännittämistä ja injektointia varten tehdään laadunvalvontasuunnitelma jossa selitetään jännejärjestelmän osien korroosiosuojaus varastoinnin ja kuljetuksen aikana, osien asennus, kunnonvalvonta eri työvaiheissa, jännittämistyö ja injektointi. Ennen injektointityön aloittamista tehdään injektointilaastille ennakkokokeet vaatimusten täyttymisen varmistamiseksi. Jälkeenpäin mekaanisesti asennettavia ankkurikiinnikkeitä ei saa käyttää ilman perusteltua syytä turvallisuusluokkien 1 ja 2 rakenteissa tai kiinnityksissä, jotka voivat joutua dynaamisesti vaihtorasitetuiksi. (Myllymäki 2012; YVL E.6).

Betonirakenteille tehtävät menetelmäkokeet ovat tarpeen työntekijöiden pätevyyden osoittamiseksi tai vaativien ja ennen kokeilemattomien töiden toteutuksessa. Tällaisia töitä ovat ainakin vaativat ja ennen kokeilemattomat injektointityöt, tilanteet joissa työn kelpoisuuden toteaminen on vaikeaa ja kun jo tehdyn työn korjaaminen on vaikeaa. Menetelmäkokeista esitetään suunnitelmat ja perusteet kokeiden tulosten arviointiin. (Myllymäki 2012; YVL E.6).

5.3 Teräs- ja liittorakenteet

Tyypillisiä teräsrakenteita ydinlaitoksissa ovat rakennusten kantavat rakenteet, suojakuoren tiiveyslevy, paineiset säiliöt, käytetyn polttoaineen käsittelylaitteistot ja altaiden verhoukset sekä missiilisuoijat. Terästä käytetään myös polttoainetelineissä, ovissa ja luukuissa sekä estämään rikkoutuneiden putkien huitaisuja. (Myllymäki 2012).

Liittorakenteet ovat ydinlaitoksissa uusi tapa rakentaa ja STUK käsittelee niitä ensimmäistä kertaa vuonna 2013 julkaistussa YVL E6:ssa. Liittorakenteilla tarkoitetaan tässä yhteydessä teräs-betoniliittorakenteita eli SC-rakenteita (steel-concrete). Ydinlaitoksissa tyypilliset rakenteet ovat suurina lohkoina, moduuleina rakennettavat teräslevy-betoniliittorakenteiset seinä- ja laattarakenteet. Käyttökohteina ovat esimerkiksi suojarakennuksen sisä rakenteet ja reaktorirakennuksen ulkoseinärakenne. (Myllymäki 2012).

Teräs- ja liittorakenteissa käytettävissä teräsosissa käytetään standardeja SFS-EN 1993 ja SFS-EN 1090-2 sekä voimassa olevia CE-merkintöjen, tyyppihyväksyntöjen, ETA-arviointien ja varmennustodistusten mukaisia materiaaleja. Liittorakenteiden, suojarakennuksen tiiveyslevyn, ja altaiden verhoukslevyjen liittovaikutuksen aikaansaavien rakenneosien lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksista tulee esittää riittävän kattavat tilastolliset koetulokset STUK:n hyväksyttäväksi jos ne eivät sisälly kelpoisuuden osoittavaan todistukseen. (YVL E.6).

Teräsrakenteiden valmistuksenaikainen laadunvalvonta perustuu hyväksytyyn rakennesuunnitelmaan, joka on valmistuspaikalla oltava käytettävissä muiden ohjeiden ja standardien kanssa. Teräsrakenteiden lämpökäsittelijöillä ja hitsareilla on oltava tehtävämukainen koulutus sekä ohjeistus ja valmistajan on valvottava vaativia työvaiheita. Hitsauksen ja lämpökäsittelyn suorittamista käsitellään standardeissa SFS-EN ISO 3834-2 ja SFS-EN ISO 17663. Lämpökäsittelyn jälkeisestä korjaushitsauksesta on oltava STUK:n hyväksymä korjaussuunnitelma. Valmistuksen aikana havaitut poikkeamat ja niiden syyt sekä merkitys tulee selvittää poikkeamaraporteissa. Raporteissa perustellaan myös valmiisiin tuotteisiin jäävien poikkeamien

hyväksyttävyys. Valmistajan tulee varmistua valmistuksen ohella tuotteen kuljetuksen ja varastoinnin aikaisesta laadun säilymisestä. (YVL E.6).

Teräsrakenteiden valmistusta varten tehdään tarkastussuunnitelma, jossa esitetään miten perusaineet, hitsauslisäaineet, hitsausliitokset ja valmiit rakenteet testataan ja tarkastetaan. Materiaalin lujuuteen ja ominaisuuksiin vaikuttaville työmenetelmille on oltava menetelmäkokein pätevoidyt ohjeet. Menetelmäkokeet suoritetaan turvallisuusluokan 2 teräs- ja liittorakenteille kolmannen osapuolen valvonnassa ja turvallisuusluokan 3 rakenteille standardin SFS-EN 1090-2 mukaisesti. Työolosuhteiden mukaisessa ympäristössä tehtävät työkokeet suoritetaan, kun kohde on ydinturvallisuuden kannalta merkittävä. Rakenteilta vaadittavat aineodistukset esitetään taulukossa 2. (YVL E.6).

Taulukko 2. Rakenteilta vaadittavat aineodistukset. (mukaihen YVL E.6).

| Osa | Turvallisuusluokka | |
|-----------------------------------------------------|--------------------|-----|
| | 2 | 3 |
| Rakenneteräkset | 3.1 * | 3.1 |
| Ruostumattomat teräkset | 3.1 * | 3.1 |
| Hitsausaineet | 3.1 | 2.2 |
| Ruuvikokoonpanot | 2.2 | 2.2 |
| Kierteitettävät ja porautuvat ruuvit ja karaniintit | 2.1 | 2.1 |
| Kaarihittattavat leikkausliittimet | 3.1 | 3.1 |

* Suojarakennuksen materiaali- ja henkilösulkujen hiili- ja ruostumattomille teräksille vaaditaan todistus 3.2i.

Turvallisuusluokan 2 teräsrakenteet on toteutettava toteutusluokassa EXC4 ja turvallisuusluokan 3 rakenteet toteutusluokassa EXC3. Liittorakenteilla ei ole omaa tiettyä toteutusluokkaa vaan luokka määritellään erikseen teräksen ja betonin osalta noudattaen standardeja SFS-EN 1090-2 ja SFS-EN 13670 sekä edellä mainittuja toteutusluokkia. (YVL E.6).

6 YHTEENVETO

Työn aikana selvisi, että ydinvoimarakentaminen Suomessa on varsin tarkasti säänneltyä ja laitoksen rakennesuunnittelu on muuttunut entistä haastavammaksi 2010-luvulle tultaessa. Tulevien voimaloiden suunnittelussa ei voida tukeutua vanhaan tietoon tai tavanomaisen rakentamisen menetelmiin ja uusimpiin määräyksiin tulee tutustua huolella. Ydinvoimalan suunnittelun ja rakentamisen ehdottomana lähtökohtana on laitoksen turvallisuuden takaaminen kaikissa olosuhteissa. Globalisoituneeseen toimintaympäristöön ja uudenlaisiin luonnonolosuhteisiin varaudutaankin nykyisin entistä paremmin muun muassa varautumalla maanjäristyksiin ja suuren lentokoneen törmäykseen. Useilla toisistaan riippumattomilla järjestelmillä ja varmalle pohjalle tehtävällä rakenteiden mitoituksella poikkeustilanteiden riskit ja seuraukset minimoidaan.

Ydinteknisesti turvallisuusluokiteltujen rakenteiden ja rakennusten pääsuunnittelijalta vaaditaan aina poikkeuksellisen vaativan suunnittelutehtävän vaatimusluokan pätevyudet teräs- tai betonirakenteiden suunnitteluun ja ymmärrystä ydinlaitosten erityispiirteistä. Suunnittelua ohjaavat ylätasolla ydinvoimaa koskevat lait ja valtioneuvoston asetukset. Tarkemmat ohjeet annetaan YVL-ohjeissa, rakennesuunnittelijalle erityisesti Ryhmä E:ssä ja yksityiskohtaiset suunnitteluohjeet YVL-ohjeiden osoittamissa standardeissa.

Tutkimusta voisi jatkaa tutustumalla syvemmin vakavien ulkoisten kuormitusten yhdenaikaiseen vaikutukseen. Kuormitusyhdistelmiä tehdessä ne yleensä oletetaan hetkellisiksi ja siten eivät sisälly samaan yhdistelmään. Tämä voi muodostua ongelmaksi laitosten suunnitellun elinkaaren ollessa 60 vuotta rakentamisajan lisäksi ja ilmastonmuutoksen aiheuttaessa mahdollisesti entistä voimakkaampia sääilmiöitä myös Suomessa.

7 LÄHDELUETTELO

Antaki G. & Gilada R. (2014), Nuclear Power Plant Safety and Mechanical Integrity: Design and Operability of Mechanical Systems, Equipment and Supporting Structures. Oxford: Elsevier Ltd.

Energiateollisuus ry (2009), Hyvä tietää ydinvoimasta. Helsinki: Energiateollisuus ry.

Energiateollisuus ry (2016a) Energia ja ympäristö, Ydinvoma. www.energia.fi. [24.3.2016].

Energiateollisuus ry (2016b), Energia ja ympäristö, Ydinvoma. www.energia.fi. [24.3.2016].

Fennovoima (2015a), Hanhikivi 1, Laitostoimittaja. www.fennovoima.fi. [21.8.2015].

Fennovoima (2015b), Ydinenergialain (990/1987) 18 §:n mukainen rakentamislupahakemus Hanhikivi 1 –ydinvoimalaitoksen rakentamiseksi. Helsinki: Fennovoima.

Gonyeau, J. (2005), Table of contents, Introduction. www.nucleartourist.com. [8.4.2016].

International Atomic Energy Agency IAEA (2003), External Events Excluding Earthquakes in the Design of Nuclear Power Plants. Wien: IAEA.

International Atomic Energy Agency IAEA (2012) Safety of Nuclear Power Plants: Design. Wien: IAEA.

International Atomic Energy Agency IAEA (2004a), News centre, From Obninsk Beyond: Nuclear Power Conference Looks to Future. www.iaea.org. [29.1.2016].

International Atomic Energy Agency IAEA (2004b), Protection against Internal Hazards other than Fires and Explosions in the Design of Nuclear Power Plants. Wien: IAEA.

International Atomic Energy Agency IAEA (2004c), Design of Reactor Containment Systems for Nuclear Power Plants: Safety Guide. Wien: IAEA.

International Atomic Energy Agency IAEA (2013), INES: The International Nuclear and Radiological Event Scale User's Manual 2008 Edition. Wien: IAEA.

International Atomic Energy Agency IAEA (2015), Scientific Resources, Power Reactor Information System. www.iaea.org. [16.3.2015].

Myllymäki J. (2012), Ydinvoimalaitoksen rakennesuunnittelu: runkorakenteet ja paloturvallisuus. Luento Oulun yliopistolla [27.3.2012].

Säteilyturvakeskus STUK (2016a), Säännöstö, Lainsäädäntö. www.stuk.fi. [26.3.2016].

Säteilyturvakeskus STUK (2016b), Säännöstö, Viranomaisohjeet. www.stuk.fi [26.3.2016].

Työ ja elinkeinoministeriö TEM (2013), Uutisarkisto, STUK asetti uudet ydinlaitosten turvallisuusvaatimukset. www.tem.fi. [22.4.2015].

World Nuclear Association WNA (2014), Information Library, Outline History of Nuclear Energy. www.world-nuclear.org. [26.3.2016].

World Nuclear Association WNA (2015), Information library, Chernobyl Accident. www.world-nuclear.org. [26.3.2016].

World Nuclear Association WNA (2016a), Information Library, Nuclear Power Reactors. www.world-nuclear.org. [29.1.2016].

World Nuclear Association WNA (2016b), Information Library, Fukushima Accident. www.world-nuclear.org. [26.3.2016].

Ydinturvallisuusohje YVL A.1 (2013), Ydinenergian käytön turvallisuusvalvonta. Helsinki: Säteilyturvakeskus STUK. 40 s.

Ydinturvallisuusohje YVL A.3 (2014), Ydinlaitoksen johtamisjärjestelmä. Helsinki: Säteilyturvakeskus STUK. 19 s.

Ydinturvallisuusohje YVL A.7 (2013), Ydinvoimalaitoksen todennäköisyysperusteinen riskianalyysi ja riskien hallinta. Helsinki: Säteilyturvakeskus STUK. 13 s.

Ydinturvallisuusohje YVL B.1 (2013), Ydinvoimalaitoksen turvallisuussuunnittelu. Helsinki: Säteilyturvakeskus STUK. 45 s.

Ydinturvallisuusohje YVL B.2 (2013), Ydinlaitoksen järjestelmien, rakenteiden ja laitteiden luokittelu. Helsinki: Säteilyturvakeskus STUK. 10 s.

Ydinturvallisuusohje YVL B.6 (2013), Ydinvoimalaitoksen suojarakennus. Helsinki: Säteilyturvakeskus STUK. 10 s.

Ydinturvallisuusohje YVL B.7 (2013), Varautuminen sisäisiin ja ulkoisiin uhkiin ydinlaitoksessa. Helsinki: Säteilyturvakeskus STUK. 26 s.

Ydinturvallisuusohje YVL E.4 (2013), Ydinlaitoksen organisaatio ja henkilöstö. Helsinki: Säteilyturvakeskus STUK. 24 s.

Ydinturvallisuusohje YVL E.6 (2013), Ydinlaitoksen rakennukset ja rakenteet. Helsinki: Säteilyturvakeskus STUK. 45 s.

Öster H. (2009), Ydinvoimalarakentaminen vaatii asennetta. Alara 1/2009: 9-11.

Taulukko 3. Tyypillisiä kuormitusyhdistelmiä. (IAEA 2004c; Myllymäki 2012)

| Kuormituksen kuvaus | Suunnittelu | Testi | KY1 | KY2 | KY3 | KY4 | KY5 | KY6 | KY7 | KY8 | KY9 |
|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------|----------------------|-----|-----|-----|-----|------|-----|------------|-----|-----|
| Omapaino | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| Esijännitys | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| Testauspaine- ja lämpötila | | x | | | | | | | | | |
| Suunnittelupaine- ja lämpötila | x | | | | | | | | | | |
| Käyttöpaine- ja lämpötila | | | x | x | x | x | x | x | | x | x |
| Tavanomainen putkistokuorma | | | x | x | x | x | x | | | x | x |
| Automaattisen paineenpäästöjärjestelmän aktivointipaine- ja lämpötila | | | | | x | | | | | | |
| Hydrodynaamiset kuormat | | | | | x | | | x | x | | |
| Tavanomainen tuuli | | | | x | | | | | | | |
| Äärimmäinen tuuli | | | | | | x | | | | | |
| Ulkoinen tapahtuma | | | | | | | x | | | | |
| Paine ja lämpötila oletetussa onnettomuudessa | | | | | | | | x | x | | |
| Oletetun onnettomuuden paikalliset vaikutukset | | | | | | | | | | x | |
| Oletetun onnettomuuden putkistokuorma | x | | | | | | | x | x | | |
| Lentokoneen törmäys | | | | | | | | | | x | |
| Ulkoinen räjähdys | | | | | | | | | | | x |
| Sallittavuuskriteeri rakenteelliselle eheydelle | Sallittu suunnittelujännitys | Testausraja-jännitys | I | I | I | I | II | I | III (LOCA) | II | II |
| Sallittavuuskriteeri tiiveydelle | Sallittu suunnittelutiiveys | I | I | I | I | I | N/A* | I | III | N/A | N/A |

*Tietoa ei saatavilla