

16.5.2011

Turvallisuusperiaatteet ja ulkoiset uhat

Yleiset turvallisuusperiaatteet

Jotta voitaisiin ymmärtää Fukushima onnettomuudesta saatuja kokemuksia, on hyödyllistä tuntea ydinvoimalaitosten turvallisuuden varmistamisessa noudatettavia yleisiä periaatteita.

Suurin onnettomuusriski ydinvoimalaitoksessa johtuu siitä, että radioaktiivisten fissiotuotteiden hajoaminen kehittää reaktorissa lämpöä vielä ketjureaktion pysähtymisen jälkeenkin. Mikäli polttoainesauvoja jäähdyttävä vesi menetetään, polttoainesauvat ylikuumenevat ja vaurioituvat.

Vesi voi hävitä, jos jäähdytyspiiriin tulee vuoto. Ylikuumenemisen estämiseksi reaktori varustetaan hätäjäähdytysjärjestelmillä, jotka syöttävät reaktoriin uutta vettä. Vesi voi hävitä myös kiehumalla, ellei lämpöä saada siirrettyä pois reaktorin jäähdytyspiiristä. Lämmönsiirto reaktorin jäähdytyspiiristä esimerkiksi meriveteen voidaan hoitaa useilla rinnakkaisilla jäähdytyspiireillä.

Sähkösaannin varmistaminen on oleellinen osa ydinvoimalaitoksen turvallisuuden varmistamista, sillä useimpien turvallisuusjärjestelmien käyttövoimana on sähkö. Sähkökatkon estämiseksi käytetään useita rinnakkaisia sähkölähteitä.

Turvallisuusjärjestelmien suunnittelussa noudatetaan seuraavia yleisiä periaatteita.

- **Moninkertaisuusperiaate:** Turvallisuusjärjestelmässä on useita toisiaan korvaavia identtisiä osajärjestelmiä. Turvallisuustehtävä täytetään, jos esimerkiksi kaksi neljästä tai yksi kolmesta osajärjestelmästä toimii.
- **Erotteluperiaate:** Rinnakkaiset osajärjestelmät suunnitellaan niin, että niiden yhtäaikainen vaurioituminen on epätodennäköistä. Osajärjestelmät sijoitetaan eri tiloihin tai samassa tilassa kauas toisistaan. Osajärjestelmät erotetaan toisistaan toiminnallisesti ja toisiinsa liittyvien järjestelmien haitalliset vuorovaikutukset estetään.
- **Erilaisuus- eli diversiteettiperiaate:** Sama toiminto toteutetaan eri toimintaperiaatteisiin perustuvilla järjestelmillä. Esimerkiksi reaktorin sammuttaminen voidaan tehdä säätösauvojen avulla tai pumppaamalla booriliuosta reaktoriin.
- **Turvallisen tilan periaate:** Jos laite menettää käyttövoimansa, se päättyy laitoksen turvallisuuden kannalta mahdollisimman turvalliseen tilaan. Esimerkiksi sähkönsyötön menetys turvajärjestelmien käynnistämisestä huolehtivassa suojausjärjestelmässä johtaa turvallisuusjärjestelmien käynnistymiseen.
- **Riittävä harkinta-aika:** Onnettomuuden alkuvaiheessa tarvittavat turvallisuus-toimenpiteet käynnistyvät automaattisesti. Ohjaajille jää riittävästi aikaa harkita

16.5.2011

jatkotoimenpiteitä, tyypillisesti 30 minuuttia. Henkilökunta voi ryhtyä toimenpiteisiin aikaisemminkin, mutta automaattisia toimenpiteitä ei voida pysäyttää, ellei toimenpiteen käynnistänyt raja-arvon ylittänyt suure ole palannut normaalille alueelleen.

Ydinvoimalaitoksen turvallisuus varmistetaan monella tasolla. Tätä toimintatapaa sanotaan syvyysuuntaiseksi puolustusperiaatteeksi. Ydinvoimalaitoksen suunnittelu on reaktorivaurioiden ja säteilyn haitallisten vaikutusten estämiseksi toteutettu useilla peräkkäisillä, toisiaan varmentavilla rakenteilla ja järjestelmillä. Turvallisuuden varmistamisessa on syvyyttä siten, että yksittäiset viat tai inhimilliset virheet eivät vaikuta merkittävästi laitoksen turvallisuuteen kokonaisuudessaan. Myös turvallisuuden tahallinen vaarantaminen estetään tämän periaatteen avulla luotettavasti.

Syvyysuuntaisen puolustusperiaatteen mukainen turvallisuustoimintojen puolustus perustuu viiteen peräkkäiseen tasoon, joista kaksi alinta tasoa on tarkoitettu ehkäisemään onnettomuuksia ja muut tasot on tarkoitettu suojaamaan laitosta ja sen käyttäjiä sekä ympäristöä onnettomuuden haitallisilta vaikutuksilta. Puolustustasot ovat seuraavat:

- Ensimmäisellä tasolla tavoitteena on estää poikkeamat laitoksen normaalista käyttötilasta. Tämän saavuttamiseksi järjestelmien, rakenteiden ja laitteiden suunnittelussa, valmistuksessa, asennuksessa ja huollossa sekä laitoksen käyttötoiminnassa on sovellettava korkeita laatuvaatimuksia, luotettavuusvaatimuksia ja riittäviä varmuusmarginaaleja.
- Toisella tasolla on laitoksen huolellisesta suunnittelusta ja käytöstä huolimatta varauduttava käyttöhäiriöihin ja varustettava laitos järjestelmin, joiden tehtävänä on havaita häiriöt ja pysäyttää niiden eteneminen sekä ohjata laitos automaattisesti hallittuun tilaan.
- Kolmannella tasolla on varauduttava onnettomuuksiin järjestelmin, jotka käynnistyvät automaattisesti onnettomuustilanteen syntyessä, suojaavat radioaktiivisten aineiden leviämistä pidättäviä esteitä ja estävät onnettomuuden kehittymisen vakavaksi onnettomuudeksi.
- Tasolla 4 tavoitteena on lieventää vakavan reaktorionnettomuuden seurauksia erityisesti varmistamalla suojarakennuksen eheys ja tiiveys. Lisäksi tasolla 4 tavoitteena on lieventää käytetyn polttoaineen varastossa tapahtuvaa onnettomuutta, johon liittyy merkittävän radioaktiivisen päästön mahdollisuus.
- Tasolla 5 tavoitteena on lieventää huomattavan radioaktiivisten aineiden päästön seurauksia valmiusjärjestelyin.

Kullakin syvyysuuntaisen puolustusperiaatteen tasolla on suunnittelutavoitteena pidettävä sitä, että radioaktiivisten aineiden päästö ei aiheuta laitoksen ympäristön asukkaille suurempaa säteilyannosta kuin valtioneuvoston asetuksen (733/2008) 8-10 §:ssä on esitetty.

16.5.2011

Syvyysuuntaisen puolustusperiaatteen puolustustasojen on oltava toisistaan riippumattomia siten, että yhden tai useamman puolustustason menetys ei olennaisesti vaikuta muiden puolustustasojen toimintaan.

Riippumattomuuden on perustuttava fyysisen erottelun, toiminnallisen erottelun ja erilaisuusperiaatteen riittävään soveltamiseen puolustuslinjojen välillä.

Turvallisuustoimintoja syvyysuuntaisen puolustuksen eri tasoilla tukevien järjestelmien on oltava toisistaan riippumattomia siten, että niiden vikaantuminen ei heikennä syvyysuuntaisen puolustusperiaatteen luotettavuutta.

Puolustustasojen välinen riittävä riippumattomuus pitää osoittaa sekä determinististen analyysien ja todennäköisyysperusteisten riskianalyysien avulla. Deterministisillä analyyseilla tarkoitetaan sitä, että tietyt viat oletetaan tapahtuviksi niiden todennäköisyydestä riippumatta ja analyysillä vaaditaan osoitettavaksi, että näiden vikojen varalle suunnitellut turvallisuusjärjestelmät täyttävät niille tarkoitetut tehtävät. Todennäköisyysperusteisessa riskianalyysissä tarkastellaan kuviteltavissa olevia onnettomuusskenaarioita, joihin liittyy tietyllä todennäköisyydellä tapahtuvia laitevikoja ja inhimillisiä virhetoimintoja. Todennäköisyydet saadaan vikatilastoista, joita on kerätty laajasti ydinvoimalaitoksilta ja erityisesti analysoitavan laitostyyppin kaltaisilta laitoksilta. Lisäksi voidaan käyttää tietoja myös muusta teollisuudesta laitoksilta, joilla vikatietoa kerätään järjestelmällisesti.

Tapahtumat, jotka voivat johtaa aikaiseen tai suureen päästöön on käytännöllisesti katsoen eliminoitava. Aikainen päästö tarkoittaa päästön alkamista aikaisemmin kuin mihin on varauduttu pelastustoimien suunnittelussa (4 tuntia siitä, kun tarve pelastustoimiin on tiedostettu ja päätös toimenpiteistä on tehty). Suuri päästö edellyttäisi pitkäaikaista (useita kuukausia) evakuointia suojavyöhykkeeltä tai evakuointia suojavyöhykkeen ulkopuolella.

Fukushiman onnettomuuden erityispiirteinä oli, että suunnitteluperuste tsunamiin varautumisen varalta (mikäli tsunami oli ylipäättänsä otettu suunnittelussa huomioon; vuoden 2010 alussa tehdyssä deterministisessä analyysissä oletettu tsunami oli korkeudeltaan alle puolet toteutuneesta) ylittyi niin voimakkaasti, että eri periaatteiden mukaiset järjestelmät ja eri tasojen toimintoja toteuttavat järjestelmät menettivät toimintakykynsä. Onnettomuus eteni hitaasti ja vastatoimenpiteisiin olisi periaatteessa ollut aikaa, mutta tsunamin ja maanjäristyksen seurauksena toimintaolosuhteet laitoksella olivat vaikeat. Onnettomuuden myöhäisemmässä vaiheessa myös säteily vaikeutti toimintaa.

Ydinenergia-alan tavanomaiseen toimintaan kuuluu, että kotimaisilla- ja ulkomaisilla ydinvoimalaitoksilla sattuneita tapahtumia seurataan ja analysoidaan, ja niiden merkitys sekä mahdolliset muutostarpeet selvitetään kunkin voimalaitoksen osalta.

Suomalaiset voimayhtiöt sekä STUK selvittävät myös Fukushiman onnettomuudesta saatujen kokemusten merkityksen maamme ydinvoimalaitosten kannalta. Erityisesti selvitetään uudestaan ja entistä perusteellisemmin sitä, onko Suomessa ajateltavissa tapahtumia, jotka voisivat uhata samanaikaisesti rinnakkaisia ja/tai eri

16.5.2011

toimintaperiaatteella toimivia turvallisuusjärjestelmiä sekä syvyysuuntaisen turvallisuuspuolustuksen eri tasoja.

Turvallisuuden jatkuva parantaminen

Toiminnassa oleville suomalaisille ydinvoimalaitoksille on niiden käyttöaikana tehty runsaasti laitosmuutoksia turvallisuuden parantamiseksi. Laitosten käynnistymisen jälkeen aluksi tehdyt parannukset perustuivat sekä omilta että ulkomaisilta ydinvoimalaitoksilta saatuihin kokemuksiin ja tutkimuksen avulla hankitun tiedon lisääntymiseen. Näillä laitosmuutoksilla parannettiin erityisesti varautumista tulipaloihin ja ulkoisiin uhkiin sekä varmistettiin laitoksen sähkönsaantia ja jäädytystä häiriötilanteissa. STUK on raportoinut laitojen turvallisuuden kannalta merkittävistä muutoksista laitojen käytön alusta alkaen vuosi- ja neljännesvuosiraporteissaan.

Toiminnassa olevien yksiköiden riskejä on 1980-luvun lopulta alkaen arvioitu todennäköisyysperusteisten riskianalyyseiden (probabilistic risk/safety analysis, PRA eli PSA) avulla. Ensimmäiset PRA-analyytit valmistuivat vuonna 1989. Niissä tutkittiin onnettomuusketjuja, jotka alkoivat laitoksen sisäisistä tehoajolla sattuneista vioista. Myöhemmin analyysejä on laajennettu siten, että alkutapahtumina tarkastellaan myös tulipaloja, laitoksen sisäisistä vuodoista johtuvia tulvia, sääilmiöitä ja muita ulkoisia uhkia sekä maanjäristyksiä. Lisäksi PRA-analyytit on laajennettu koskemaan tapahtumia, jotka voivat sattua laitoksen ollessa huoltoseisokissa. PRA:n tuloksia on käytetty apuna laitosmuutostarpeiden tunnistamisessa ja laitosmuutosten suunnittelussa sekä ohjeiston parantamisessa ja valvomohenkilökunnan koulutuksessa. Kukin PRA-analyytin laajennus on tuonut uusia näkemyksiä ja johtanut turvallisuuden parantamiseen.

Olkiluoto 3 yksikön PRA-analyysi tarkastettiin ensimmäisen kerran jo rakentamislupaa käsiteltäessä ja tarkastuksen tulosten perusteella päädyttiin vaatimaan tiettyjä muutoksia laitokselle. Laitoksen käyttölupahakemuksen tarkastuksen yhteydessä PRA-analyytin sisältö ja tulokset tarkastetaan uudelleen. Uusille laitossyksiköille PRA:n laatiminen aloitetaan suunnittelun varhaisessa vaiheessa. Toiminnassa olevilla ydinvoimalaitossyksiköillä on Tshernobylin onnettomuuden jälkeen toteutettu laaja ohjelma vakaviin onnettomuuksiin (reaktorisydämen sulamiseen) varautumiseksi. Tämän ohjelman perusstrategia on, että reaktorin suojarakennuksen eheyttä uhkaavat ilmiöt on tunnistettu ja kunkin ilmiön varalle on suunniteltu uudet turvajärjestelmät, joilla suojarakennuksen eheys turvataan. Nämä uhat ovat:

- vetyräjähdys
- reaktorisydämen sulaminen korkeassa paineessa ja reaktorin jäädytyspiiristä purkautuvan sulan massan voimakas kemiallinen reaktio suojarakennuksen ilman kanssa
- reaktorisuojarakennuksen hidas paineen kasvu
- sulaneen reaktorin aiheuttama suojarakennuksen puhkeaminen

16.5.2011

Edellä kuvattu varautuminen vakaviin reaktorionnettomuuksiin toiminnassa olevilla ydinvoimalaitoksilla ei ole normaali kansainvälinen käytäntö. Suomen lisäksi ainoastaan Ruotsissa on tehty vastaavat toimenpiteet.

Uusille yksiköille varautuminen reaktorisydämen sulamiseen on alun perin suunnitteluperusteena.

Turvallisuuden jatkuvan parantamisen kannalta olennaista on turvallisuusvaatimusten kehittäminen turvallisuustutkimuksen ja käyttökokemusten tulosten seurauksena. Suomessa turvallisuusvaatimukset on pidetty jatkuvasti ajan tasalla. Uusia vaatimuksia voimaan asetettaessa arvioidaan toiminnassa ja rakenteilla olevien laitosten vaatimustenmukaisuus uusia vaatimuksia vasten. Mikäli vaatimukset eivät täyty, on luvanhaltijan esitettävä suunnitelma laitoksen turvallisuuden parantamiseksi vaatimusten täyttämiseksi. STUK tarkastaa luvanhaltijan esittämät suunnitelmat.

Laitoksen rakentamis- ja käyttöluvapaiheiden turvallisuusarviointien lisäksi Suomessa laitoksille tehdään määrävälein kattavat turvallisuusarvioinnit. Turvallisuusarvioinnit tehdään käyttö lupien uusinnan yhteydessä. Mikäli laitoksen käyttö lupajakson pituus on ollut pidempi kuin 10 vuotta, on lupajakson aikana edellytetty tehtävän määräaikainen turvallisuusarviointi. Käyttö lupien uusinnan ja määräaikaisten turvallisuusarviointien yhteydessä laitosten turvallisuus arvioidaan vastaavasti kuin laitoksen alkuperäistä käyttö lupaa annettaessa. Arviointien yhteydessä on tyypillisesti tunnistettu mahdollisuuksia parantaa laitosten turvallisuutta ja laadittu suunnitelmat toimenpiteiksi.

Ulkoiset uhat suomalaisilla laitospaikoilla

Ydinvoimalaitosten suunnittelussa on varauduttava poikkeuksellisiin luonnonilmiöihin ja muihin laitoksen ulkopuolisiin tapahtumiin, jotka voivat uhata laitosten turvallisuutta. Vaatimus on esitetty ydinvoimalaitosten turvallisuudesta annetun valtioneuvoston asetuksen (VNa 733/2008) 17 §:ssä ja sitä on täsmennetty STUKin julkaisemissa YVL-ohjeissa sekä laitoskohtaisissa päätöksissä. Turvallisuussuunnittelun lähtökohtana käytettävät ulkoiset tapahtumat ja niiden voimakkuudet selvitetään laitospaikkakohtaisesti.

Ydinvoimalaitosten suunnittelussa on otettava huomioon mm. seuraavat ulkoiset tapahtumat ja niiden mahdollisiksi arvioidut yhdistelmät:

- sääilmiöt
 - voimakas tuuli, mukaan lukien trombit ja syöksyvirtaukset
 - vesisade, lumisade ja lumikuorma, raesade ja jäätävä sade
 - ilman kosteus, sumu, huurtuminen
 - salamet
 - ulkoilman korkea ja matala lämpötila
- meriveden korkea ja matala pinta
- jäähditysveden saannin tukkeutumisvaaraa aiheuttavat ilmiöt
 - levä ym. kasvusto ja eliöstö sekä muu merimoska
 - jää ja suppo
 - öljy- ym. kemikaalipäästöt meriveteen
- maanjäristykset

16.5.2011

- räjähdyspaineaallot
- palavien, myrkyllisten ja tukahduttavien kaasujen päästöt
- lentokoneen törmäys.

Eräät edellä mainituista ulkoisista tapahtumista voivat liittyä onnettomuuteen tai laitoksen tahalliseen vahingoittamiseen. Tässä selvityksessä ei käsitellä yksityiskohtaisesti laitoksen tahallista vahingoittamista.

Äärimmäisten sääilmiöiden ja muiden luonnonilmiöiden voimakkuudelle tietyllä laitospaikalla ei yleensä voida määrittää täsmällistä ylärajaa. Ilmiöille määritetään ääriarvojakauma, joka ilmaisee tietyn voimakkuuden ylittymisen todennäköisyyden vuoden aikana. Ääriarvojakaumaa kuvaava käyrä on yleensä voimakkaasti laskeva eli ilmiön voimakkuuden kasvaessa sen esiintymistaajuus pienenee nopeasti,

Suunnitteluperusteena käytettävä arvo voidaan valita esimerkiksi siten, että suunnitteluperusteen ylittymisen vuotuinen todennäköisyys on ääriarvojakauman mukaan riittävän pieni. Todennäköisyydelle käytettävä raja voi vaihdella sen mukaan, kuinka vakavat seuraukset suunnitteluperusteen ylittymisestä on, esimerkiksi vaikuttaako kulloinkin tarkasteltava ilmiö kaikkiin turvallisuusjärjestelmiin vai ainoastaan johonkin yksittäiseen järjestelmään.

Luonnonilmiöiden ääriarvojakaumat määritetään käytettävissä olevien mittaustulosten perusteella. Määrityksessä käytetään sekä laitospaikkakohtaisia että lähistöllä sijaitsevien Ilmatieteen laitoksen ja nykyisin sen osana toimivan entisen Merentutkimuslaitoksen mittausasemien mittaussarjoja. Laitospaikkakohtaisten suunnitteluarvojen määrittäminen kuuluu suomalaisen käytännön mukaan luvanhaltijalle, joka käyttää apunaan alan asiantuntijaorganisaatioita, esimerkiksi Ilmatieteen laitosta. STUKin tehtävänä on luvanhaltijan esittämien selvitysten ja suunnitteluarvojen riippumaton arviointi. Tarvittaessa myös STUK käyttää apunaan ko. erityisalan koti- ja ulkomaisia asiantuntijaorganisaatioita.

Sääitietoja ja muita luonnonilmiöitä koskevia mittaustietoja on käytettävissä tyypillisesti vain noin sadan vuoden ajalta. Ydinvoimalaitoksen turvallisuussuunnittelussa myös erittäin pienet vuotuiset todennäköisyydet ovat kiinnostavia. Tämän takia ääriarvojakaumia joudutaan jatkamaan selvästi pienempiin esiintymistodennäköisyyksiin kuin mittaussarjojen pituuden perusteella voitaisiin luotettavasti tehdä. Ääriarvojakaumista saatavat pieniä esiintymistodennäköisyyksiä vastaavat ilmiöiden voimakkuudet ovat siten hyvin epävarmoja. Suunnitteluarvojen valinnassa on siten tarpeen käyttää matemaattisten menetelmien lisäksi asiantuntija-arvioita ja soveltaa riittäviä varmuusmarginaaleja.

Mittaustietojen lisäksi suunnitteluperusteiden määrityksessä voidaan käyttää historiallisia kuvauksia poikkeuksellisista luonnonilmiöistä. Historiallisten kuvausten hyödyntäminen on tavanomainen käytäntö esimerkiksi seismisten olosuhteiden arvioinnissa.

16.5.2011

3.1 Merivesijärjestelmien tukkeutumisvaaraa aiheuttavat tapahtumat

Meriveden mukana kulkeutuvat epäpuhtaudet sekä suppojää voivat aiheuttaa merivesijärjestelmien tukkeutumista. Osittainen tukkeutuminen aiheuttaa yleensä vain laitoksen tehonalennuksen tai pysäytyksen eikä estä sammutetun reaktorin jäähdytysjärjestelmien vaatimaa oleellisesti pienempää merivesivirtausta. Täydellinen tukkeutuminen estää myös sammutetun reaktorin jäähdytyksen tavanomaisilla järjestelmillä.

Merivedessä esiintyviä tukkeutumisvaaraa aiheuttavia luonnollisia epäpuhtauksia ovat levä ja muut vesikasvit sekä rannoilta myrskyjen aikana irtoava kuollut kasvusto ja muu merimoska. Epäpuhtauksien joutumien merivesijärjestelmiin pyritään estämään teknisillä ratkaisulla. Suurikokoisten epäpuhtauksien, esimerkiksi ajopuiden, joutuminen vedenottoihin estetään karkea- ja hienovälpillä, joissa tankojen väli on noin 15 – 80 mm. Hienojakoisemmat epäpuhtaudet kerätään ns. ketjukorisuodattimilla. Niissä käytetään metalliverkkoa, jonka silmäkoko on noin 2 mm. Ketjukorisuodattimet pyörivät jatkuvasti ja niihin kertyneet epäpuhtaudet poistetaan siten, että suodattimien tukkeutumisaste ei normaalisti lisäännä käytön aikana.

Meriveden virtausta valvotaan jatkuvasti. Jos paine-ero suodattimien yli alkaa kasvaa poikkeuksellisesti, alkavan tukkeutumisen paheneminen pyritään estämään pienentämällä virtausta, mikä vaatii myös reaktorin tehon alentamista tai reaktorin sammuttamista. Näin pyritään varmistamaan, että tukkeutuminen ei estä turvallisuusjärjestelmien vaatimaa suhteellisen pientä merivesivirtausta.

Ydinvoimalaitoksissa varaudutaan myös merivesijäähdytyksen täydelliseen menetykseen. Uusissa ydinvoimalaitoksissa varautumisen perustana käytetään 72 tunnin keskeytystä meriveden saannissa. Vanhoille yksiköille ei ole suunnitteluvaiheessa ollut täsmällisiä vaatimuksia. Varautumisen teknillinen toteutus riippuu laitostyyppistä.

Epäpuhtauksien lisäksi laitoksen meriveden saannin voi tukkia suppojään muodostuminen vedenottorakenteisiin. Suppo voi syntyä kun meri on jääpeitteetön, mutta ilman lämpötila on alle 0 °C ja vallitsee voimakas tuuli. Tällöin veden pinnalle ei ala muodostua jääkantta, vaan syntyneet jääkiteet voivat turbulenssin vaikutuksesta painua syvälle pinnan alle ja/tai veden lämpötila voi laskea tilapäisesti alle jäätympisteen. Kun virtaus häiriintyy vedenottorakenteissa, voi tapahtua erittäin nopeaa jään muodostusta, mikä voi pienentää tulovirtausta ja pahimmassa tapauksessa jopa tukkia virtauksen täydellisesti. Supon estämiseksi ydinvoimalaitoksilla käytetään lämpimän lauhdeveden kierrätystä meriveden tulokanavaan ja eräiden vedenottorakenteiden lämmitystä jääkiteiden tarttumisen estämiseksi.

Merellä tapahtuvan öljyonnettomuuden yhteydessä mereen päässyt öljy voi myös tukkia ydinvoimalaitoksen merivesijärjestelmiä, jos suuria määriä öljyä kulkeutuu voimalaitoksen meriveden ottoalueelle. Vilkkaasti liikennöidyt laivareitit eivät kulje ydinvoimalaitosten välittömässä läheisyydessä, joten öljyonnettomuudesta todennäköisesti saadaan ennakoilmoitus hyvissä ajoin laitoksen alasajoa ja öljyntorjunnan käynnistämistä varten. Suomalaisilla ydinvoimalaitoksilla turvallisuusjärjestelmien tarvitsema merivesi voidaan ottaa normaalin ottopaikan lisäksi meriveden poistopuolelta. Meriveden ottoalueiden suojaamiseksi öljypuomeilla on

16.5.2011

olemassa ohjeistetut menettelyt, jotka nojautuvat voimalaitoksen ja alueellisen pelastuslaitoksen yhteistyöhön.

3.2 Tulvimisvaaraa aiheuttavat tapahtumat

Suomen ydinvoimalaitoksilla laitostilojen tulviminen voisi johtua meren pinnan poikkeuksellisesta noususta, poikkeuksellisen voimakkaasta paikallisesta sateesta ja laitoksen sisäisten vesijärjestelmien vuodoista.

Suomen rannikolla meriveden pinnankorkeuden vaihteluihin vaikuttaa Itämeren kokonaisvesimäärä, joka riippuu Pohjanmeren tuuliolosuhteista, ilmanpaineen alueelliset vaihtelut (esim. etelässä korkea ilmanpaine ja Suomen rannikolla matalapaine), tuuli ja Itämeren altaan ominaisheilahtelut (seiche). Vuoroveden vaikutus Itämerellä on pieni.

Meriveden pinnankorkeuden ääriarvoja arvioidaan sovittamalla mittaustietoihin ääriarvojakaumia. Arvioimalla edellä mainittuja meriveden pinnankorkeuteen vaikuttavia tekijöitä erikseen voidaan lisäksi päätellä, mikä olisi pinnankorkeuden maksimiarvo, jos kaikki tekijät saavuttavat samanaikaisesti huippuarvonsa. Tulvimisvaaraa aiheuttavia meriveden pinnankorkeuden arvoja ja niiden esiintymistajuuksia käsitellään jäljempänä voimalaitoskohtaisesti.

Fukushiman onnettomuuden aiheutti seisminen tsunami. Merkittävät seismiset tsunamit eivät ole mahdollisia Itämeren alueella. Yhtäältä täällä ei ole aktiivisia siirrosvyöhykkeitä, joissa voisi tapahtua tsunamieja aiheuttavia suuria pystysuuntaisia siirroksia. Toisaalta Itämeri on kauttaaltaan niin matala, että siirros ei panisi liikkeelle vastaavia suuria vesimassoja kuin kilometrien syvyisillä valtamerialueilla.

Maanjäristyksen lisäksi tsunamin voi aiheuttaa myös muu tapahtuma, joka panee liikkeeseen suuria vesimassoja. Tällaisia ovat vedenalaiset maanvyöryt ja tulivuorenpurkaukukset sekä voimakkaat vedenalaiset räjähdykset (ydinräjähdykset) sekä mereen osuvat suuret meteoriitit. Itämeren alueella ei ole tulivuoria. Vedenalaiset ydinräjähdykset ovat periaatteessa mahdollisia mutta epätodennäköisiä. Suuren meteoriitin putoaminen Itämereen on mahdollista, mutta merkittävän tsunamin syntymiseen johtavan meteoriitin todennäköisyys on arvioitu erittäin pieneksi. Itämeren alueelta ei myöskään ole tiedossa jyrkänneitä, joihin liittyisi suuren vedenalaisen maanvyöryn riski.

Meriveden korkeudessa voi esiintyä myös nopeita paikallisten sääilmiöiden aiheuttamia vaihteluita, joita on mahdollisesti tarpeen selvittää tarkemmin. Esimerkkeinä voidaan mainita paikallisen alipaineen aiheuttama meriveden pinnan nousu ja ukkosrintamiin liittyvät ns. meteotsunamit, joiden syntyminen edellyttää niille suotuisten sääolosuhteiden lisäksi sopivia merenpohjan korkeussuhteita ja rannikon muotoa.

Meteoriitin ja maanvyöryn aiheuttaman tsunamin sekä meteotsunamin esiintymisen mahdollisuutta ja tulva-aallon teoreettisesti mahdollista korkeutta ei ole selvitetty yksityiskohtaisesti, joten ilmiötä saattaa olla perusteltua arvioida aikaisempaa tarkemmin esimerkiksi kansallisessa ydinturvallisuustutkimusohjelmassa. Ilmatieteen laitoksen merentutkimusasiantuntijoiden kanssa käytyjen keskustelujen mukaan ei ole

16.5.2011

odotettavissa, että nämä ilmiöt aiheuttaisivat merkittäviä riskejä suomalaisille ydinvoimalaitoksille.

3.3 Maanjäristykset

Suomessa ja sen lähialueilla ei ole aktiivisia seismisiä siirrosvyöhykkeitä eikä Suomen alueen historiassa tunneta maanjäristystuhoja. Loviisan ja Olkiluodon laitospaikat sijaitsevat Suomen seismisesti hiljaisimmalla vyöhykkeellä. Pohjois-Suomen mahdollisten laitospaikkojen ympäristössä seisminen aktiivisuus on jonkin verran voimakkaampaa.

Suomessa ydinlaitoksilta edellytetään maanjäristyskestävyyttä. Vastaavat ydinturvallisuusvaatimukset esitetään STUKin laatimissa YVL-ohjeissa. Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaan tavanomaisessa rakentamisessa ei edellytetä maanjäristyskestävyyssuunnittelua.

Vähäisen seismisen aktiivisuuden takia tavanomaisen rakentamisen maanjäristyssuunnittelua koskevan Euroopan Unionin Eurocode 8 – En 1998 EU-standardin noudattamista ei vaadita Suomessa toisin kuin niissä EU-maissa, joissa maanjäristykset ovat yleisiä. Ydinlaitoksille edellytetään yleisesti selkeästi konservatiivisempia seismisen kestävyys suunnittelumenetelmiä, kuin Eurocode 8 esittää tavanomaiselle rakentamiselle.

Nykyisille laitospaikoille on asetettu kestävyysvaatimukset maanjäristyksiä vastaan. Keskeinen vaatimus on, että rakennukset, rakenteet ja laitteet kestävät, kun rakennusten perustuksiin vaikuttaa vaakasuuntaiset 0,1 g ja pystysuuntaiset $2/3 \cdot 0,1$ g kiihtyvyydet. Vaatimus perustuu tilastolliseen analyysiin, jossa suuruusluokaltaan erilaisia maanjäristyksiä on havaittu ja arvioitu tapahtuvan eri etäisyyksillä laitospaikkoihin nähden. Suunnitteluvaatimukseksi on otettu esiintymistodennäköisyydellä kerran 100 000 vuodessa toistuvan maanjäristyksen mediaaniarvo. Suoraan laitospaikan alapuolella vaikuttavan n. 4,2 magnitudin (M) maanjäristyksen on arvioitu aiheuttavan suunnitteluvaatimuksen mukaiset kiihtyvyydet. Kauempana 4,2 M maanjäristyksen aiheuttamat kiihtyvyydet vaimenevat kestävyysvaatimuksia pienemmiksi. Esimerkiksi 5,0 M maanjäristyksellä on merkitystä suomalaisille ydinvoimalaitoksille, jos se tapahtuu n. 25 km säteellä laitosalueesta. Tällöin vastaavat kiihtyvyydet vaakasuunnassa olisivat 25 km etäisyydeltä n. 0,1 g ja suoraan alapuolelta n. 0,25 g.

Olkiluoto 3:n suunnittelussa on maanjäristyskuormat on otettu huomioon alusta alkaen. Vastaavasti uusille ydinvoimalaitosyksikköjen maanjäristyssuunnittelua koskevat vaatimukset määritellään hankkeiden alkuvaiheessa. Olkiluoto 3 on suunniteltu ja uudet laitokset suunnitellaan kestäväksi myös laajarunkoisen liikennelentokoneen törmäys. Tämä johtaa laitoksilla ominaisuuksiin, jotka tuovat lisääntyneen turvallisuusmarginaalin myös maanjäristystilanteessa.

Toiminnassa olevia ydinvoimalaitosyksikköjä suunniteltaessa 1970-luvulla suomalainen säännöstö ei edellyttänyt erikseen varautumista maanjäristyksiin, vaan muiden kuormitusten katsottiin kattavan riittävästi myös maanjäristyskuormat. Toiminnassa olevien laitosten maanjäristyskestoisuutta on analysoitu jälkeenpäin muun muassa seismisten riskianalyyseiden yhteydessä. Analyysissä havaittuja maanjäristyskuormituksille herkkiä laitteita ja rakenteita on parannettu. Suomalaisten

16.5.2011

laitosten maanjäristyskestävyyssuunnittelu ja riskiarviot ja turvallisuuden kehittäminen vastaavat hyvää kansainvälistä tasoa ja ne osoittavat nykyisten suunnitteluvaatimusten mukaisen turvallisuustason täyttymisen. Jatkuvan turvallisuuden parantamisen on ollut Suomessa tehokasta siten, että havaitut parannustarpeet on toteutettu riskiarvioiden perusteella suhteellisen nopeasti.

Fukushiman ydinvoimalaitosonnettomuuteen vaikuttaneilla maanjäristyksillä ei ole merkitystä Suomen ja Suomen lähialueiden seismiseen historiatietoon eikä siten suoranaisesti seismisesti passiivisella alueella käytettävällä menetelmällä saatuihin kiihtyvyyssarvoihin. Seismisten riskien arvioissa merkittävien tekijä on maanjäristysten suuruuden ja esiintymistiheyksien arviointi. Myös rakennusten vasteanalyysien ja laitteiden rikkoutumisanalyysien epävarmuudet on otettava huomioon suunnittelua ja riskiarviota tehtäessä. Maanjäristyskestävyyssuunnittelun kannalta Fukushiman tapauksessa maanjäristys oli n. 25 % suurempi kuin laitoksen vastaavat suunnitteluvaatimukset.

Fukushiman ja Kashiwazaki-Kariwan (16.7.2007) tapaukset osoittavat, että maanjäristysalueilla esiintyy asetettuja suunnitteluvaatimuksia suurempia maanjäristyksiä. Toisaalta näiden tapahtumien yhteydessä on myös kokemusperäisesti havaittu, että maanjäristyksiä kestäviksi suunnitellut laitokset kestävät huomattavasti suurempia kuormia kuin mitä vastaan ne on suunniteltu. Vuonna 2010 STUK teki aloitteen, jonka seurauksena SAFIR tutkimusohjelmassa käynnistettiin vuoden 2011 alussa tutkimusprojekti maanjäristyskestävyyssuunnitteluun liittyvistä epävarmuuksista. Tässä tutkimuksessa arvioidaan nykyisten menetelmien mukaisten maanjäristysriskien, kestävyysvaatimusten ja vastaavan suunnittelun varmuustasoja.

STUK ottaa Fukushiman tapahtumat huomioon säännöstökehityksessä ja harkitsee maanjäristyskestävyyssuunnittelun tiukentamista, kuten asetettuja kiihtyvyyssuunnittelun kriteerejä sekä kestävyysvaatimusten asettamista sammutusjärjestelmille maanjäristyksiä ja tulvia vastaan. Tämä koskee sekä uusia laitoksia että käyvien laitosten riskitarkasteluja. STUK mm. harkitsee täsmennystarpeita niiden käyvien laitosten polttoainealtaiden osalta, joiden alkuperäisessä suunnittelussa ei ole ollut maanjäristyskestävyyssuunnittelun vaatimuksia.

3.4 Suojautuminen myrskyjä vastaan

Ydinlaitosten rakenteellinen suojaaminen myrskyjä vastaan toteutuu massiivisilla ja/tai lujilla voimalaitosrakenteilla sekä ilmastointijärjestelmien suojausratkaisuilla. Äärimmäisistä sääilmiöistä ei pystytä määrittelemään yleisesti hyväksytyjen standardien perusteella suunnittelukuormia rakenteiden mitoitusta varten. Käytetyt suunnitteluvarvot perustuvat ilmiöitä kuvaaviin teorioihin, mittauksiin ja asiantuntija-arvioihin. Suurimmat trombit voivat painekuormien lisäksi aiheuttaa heitteitä, jossa suuret ja raskaat esineet voivat lentää ilmassa suurilla nopeuksilla ja törmätä rakennuksiin.

Suomessa ei esiinny hurrikaani-luokan myrskyjä ja voimakkaat trombit (eli tornadot) ovat harvinaisia. Suomen olosuhteissa on suhteellisen epätodennäköistä, että voimakas tuuli aiheuttaisi välittömiä vaurioita ydinvoimalaitoksen turvallisuusjärjestelmiin. Sen sijaan ulkoisen verkkoyhteyden menettäminen myrskyn takia on huomattavasti todennäköisempää. Turvallisuusjärjestelmien suunnitteluratkaisuilla on erityisesti

16.5.2011

varmistettava, että myrskyt tai niihin liittyvät ilmiöt eivät uhkaa samanaikaisesti ulkoista verkkoyhteyttä ja varavoimalähteitä.

3.5 Esimerkkejä samanaikaisista ulkoisista tapahtumista

Yksittäisten äärimmäisten sääolosuhteiden tai muiden poikkeuksellisten ulkoisten tapahtumien lisäksi ydinvoimalaitosten turvallisuussuunnittelussa on tarpeen tarkastella ulkoisten tapahtumien yhdistelmiä sekä ulkoisten ja sisäisten tapahtumien yhdistelmiä. Tätä varten on tärkeää selvittää erityisesti sellaiset harvinaiset tapahtumat, joiden samanaikainen esiintyminen on mahdollista keskinäisten riippuvuuksien takia.

Voimakas tuuli voi myös aiheuttaa meriveden pinnan nousun. Korkea merivesi voi irrottaa levää ja muuta rannalla olevaa moskaa, joka voi aiheuttaa merivesijärjestelmien tukkeutumisvaaraa. Meriveden saannin keskeytyminen estää aiheuttaa eräiden jäähdytysjärjestelmien toiminnan. Jos varavoimakoneet ovat vesijäähdytteisiä, merivesijäähdytyksen estyminen voi johtaa myös varavoimakoneiden toimintakyvyn menetykseen.

Lumimyrsky voi tavanomaisten myrskyn vaikutusten lisäksi aiheuttaa ilmanottoaukkojen tukkeutumista. Seurauksena voi olla pahimmillaan esimerkiksi varavoimadieselien paloilman saannin tukkeutuminen tai turvallisuudelle tärkeiden tilojen tai laitteiden jäähdytyksen menetys, joka saattaa johtaa laitteiden toimintakyvyn heikkenemiseen.

Trombit esiintyvät ukkosten yhteydessä. Sähkölaitteiden, erityisesti varavoimajärjestelmien, suunnittelussa on siten varauduttava poikkeuksellisten tuulikuormien esiintymiseen samanaikaisesti salamoinnin kanssa.

Valtakunnallinen sähköverkko on suunniteltu kestäväksi poikkeuksellisia ulkoilman lämpötiloja. Tästä huolimatta äärimmäisissä ulkoilman lämpötiloissa ydinvoimalaitosten ulkoisen sähkönsyötön menetyksen mahdollisuus on tavanomaista suurempi. Kuumalla ilmalla suurjännitelinjoiden johtimet riippuvat lämpölaajenemisen takia tavallista alempana ja tällöin on lisääntynyt maasulun mahdollisuus esimerkiksi linjan alla kasvavien pensaiden kautta, vaikka tämä pyritäänkin estämään säännöllisellä raivauksella. Poikkeuksellisen helteellä on myös lisääntynyt ukkosmyrskyjen ja trombien riski. Poikkeuksellisella pakkasella sähköverkolla on suuri kuormitus ja yksittäiset häiriöt voivat normaalia helpommin laajentua kantaverkon suurhäiriöiksi. Edellä mainituista syistä on erityisen tärkeää varmistaa varavoimadieselien käynnistyminen ja pitkäaikainen toiminta myös ulkoilman äärimmäisissä lämpötiloissa.

Näiden samanaikaisten ulkoisten tapahtumien vaikutuksia on vielä tarpeen tarkastella yksityiskohtaisesti laitetasolla ja varmistaa, että tiettyjä samantyyppisiä laitteita ei menetetä ulkoisten tapahtumien yhteisvaikutuksen seurauksena.

16.5.2011

Käyttökokemusten huomioonottaminen sähköjärjestelmien ylläpidossa ja suunnittelussa

Voimayhtiöillä on kansainvälisiä käyttökokemuksia järjestelmällisesti seuraavat ryhmät, jotka tekevät havaintojen perusteella suosituksia toimenpiteistä omilla laitoksilla. STUK seuraa käyttökokemuksia ja velvoittaa niiden perusteella tarvittaessa voimayhtiöitä ryhtymään korjaaviin toimenpiteisiin.

Kansainvälisiä käyttökokemuksia saadaan analysoitavaksi ydinvoimateollisuuden WANO yhteistyönä ylläpitämästä järjestelmästä ja IAEA/NEA ylläpitämä IRS -järjestelmästä. Euroopan komission tutkimuslaitoksessa JRC:ssä toimii ydinvoimalaitosten käyttökokemusten hyödyntämisen tehostamiseen tähtäävä ryhmä. Tämän ryhmän toiminta on käynnistynyt STUKin aloitteesta vuonna 2008. Ryhmä analysoi ydinturvallisuuden kannalta keskeisiä tapahtumia ja kerää tietoa ydinvoimalaitoksilla toteutetuista korjaavista toimenpiteistä. Ryhmän käsittelyssä on ollut mm. ulkoisen verkkoyhteyden häiriöiden aiheuttamat tapahtumat sekä sääilmiöiden ja muiden ulkoisten tapahtumien aiheuttamat häiriöt.

Suomalaisten laitosten käyttöhistorian aikana on sähköjärjestelmien suunnitteluperusteita tarkennettu kotimaassa tai ulkomailla tehtyjen käyttökokemushavaintojen vaikutuksesta. Myös järjestelmien rakenteeseen on tehty muutoksia ja laitteita on vaihdettu kokemusten perusteella. Useimmat muutokset ovat olleet pieniä ylläpito-ohjeiden tai laitteiden merkintöjen täsmennyksiä tai muutoksia laitteiden toimintaa ohjaaviin rajoihin. Laajempia toimenpiteitä ovat olleet mm. ikääntyneiden kaapeleiden vaihdot, sähkölaitteiden ja kaapeleiden vanhenemisen seurannan kehittäminen, 110 kV verkkoyhteyksien kehittäminen, releiden yhteisvikaantumiseen varautuminen sekä sähkölaitteiden jännitehäiriökestoisuusvaatimusten tiukentamisen ja niistä johtuvat kehitystoimenpiteet.

Laittevikojen merkitystä turvallisuudelle arvioidaan käyttötapahtumien yhteydessä. STUK julkaisee vuosittain Ydinenergian käytön turvallisuusvalvontaa käsittelevän raportin, jonka liitteessä käsitellään turvallisuuden tunnuslukuja. Näistä yksi kuvaa laitevikojen riskimerkitystä. Laitteiden epäkäytettävyyden vaikutus onnettomuusriskiin esitetään vuodesta 2000 alkaen. Olkiluoto 1 ja Olkiluoto 2 laitosisyksiköiden kuvaajissa näkyvät merkittävimmät tapahtumat vuosina 2000 ja 2008 liittyvät sähköjärjestelmiin. Sähköjärjestelmien häiriökestoisuus nousi esiin Forsmarkin voimalaitoksella 2006 tapahtuneen jännitehäiriön seurauksena. Tapahtuman perusteella on laadittu kansainvälinen suositus ydinvoimalaitoksen sähköverkkojen rakenteesta ja käytöstä. Suomessa sähköjärjestelmien korjaavat toimenpiteet aloitettiin heti tapahtuman jälkeen, ja ne saatiin valmiiksi vuoden 2010 kuluessa. Tapahtuman opetukset on huomioitu Olkiluoto 3 -hankkeessa ja tullaan huomioimaan uusissa laitosisyksiköissä.

Vuosittain STUK järjestää valmiusharjoitukset ydinvoimalaitosten kanssa. Näissä harjoituksissa simuloidaan valmiustilannetta. Harjoitusten valmistelussa hyödynnetään laitoksen omia käyttökokemuksia. Jotta harjoituksissa päästään simuloimaan vakavia reaktorionnettomuuksia, usein oletetaan vikoja sähköjärjestelmiin ja rajoituksia mahdollisuuksiin korjata niitä.