

Ohje YVL E.4, Ydinvoimalaitoksen painelaitteiden lujuusanalyysit

1 Soveltamisala

Ohjeessa YVL E.4 "Ydinvoimalaitoksen painelaitteiden lujuusanalyysit" esitetään vaatimuksia ydinvoimalaitoksen primääripiirin ja muiden turvallisuuden kannalta tärkeiden ydinteknisten painelaitteiden kuormituksista ja lujuusanalyyseista. Vaatimukset koskevat soveltuvilta osiltaan luvanhakijaa tai -haltijaa, laite- tai laitostoimittajia sekä muita suunnittelu-, testaus- ja asiantuntijaorganisaatioita.

2 Vaatimusten perustelut

2.1 Jännitysanalyysi

Ohjeen YVL E.4 luvussa 5 käsitellään jännitysanalyysia. Jännitysanalyysista esitetyt ohjeen YVL E.4 vaatimukset liittyvät yhdysvaltalaisen ASME III -painelaitestandardin artiklassa NB 3200 kuvattuun suunnittelumenettelyyn "design by analysis". Tässä menettelyssä tarkastellaan pääasiallisesti vaurioitumismekanismeja, joissa painelaitteen rakenne menettää kantokykynsä tai deformoituu liiallisesti voimakkaalla kerta-kuormituksella tai pysyviä muodonmuutoksia aiheuttavilla toistuvilla kuormituksilla tai väsy rakenteellisissa jännitysten keskittymäkohdissa. Rakenteelle lasketuista jännitystiloihin tunnistetaan edellä mainittujen vaurioitumismekanismien kehittymistä hallitsevat jännitystyyppit (primääriset, sekundääriset ja huippujännitykset) sekä tarkistetaan niiden yhdistettyjä vaikutuksia kuvaavien intensiteettien pysyminen sovellettavan standardin kullekin jännitystyyppille hyväksymissä rajoissa. Näissä tarkistuksissa kuormitustilanteelle määritelty vakavuus (kuormitukset on jaettu ryhmiin A, B, C ja D) ja turvamarginaalin perusteeksi valittu vaurioitumisen enimmäismäärä vaikuttavat hyväksymisrajojen suuruuteen ja siihen, minkä jännitysluokkien suhteen niissä pysyminen on kullekin kuormitustilanteelle tarkistettava.

"Design by analysis" -menettelyssä tarvittavien jännitystilojen laskemiseksi tehdään analysoitavasta rakenteesta ja sen fysikaalisista ominaisuuksista ensin yksityiskohtainen laskennallinen malli, mihin nykyisin lähes poikkeuksetta käytetään elementtimenetelmään (finite element method, FEM) perustuvia tietokoneohjelmia. Kuormitukset tuodaan tähän malliin lähtötietoina, ellei samaa mallia käytetä myös kuormituksen tai sen ja rakenteen vasteen välisten kytkentöjen analysointiin (ajasta riippuvat termiset kuormat, neste-rakennevuorovaikutus). Jännitysten luokittelu edellyttää jännitystilojen laskennallista jälkikäsitelyä. Väsymistä aiheuttavista kuormituksista tunnistetaan niiden ajallista kulkua läpikäymällä hallitsevat jännitysjaksot lukumäärineen ja amplitudeineen.

Ohjeessa YVL E.4 on huomioitu, että kaikista painelaitetyypeistä on ohjeiston E-sarjassa omat ohjeet, YVL E.3 "Ydinlaitoksen painesäiliöt ja putkistot" ja E.8 "Ydinlaitoksen venttiilit", joissa esitetään vaatimuksia myös suunnittelusta. Näillä vaatimuksilla on tarkoitus kattaa eri laitetypille soveltuvat mitoitusmenettelyt laskentakaavoilla (design by rule) sekä ns. yksinkertaistetut jännitysanalyysit, joissa laitteen oletetaan vastaavan kyseisen laitetypin idealisoitua perusgeometriaa. Kysymys on lähinnä turvallisuusluokkaan 3 kuuluvista painelaitteista, joille hyväksyty tarkastuslaitos tekee

Säteilyturvakeskus

121/0002/2016

17.3.2020

viranomaistarkastukset ydinenergialain (990/1987) 60 a §:n mukaisesti. Tämä on otettu huomioon ohjeen YVL E.4 luvussa 9 tehdyssä viranomaisvalvonnan määrittelyssä. E-sarjan laiteohjeissa määritellään kyseisten painelaitetyyppien mitoittamiseen ja yksinkertaistettuihin analyysiin soveltuvat standardit. Kyseisten standardien soveltamisalaan kuulumattomissa poikkeavissa tilanteissa suunnitteluun edellytetään käytettävän ohjeen YVL E.4 mukaista yksityiskohtaista jännitysanalyysia. Myös ohjeen luvussa 4 mainittu kokeellinen jännitysanalyysi tulee tällöin kysymykseen. Näihin ratkaisuihin voi johtaa myös otaksuttua korkeammaksi osoittautuva laitteen riskimerkitys tai muu tekninen syy, kuten painelaitteen puutteellinen tarkastettavuus.

Soveltamisalasta edellä sanottu pätee myös pumppuja käsittelevälle ohjeelle YVL E.9 "Ydinlaitoksen pumput". Ydinvoimalaitoksella korkeapaineisten putkistojärjestelmien kuormituksille altistuvien pumppujen pesät suunnitellaan painelaitteiden tavoin, ja niiden yksityiskohtaiset jännitysanalyysit on tarkoituksenmukaista sisällyttää ohjeen YVL E.4 soveltamisalaan. Näin siitä huolimatta, että pumput kuuluvat EU-lainsäädännössä yleisesti konedirektiivin (eikä painelaitedirektiivin, PED) piiriin.

Ohjeen YVL E.4 mukaisissa jännitysanalyyseissa on säilytetty ensisijaisena viitestandardina ASME III. Sen vaatimukset perustuvat laajimpaan kokemukseen eri maiden ydinvoimalaitoksilta ja se kattaa hyvin eri käyttötiloihin soveltuvat turvallisuusperiaatteet. Relevantteja ovat nyt ASME III:n Code Class 1 -luokan komponentteihin tarkoitettut sekä edellä mainittuihin turvallisuusluokan 2 rakenteisiin soveltuvat osat (NB, NF, NG). Mahdollisuus hyväksyttää toisessa maassa hyväksytty muu vastaava standardi on ollut Olkiluoto 3 -projektissa tarpeen, ja tämä mahdollisuus on syytä säilyttää jatkossakin. Perustellusta syystä sovelluskohde voi olla suppeampikin, jopa yksittäinen laitehankinta. Painevesireaktorilaitoksen pääsekundääriputkistoille merkitsee edellä mainittu ASME-viittaus käytännössä suunnittelustandardin korkeimpien laatuvaatimusten täyttämistä, vaikka kyseiset painelaitteet kuuluvat turvallisuusluokkaan 2. Olkiluoto 3 -laitosyksiköllä tämä menettely on nähty yhtenä hyvänä teknisenä ja laadullisena perusteena LBB-periaatteen soveltamiseksi näille putkistoille. Jännitysanalyysin soveltamisalan määrittelyssä ohje YVL E.4 pyrkii ilmaisemaan, että täytettävien standardivaatimusten määrittelyssä on kysymys myös laadun suunnittelusta.

Huomiota on kiinnitetty muun muassa putkistojen läpivienneissä käytettäviin, painetta kantaviin ja samalla ankkuroinnista huolehtiviin muotokappaleisiin sekä standardin mukaisten muotokappaleiden mitoittamiseen suunnittelukuormilla, koska tähän sovelletut, artiklan ASME III NB 3132 viittaamat mittastandardit eivät STUKin käsityksen mukaan määrittele ainevahvuuksia riittävästi.

Pinnoitteen väsymistarkastelu on tehtävä vain, kun se on otettu huomioon rakenteen mallinnuksessa eli käytännössä kun sen paksuus on vähintään 10 % kokonaisuunämnänpaksuudesta. Termisen kuormituksen mallinnuksessa on meneteltävä vastaavasti. Ympäristövaikutuksen huomioon ottaminen väsymisanalyysissa on osoittautunut haasteelliseksi. Teknisenä perusteluna on kuitenkin eri maissa tehtyjen väsytykokeiden laaja havaintoaineisto. Useissa maissa viranomaiskäytännöksi on vakiintunut, että ympäristövaikutus on otettava huomioon uusilla laitoksilla ja laitosten käyttökäytä jatkettaessa sekä esiintyviä väsymisvaurioita arvioitaessa. Ympäristövaikutteen väsymisanalyysi on ohjeessa YVL E.4 vaatimuksena, ja ensisijaisena menettelynä viitataan Yhdysvaltojen valvontaviranomaisen NRC:n julkaisemaan ohjeeseen Regulatory Guide (RG) 1.207. Toimintakyvyn varmistamiseksi asetetussa

vaatimuksessa ohje YVL E.4 erottaa Olkiluoto 3 -laitoshankkeessa omaksutun soveltamiskäytännön mukaisesti aktiivisen toimintakyvyn (ryhmän B hyväksymisrajat) ja passiivisen toimintakyvyn (ryhmän C hyväksymisrajat). Vaatimus aktiivisen toimintakyvyn säilymisestä on perusteltu lähtökohta, sillä onnettomuuden jälkihoito saattaa kestää kauan, mikä tuli selväksi Fukushima ydinvoimalaitosonnettomuudessa. Näitä vaatimuksia ei kuitenkaan tarvitse täyttää turvallisuusjärjestelmän yhteen osajärjestelmään rajoitettaville kuormituksille, jos tätä osajärjestelmää ei tarvita ennen laitoksen saattamista turvalliseen tilaan ja kyseisten laitteiden mahdollisessa uudelleen käyttöön otossa varmistetaan asianmukaisesti niiden käyttökuntoisuudesta. Suuren liikennelentokoneen törmäyksen aiheuttamaa kuormitusta on tarkasteltava Säteilyturvakeskuksen määräyksen STUK Y/1/2018 2 §:n mukaisena oletetun onnettomuuden laajenuksena parhaan arvion menetelmillä (vaatimustasona ryhmän C mukaiset hyväksymisrajat, jos toiminnallisuus vaaditaan, muuten ryhmän D hyväksymisrajat).

Jännitysanalyyseissä laadun ohjauksessa ovat vaatimukset lujuusanalyyseraportin esitettävistä osoittautuneet hyödyllisiksi. Ohjeessa YVL E.4 luvun 3.3 tavoitteena on riittävä vaatimustaso. Tyypillinen esimerkki on lasketun jännitysjakauman esittäminen niin yksityiskohtaisesti, että poikkileikkausten valinta sekundäärijännitysten ja väsymisen tarkasteluun voidaan todeta oikeaksi. Jännitysanalyyseistä esitettäviin erityisiin tietoihin kuuluu laadunvarmistuksen osalta toimittajien ja hankkijoiden hyväksymismerkinnät. Tällä vaatimuksella tavoitellaan luotettavien tietojen saamista laadunvarmistuksesta ja hyväksynnöistä sellaisessakin tapauksessa, että kyseinen selvitys on alun perin tarkoitettu toimitettavaksi muuhun hankkeeseen, jossa tietojen luovutusta kolmannelle osapuolelle on rajoitettu.

2.2 Haurasmurtuma-analyysi

Ohjeen YVL E.4 luvussa 6 käsitellään haurasmurtuma-analyysejä. Haurasmurtumalla tarkoitetaan metallisessa rakenteessa vetojännityksen alaisena, ilman olennaista pysyvää muodonmuutosta tapahtuvaa nopeaa särön kasvua. Tällainen murtuma voi edetä rakenteessa aina täydelliseen murtumaan asti hyödyntämällä kasvusta vapautuvaa elastista energiaa kasvu-uralla, jolla vastus tälle murtumismekanismille on kiderakenteen perusteella vähäisin. Ferriittisiä teräksiä altistaa haurasmurtumalle niille ominainen muodonmuutoskyky ja murtumissitkeyden olennainen heikkeneminen lämpötilan laskiessa ns. transiioalueelle. Ydinvoimalaitoksen reaktoripainesäiliössä (RPS) tätä mahdollisuutta kasvattaa käytön aikana transiio-alueen nousu eli säteilysiirtymä, joka johtuu RPS:n seinämään osuvien nopeiden neutronien aiheuttamasta kiderakenteen muutoksesta. Todellinen uhka edellyttäisi, että säteilyhaurastuneessa kohdassa on jo merkittävän kokoinen särö ja seinämä joko jäähtyy nopeasti transiio-alueelle hätäjäähdytystilanteessa tai tällainen jäähtyminen on jo tapahtunut kylmäseisokkien aikana ja RPS jostakin syystä pääsee paineistumaan. Austeniittisissa valuteräksissä taas voi käyttökokemusten mukaan ilmetä ajan mittaan ns. termistä haurastumista primääripiirin käyttölämpötiloissa. Sitkeyttä alentavat käytännössä muutkin tekijät, kuten painelaitteen suuri koko tai kuormituksen aiheuttama suuri venymänopeus.

Loviisan ydinvoimalaitoksella tehtiin käytön alkuvuosina laajoja parannustoimenpiteitä odotettua nopeammaksi osoittautuneen säteilyhaurastumisen hallitsemiseksi. Tälle mekaniikalle suurempien materiaaliepäpuhtauksiensa vuoksi enemmän altistuvan 1-yksikön RPS palautettiin vuonna 1996 onnistuneella elvytyskehikutuksella lähelle

Säteilyturvakeskus

121/0002/2016

17.3.2020

alkutilaansa. Reaktoripainesäiliöiden käytön jatkamisedellytykset on määrävuosin selvitetty turvallisuusarvioinneilla, jotka ovat olennaisesti perustuneet murtumismekanikan menetelmillä tehtyihin haurasmurtuma-analyysihin ja niitä varmentavaan tutkimusohjelmaan (ns. surveillance-ohjelma). Tarvittavia murtumissitkeysarvoja on määritetty VTT:n kehittämällä, ASTM E-1921 standardina laajasti tunnetulla ns. master-käyrä-menetelmällä. Haurasmurtuma-analyysin tekemiseen jännitysanalyysista erotettuna omana lujuusanalyysityypinään on vaikuttanut soveltamisalojen ja menetelmien erilaisuus sekä se, että jännitysanalyysilla selvitettyt jännitystilat ovat haurasmurtuma-analyysin lähtötietoja.

Tärkeimpänä huomion kohteena Loviisan laitoksella on 1-yksikön RPS:n uudelleen-haurastumisen nopeus sekä kysymys siitä, tullaanko elvytysheikutusta tarvitsemaan 2-yksiköllä. Säteilyhaurastumisen hallinta on organisoitu osaksi koko laitoksen käyttöiän hallintaa ja sitä koskevat turvallisuusarviot tullaan antamaan koko laitoksen määräaikaisten turvallisuusarviointien yhteydessä. Olkiluoto 1 - ja 2 -yksiköillä säteilyhaurastuminen ei ole ollut alun perinkään ongelma, koska RPS:n suunnittelupaine on matala ja sisäpuolelle ulottuva pääkiertopumppuratkaisu kasvattaa seinämän etäisyyttä reaktorisydäimestä, jolloin väliin jäävä vesitila alentaa tärkeimpien hitsausliitosten saamaa nopeiden neutronien annosta. Olkiluoto 3 -rakentamishankkeen kokemusten perusteella on myös ilmeistä, että säteilyhaurastuminen hallitaan uusien laitosten suunnittelussa aiempaa paremmin. Parantuneet valmistusmenetelmät ovat alentaneet painesäiliöterästen epäpuhtauksia, ja PWR-laitoksilla vesivälin optimointi ei ole enää logistinen, vaan pikemminkin suurten takeiden asettamiin valmistustekniikkiin vaatimuksiin liittyvä kysymys. Olkiluoto 3:lla reaktoripainesäiliön seinämää suojataan lisäksi polttoainenippuja ympäröivällä raskaalla heijastimella, eikä reaktorisydämen kohdalla sijaitse vaipan muodostavien rengasmaisten takeiden välisiä hitsausliitoksia. Merkittävimmäksi seurantakohteeksi onkin osoittautumassa mahdollisuus termiseen haurastumiseen RPS:n ja pääkiertoputkiston välisessä eripariliitoksessa. Käyville laitoksilla termiseen haurastumiseen varautumista ovat lisäämässä hankkeet laitosten käyttöiän pidentämiseksi alun perin suunnitellusta.

Ohje YVL E.4 vaatii RPS:n haurasmurtuma-analyysista, että todennäköisyysperusteinen analyysi on tehtävä, kun haurasmurtuman riskiä ei voida päätellä häiriö- ja onnettomuustilanteille tehdyn deterministisen analyysin perusteella merkityksettömän pieneksi. Deterministisessä tarkastelussa vaatimustaso vastaa edelleen ohjetta RG 1.154, vaikka Yhdysvalloissa NRC on poistanut sen vuonna 2011 käytöstä teknisesti vanhentuneena ja tarpeettoman konservatiivisena. Todettuaan haurasmurtumariskin osoittautuneen käytössä olevilla USA:n laitoksilla aiemmin luultua pienemmäksi NRC pitää nyt riittävänä painekokeiden, normaalikäytön ja odotettavissa olevien käyttöhäiriöiden suhteen määriteltyjä minimilämpötiloja, joihin sisältyy marginaali ASME III - ja ASTM E 208 -standardien mukaisesti määritettyyn referenssilämpötilaan. Uusilla laitoksilla kasvavat seinämänpaksuudet ovat kuitenkin haurasmurtuman kannalta epäedullinen tekijä, jota Suomen olosuhteissa vielä korostaa laitostemme hätäjäähdytysvesien alempi lämpötila. RG 1.154:n tarkastelutavassa STUK näkee edelleen etuna laitosten tapahtumaketjujen, myös onnettomuustilanteiden, järjestelmälliseen läpikäyntiin perustuvan murtumismekaanisen analyysin, joiden tekemisessä Suomessa on saavutettu korkea osaamistaso. Sitkeysarvojen tarkistamisessakaan STUK ei luovu master-käyrän käytöstä.

Nopea murtuminen voi olla mahdollista myös hauras-sitkeä-transitiota korkeammissa lämpötiloissa ns. ylätasannealueella, jos murtumissitkeyden arvot laskevat siinä merkittävästi ikääntymisen tai puutteelliseksi osoittautuvan valmistusmenetelmän seurauksena. Yhdysvaltojen laitoksilla tällaisena huolena ovat olleet eräiden jauhekaarihitsien matalat sitkeysarvot. Säröytyneellä sitkeällä materiaalilla nopea murtuma voi tapahtua sitkeällä repeämismekanismeilla (ductile tearing) esimerkiksi häiriö- tai onnettomuustilanteissa, joissa paksuseinämäiseen rakenteeseen kohdistuu korkeassa paineessa nopea jäähtytys. Olkiluoto 3 -projektissa tämä otettiin lähtökohdaksi vaadittaessa ranskalaisen RCC-M -standardin mukaista nopean murtuman tarkastelua lämpötiloissa, jotka ylittävät haurasmurtuman tarkastelemiseksi asetetun lämpötilakriteerin. Hauraan ja sitkeän mekanismin välisessä siirtymäalueessa edellytettiin tarkastelu kummankin mekanismin suhteen. Ohjeessa YVL E.4 käsitellään sitkeän murtuman mahdollisuutta haurasmurtumaa käsittelevän luvun 6 lopussa olevassa alaluvussa ”Muut nopean murtuman tarkastelut”. Käytettävät menettelyt ja kriteerit on hyväksyttävä STUKilla, koska tässä vaiheessa sitkeän murtuman analysointia koskevien täsmennettyjen murtumismekaanisten vaatimusten esittäminen edellyttää kehitystyötä. Putkistojen osalta huomioon on otettava ne vaatimukset, joita ohjeen luvussa 7 esitetään seinämän jo läpäisseiden säröjen LBB-analysista. Nämä vaatimukset koskevat suunnitteluvaihetta. Käytön aikana sitkeällä alueella tapahtuva sitkeysarvojen tarkkailu kuuluu ohjeen YVL A.8 ”Ydinlaitoksen ikääntymisen hallinta” mukaiseen ikääntymisen hallintaan, jossa jatkossa on entistä monipuolisemmin kiinnitettävä huomiota sitkeysarvoja alentaviin eri mekanismeihin.

Haurasmurtuma-analyyseihin, samoin kuin luvussa 7 käsiteltävien ”vuoto ennen murtumaa” -analyyseihin valvontaa käsittelevästä myös näihin analyyseihin liittyvät kokeelliset selvitykset. Turvallisuusmerkitystä on erityisesti materiaalien ja hitsausliitosten murtumismekaanisten ominaisuuksien testauksilla, joita tehdään normaalia valmistuksen laadunvalvontaa täydentävillä, usein laajoilla ja pitkäkestoisilla koeohjelmilla.

Päivityksessä vaatimukseen 611 ja 612 esitetään lisättäväksi oletettuja vikoja määrittävä täsmennys *sekä sisä- että ulkopintaan avautuvia*. Tämä ei muuta vaatimustasoa, sillä sisäisten vikojen lisäksi on pintasäröjen oletaminen ollut käytäntönä myös nykyisessä ohjeessa, mutta oletettujen säröjen ominaisuudet on nyt määritelty viitatussa aineistossa ”ASME III appendix G”. Päivitettävässä ohjeessa tärkeä säröä määrittävä ominaisuus on asian selkeyttämiseksi nostettu itse ohjeeseen. Muut oletettuja säröjä määrittävät ominaisuudet on edelleen tarkistettava em. viitteestä. Sekaannusten välttämiseksi tämä tärkeä säröä määrittävä ominaisuus halutaan nostaa itse ohjeeseen.

2.3 Vuoto ennen murtumaa -analyysi

Ohjeen YVL E.4 luvussa 7 käsitellään ”vuoto ennen murtumaa” -analyysia. Fysikaalisena käsitteenä LBB tarkoittaa vioittuneen putkiston sellaista käyttäytymistä, jossa täydellinen murtuminen (katkeaminen) ei ole mahdollista, koska vika joka tapauksessa kasvaisi seinämän läpi hyvin lyhyeltä matkalta ja ehditään havaita sen kautta tulevasta vuodosta. Saksassa kehitetty ”Break Preclusion” (BP) -turvallisuusperiaate tähtää uuden laitoksen suunnitteluun ja sisältää parannettuja teknisiä ja organisatorisia menettelyjä, joiden perusteella katkeamisen mahdollisuus uskotaan tulevan eliminoiduksi ja sitä kautta luodaan edellytykset LBB-käyttäytymiselle ja sen laskennalliselle osoittamiselle. Saksassa BP:n vaikutukset putkikatkoihin varautumista

Säteilyturvakeskus

121/0002/2016

17.3.2020

koskevaan laitoksen suunnitteluperustaan on ohjeistettu yksityiskohtaisesti. Yhdysvalloissa NRC:n ohje SRP 3.6.3 esittää LBB:n samoin laajana turvallisuusperiaatteena, mutta lähinnä käytössä olevien laitosten suunnitteluperusteiden muuttamiseksi niin, että pääkiertoputken katkosta tuleviin iskuihin ei tarvitsisi varautua. Alkuperäisten standardivaatimusten mukaan rakennettujen komponenttien laadun ja kunnon riittävyys sekä käyttökokemukset on tällöin ensin arvioitava, ettei katkeamisen riskin aiheuttavia mekanismeja ole ja että LBB:n soveltamiselle on edellytykset. LBB-käyttötymisen osoittaminen perustuu materiaalien murtumisominaisuuksien tarkempaan analysointiin sekä vuodon havaitsemiselle ja vuotavan särön kriittiselle koolle asetettuihin konservatiivisiin varmuuskertoimiin, saksalaisessa laskentamenettelyssä taas painotetaan enemmän vuotoa edeltävää väsymissärön kasvua läpi seinämän. Vaikutukset laitoksen suunnitteluperustaan ovat Yhdysvalloissa liittyneet putki-iskuihin ja murtumatukien poisjättämiseen. Turvallisuusjärjestelmien mitoittamiseen liittyviä helpotuksia NRC on kehittänyt mm. hankkeessa "Large Break LOCA Redefinition" saamatta näille kuitenkaan laajaa kansainvälistä hyväksyntää.

Suomessa LBB tuli kansallisen ydinturvallisuustutkimusohjelman aiheeksi jo 1980-luvulla ja siitä tehtiin täysimittakaavaisia kokeita käytöstä poistetuilla konventionaalisilla painesäiliöillä. Viranomaisvalvonnan käytäntöihimme soveltuvat menettelyt määritettiin jo vuonna 2002 julkaistussa ohjeessa YVL 3.5 "Ydinvoimalaitoksen painelaitteiden lujuuden varmistaminen" muotoilemalla LBB laitoksen rakentamislupakäsittelyyn ja yleiseen putkikatkoihin varautumiseen kytketyksi, STUKin erillisen hyväksynnän vaativaksi turvallisuusasiaksi. Olkiluoto 3 -laitoksella LBB-periaate on toteutettu yhdistettynä erityiseen syvyyspuolustusstrategiaan, johon kuuluvat myös murtumatuet. Käyville laitoksilla LBB:tä on käytetty normaalia vikojen arviointia syvyyspuolustuksellisesti täydentävänä lisäperusteluna tilanteissa, joissa vian arviointiin on liittynyt poikkeuksellisia epävarmuustekijöitä.

Ohje YVL E.4 keskittyy teknisiin menettelyihin ja sen lähtökohtana ovat vakiintuneet kansainväliset käytännöt. Ohjeen luvun 7 vaatimukset on tarkoitettu sovellettavaksi sekä saksalaisen BP-periaatteen että yhdysvaltalaisen LBB-periaatteen mukaisiin laitoshankkeisiin. BP:n edellyttämät turvallisuusparannukset, jotka ovat relevantteja saksalaisen käytännön mukaisesti rakennettavalle uudelle laitokselle, ovat luvussa 7.5. Luvun 7.6 vaatimukset soveltuvat katkeamismekanismien poissulkemiseen silloinkin, kun sovelletaan yhdysvaltalaista LBB-konseptia. Mekanismit on esitetty periaatteellisella tasolla (rakennetta vioittavat, materiaalin ominaisuuksia heikentävät, kuormankantokyvyn ylittävät), koska uusia mekanismeja voi ilmaantua ja käsitys jo tunnettujen mekanismien riskimerkityksestä voi muuttua. Varoittavana esimerkkinä tästä on yleistynyt jännityskorroosiosäröily PWR-laitoksen primääripiirin olosuhteissa (PWSCC), jopa LBB-hyväksynnän saaneilla laitoksilla. Luvussa 7.7 analyysimenetelmien vaatimustasona on parhaat piirteet sisältävä yhdistelmä kummastakin edellä mainitusta käytännöstä siten, kuin niitä Olkiluoto 3 -laitosyksikölle on sovellettu. Läpäsäröjä koskeva kappale painottaa yhdysvaltalaista ja pintasäröjä koskeva saksalaista menettelyä. Edellisessä on tehty mahdolliseksi eräät hyväksyttävän tuloksen saamista helpottavat laskennalliset oletukset (kriittisen särökoon määrittely, parannettu vuotojen valvonta), joiden oikeellisuudesta on varmistuttava kokeellisesti.

BP- ja LBB-sovellusten vaikutuksia laitoksen suunnitteluperustaan on ohjeessa YVL E.4 voitu käsitellä vain putki-iskujen kannalta. Tavoitteena on, että uuden ydinvoimalaitoksen primääripiirin rakentamisessa toteutetaan BP-turvallisuusperiaatteen

Säteilyturvakeskus

121/0002/2016

17.3.2020

mukaisia, vaatimuksen 710 mukaisia rakenteellisia parannuksia suunnittelustandardien mukaisiin hyviin käytäntöihin nähden siinäkin tapauksessa, että LBB-käyttäytymistä ei osoiteta luvun 7.7 mukaisilla analyyseilla. Putkikatkoista johtuvat iskut ovat tällöin suunnitteluperusteena vaatimuksen 705 mukaisesti. Niiden dynaamiset vaikutukset on analysoitava ja ensisijaisena suojauskeinona on murtumatukien asentaminen. LBB:hen liittyvät materiaalitutkimukset sekä LBB-analyyseihin kytketyt vuotojen valvonnan ja määräaikaistarkastusten erityisvaatimukset ovat tällöin tarpeettomia. Jos taas LBB-käyttäytyminen osoitetaan vaatimuksen 707 mukaisesti putki-iskut eivät ole enää suunnittelun perusteena. Iskuista johtuvien primääripiirin painettransienttien huomiointi suunnittelun laajenuksena käsitellään ohjeessa YVL B.5 ”Ydinvoimalaitoksen primääripiiri” samoin kuin putkikatkojen muiden fysikaalisten vaikutusten huomioon ottaminen primääripiirin suunnittelussa.

2.4 Laadunhallinta

Ohjeen E.4 luvussa 8 käsitellään lujuusanalyysien laadunhallintaa. Lujuusanalyysien viranomaisvalvonta on perinteisesti perustunut näistä analyyseista toimitettavien raporttien tarkastamiseen. Numeeristen analyysimenetelmien ja tietotekniikan kehityksessä on tarkastuksille muodostunut haasteeksi lujuus- ja kuormitusanalyysien jatkuva laajeneminen ja niiden aiempaa rutiininomaisempi tuottaminen.

Olkiluoto 3 -projektissa lujuusteknisen laadunhallinnan merkitystä ovat korostaneet monikansalliselle hankkeelle ominaiset pitkät hankintaketjut ja eri suunnitteluvaiheiden väliset rajapinnat sekä tarve sovittaa yhteen erilaisia suunnittelukäytäntöjä ja teknisiä valmiuksia kiireisellä aikataululla. Tässä kehityksessä luvanhaltijan toimintaympäristö on monipuolistunut kattaen lujuusanalyysien toimittajien arviointeja ja valvontaa, analyyssien hankintoja ja tarkastuksia sekä jossain määrin myös omassa lujuuslaskentayksikössä tehtäviä tarkistuslaskelmia ja analyyseja. STUK puolestaan on asiakirjatarkastuksia täydentävällä, projektityöskentelyn muodossa toteutetulla lujuusanalyysitoiminnan valvonnalla voinut ennalta varmistua siitä, että suunnittelu on laadukasta ja kaikki turvallisuusmääräykset pystytään alun perin vaaditusta aikataulusta myöhästyneenäkin toimitettavissa lujuusanalyyseissa täyttämään. Tulevissa projekteissa tämän toiminnan osuus kasvaa ja siirtynee projektin aikaisempaan vaiheeseen, jos laitoksen suunnittelun valmiusaste rakentamislupavaiheessa on korkeampi.

Vuonna 2013 julkaistu ohje YVL E.4 sekä sen nykyinen päivitys jatkaa samalla linjalla ottaen huomioon laadunhallintaa koskevissa käytännöissä ja viitestandardeissa tapahtuneet muutokset. Lujuusanalyysien projektinhallinnalla voi olla merkitystä koko laitoshankkeen edistymiselle, koska jatkossakin STUK näkee tarpeelliseksi niiden toimittamisen jo painelaitteen rakennesuunnitelman yhteydessä eli ennen valmistuksen aloittamista. Suorittamista tarkastuksista luvanhaltijan on liitettävä mukaan kirjallinen yhteenveto toimittaessaan lujuusanalyyseja STUKille, ja vertailulaskelmia on tarvittaessa teetettävä näiden tarkastusten tueksi, kuitenkin niin, että STUKilla sama mahdollisuus edelleen säilyy. Tällä menettelyllä hyödynnetään luvanhaltijalla oleva kokonaiskuva laitteen käyttöpaikan asettamista teknisistä vaatimuksista sekä vähennetään riskiä, että lujuusanalyysien ja niiden päivitysten yksityiskohtaiset viranomais-tarkastukset muodostuvat pullonkaulaksi nopeammin läpi vietävissä laitoshankkeissa.

Ohjeen YVL A.3 "Turvallisuuden johtaminen ydinalalla" mukaisesti yleinen johtamisjärjestelmä muodostaa luontevan perustan, ei vain luvanhaltijan, vaan myös laitostoi-
mittajan toiminnalle varmistamaan vastaavien laatuperiaatteiden noudattamista sen
mahdollisissa erillisissä suunnittelutoimintaa harjoittavissa tuotantoyksiköissä. Johta-
misjärjestelmien osalta viitataan ohjeeseen YVL A.3.

Lujuusanalyysien laadunhallintaa käsittelevässä vaatimuksessa 801 esitetään laa-
dunhallintajärjestelmän uudeksi referenssiksi ohjetta YVL A.3, johon muiden ohjeiden
tulee tukeutua. Ohjeen YVL E.4 vaatimus suunnitteluorganisaation ASME NQA-1-
2008 sertifioidusta laatujärjestelmästä ei vastaa yleistä YVL-ohjeiden linjaa, joka hy-
väksyy vaihtoehtoisiaakin osoitustapoja, jos näin voidaan katsoa saavutettavan vas-
taava turvallisuustaso.

3 Ohjeen alaa koskeva kansainvälinen säännöstö

Länsi-Euroopan maiden ydinturvallisuusvalvonnan menettelyjä harmonisoimaan pe-
rustettu kansallisten ydinturvallisuuden valvontaviranomaisten yhteiselin WENRA
(Western European Nuclear Regulators' Association) on julkaissut suosituksiaan tam-
mikuussa 2008 ns. referenssitasona PS/7.1.2010.

Painelaitteiden lujuusanalyysija koskevana ja alalla vakiintuneisiin standardeihin pe-
rustuvana erityisohjeena YVL E.4 ei pyri siteeraamaan WENRAn vaatimuksia sellai-
senaan. Useat ohjeen YVL E.4 vaatimukset kuitenkin täsmentävät WENRAn yleisem-
piä vaatimuksia ja huolehtivat niiden täyttymistä lujuustekniikan kannalta.

Vastaava arvio on tehty myös siitä, miten ohje YVL E.4 vastaa kansainvälisen ato-
mienergiajärjestön IAEA:n ohjeessa SSR-2/1 ydinvoimalaitosten suunnittelulle asetta-
mia erityisiä turvallisuusvaatimuksia. Lujuustekniikan kannalta ohje YVL E.4 täyttää
yli 20 IAEA:n asettamaa turvallisuuskriteeriä, joiden aiheena ovat muun muassa ul-
koiset uhat, käyttötilojen ja kuormitusten ryhmittely, toiminnallisuus, paine- ja lämpöti-
larajat, säteilyhaurastuminen, painelaitteiden sisäosat, läpiviennit, väsyminen, laa-
dun- ja projektinhallinta, rajapinnat sekä vakiintuneet käytännöt.

Ohjeessa YVL E.4 on turvallisuusluokassa 1 asetettu ensisijaiseksi suunnittelustan-
dardiksi "ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III", joka on erityisesti
ydinvoimalaitoksen komponenteille tarkoitettu standardi. Valmistuksen valvonnassa
ASMEn mukainen käytäntö, jossa yritys vastaa itse esim. henkilöpätevoineistä ja
valvontaa tekee valtuutettu tarkastaja, ei kuitenkaan ole sellaisenaan hyväksytty,
vaan perusvaatimuksena on STUKin oma valvonta ja tarkastukset.

4 Tepco Fukushima Dai-ichi onnettomuuden vaikutukset

Japanissa Fukushima Dai-ichin ydinvoimalaitoksella 11.3.2011 tapahtuneen ydinvoi-
malaitosonnettomuuden johdosta tehdyssä YVL-ohjeiston uudistuksen arvioinnissa ei
ole tunnistettu ohjeeseen YVL E.4 kohdistuvia muutostarpeita. Ohjeen YVL E.4 mu-
kaisen vaatimustason toteuttamisella tulee olemaan merkitystä siihen, miten ulkoiset
uhat vaikuttavat ydinvoimalaitoksen mekaanisiin rakenteisiin ja laitteisiin sekä niiden
eheydestä riippuviin turvallisuustoimintoihin. Japanissa 16.7.2007 sattuneen edellisen
suuren maanjäristyksen vaikutukset Kashiwazaki-Kariwan ydinvoimalaitoksen me-
kaanisiin rakenteisiin osoittautuivat vähäisiksi suunnitteluperusteiden merkittävästä

Säteilyturvakeskus

121/0002/2016

17.3.2020

ylittymisestä huolimatta, mitä jälkikäteen tehdyissä analyyseissa voitiin selittää lujuusteknisessä suunnittelussa tehdyillä konservatiivisilla oletuksilla.

Ulkoiset uhat tulevat ohjeessa YVL E.4 huomioiduiksi sen soveltamisalaan kuuluvissa lujuusanalyyseissa tarkasteltavina kuormituksina. Tällaisen kuormitusten aiheuttajiksi on suunnitteluperusteena oletettu maanjäristys sekä suunnittelun laajenuksena suuren liikennelentokoneen törmäyksen aiheuttama värähtely ja paineaalto. Nämä välittyvät painelaitteisiin niiden tuentojen ja yhteiden tärinäinä ja voimavaikutuksina, jotka selvitetään rakennusten ja laitekokonaisuuksien dynaamisilla analyyseilla. Dynaamisessa analyysissä edelleen selvitetään värähteleviin rakenteisiin tai painelaitteisiin kiinnitettyjen, turvallisuustoimintojen kannalta tärkeiden laitteiden kokemat kiihtyvyydet ja kiinnitysten rasitukset, joiden hyväksyttävyyttä sitten arvioidaan vertaamalla niitä laitteiden seismisessä kelpoisuudessa tai tyyppitestaustuksissa määriteltyihin raja-arvoihin.

Painelaitteen ja sen tuentojen lujuuden riittävyys edellä mainituissa kuormitustilanteissa tulee tarkistettavaksi ohjeen YVL E.4 mukaisessa jännitysanalyysissä. Primääripiirin kannatinrakenteiden hyväksymisrajat täyttämällä varmistetaan, ettei vaurioketju laajene maanjäristys- tai lentokonetörmäystilanteessa pääkomponenttien tukien tai niiden rakennuksiin ankkurointien pettäessä. Turvallisuusjärjestelmien luotettavaa toimintaa varmistetaan niiden toimintakyvylle asetetuilla vaatimuksilla. Plastiset muodonmuutokset rajoitetaan niin, etteivät vaadittavat virtauspoikkipinta-alat olennaisesti pienene (passiivinen toimintakyky) eivätkä toiminnallisten laitteiden (pumput, venttiilit) aktiivisiin turvallisuustoimintoihin tarvittavat sisäosien liikkeet vaarannu. Asetettavilla ryhmän B hyväksymisrajoilla maanjäristykset rinnastuvat näiden laitteiden elinikälaskelelmien perusteena oleviin kuormituksiin, mikä rakenteellisesti takaa turvallisuustoiminnon luotettavan pitkäaikaisen käytettävyyden esimerkiksi jälkilämmön poistotilanteissa. Suunnittelun laajenuksena tarkasteltavassa onnettomuudessa vastaavaan pyritään parhaan arvion menetelmillä. Vakavat reaktorionnettomuudet käsitellään muissa YVL-ohjeissa. Suojarakennuksen tiiviyttä varmistavien tärkeimpien läpiviennin jännitysanalyysit käsitellään ohjeessa YVL E.4. Muut läpiviennit käsitellään ohjeessa E.6 "Ydinlaitoksen rakennukset ja rakenteet".

Lisävarmuutta primääripiirin ehjänä säilymiseen mainituissa kuormitustilanteissa antavat ohjeen YVL E.4 vaatimusten perusteella tehtävät nopean murtuman ja LBB-periaatteen tarkastelut siinäkin tapauksessa, että päälaitteisiin olisi tullut huomattava, jopa seinämän läpi ulottuva särö. Nämä analyysit tehdään suunnittelumaanjäristyksen kattavilla kuormitusetuksilla ja ne antavat siten marginaalia särön etenemiseen täydelliseksi murtumaksi kyseisessä tilanteessa. LBB-periaatteen liittyvä "Break Preclusion" -periaate sisältää sekä teknisiä ratkaisuja että organisatorisia menettelyjä, joilla päälaitteiden luotettavuus paranee ja suuriin säröihin johtavat vaurioitumismekanismit estetään ennalta.

Suomen käytössä olevilla laitoksilla LBB-periaatetta ei ole sovellettu, vaan suunnitteluperusteena ovat primääripiirin putkien täysimittaiset katkot. Niiden varalta rakennetuilla murtumatuilla ja suihkusuojuilla on suojaava vaikutus myös muissa dynaamisia kuormituksia aiheuttavissa onnettomuustilanteissa. Tätä suunnitteluperustaa ei pois suljeta siinä LBB-analyyseissä ohjeistuksessa, jota ohje YVL E.4 on ehdottamassa uusille laitoksille. Olkiluoto 3 -yksiköllä toteutettava syvyyspuolustusstrategia käsittää sekä LBB-analyysejä että putkikatkoilta suojaavat rakenteet.

Säteilyturvakeskus

121/0002/2016

17.3.2020

Edellä käsitellyssä onnettomuustilanteisiin varautumisessa ohje YVL E.4 asettaa riittävän rakenteellisen turvallisuuden tuottavat lujustechniset menettelyt ja hyväksymiskriteerit. Niiden soveltamiseen tarvittavat lähtötiedot onnettomuustilanteiden kulusta määrittyvät muiden YVL-ohjeiden vaatimuksilla.

5 Päivityksessä huomioidut muutostarpeet

Vaatimuksia päivitettäessä on tarkasteltu kansainvälisten ja kotimaisten laki / säännösmuutosten aiheuttamia muutostarpeita sekä YVL-ohjeiden täytäntöönpanopäätösten laadinnan (SYLVI) yhteydessä esille tulleita ja muita STUKin muutosehdotustietokantaan kirjattuja muutosehdotuksia. Lisäksi on tarkasteltu myös ns. hallinnollisen taakan keventämismahdollisuuksia.

Muutokset vaatimuksessa 801 helpottavat luvanhaltijan toimintaa ja saattavat pienentää hallinnollista taakkaa. Esitetyllä muutoksella ohje YVL E.4 noudattaa laadunhallinnan osalta samoja käytäntöjä kuin muutkin E-sarjan ohjeet. Muita hallinnollisen taakan keventämismahdollisuuksia ei ohjeen vaatimuksissa ole.

Määräykseen STUK Y/1/2018 kohdistuvat säännöstyöviittaukset on päivitetty. Viiteluettelossa on ASME painelaitestandeista jätetty muissa YVL-ohjeissa sovelletun linjan mukaisesti standardin julkaisuvuosi pois. Mahdollisissa tulevilla rakennusprojekteissa voidaan kuitenkin hyväksyttäväksi käytettäväksi tietty standardin versio kuten tehtiin esimerkiksi Olkiluoto 3 -projektissa. Samoin meneteltiin myös materiaalistandardeihin "ASTM E 1921" ja "ASTM E 1820" viitattaessa, joista myös on jätetty standardin julkaisuvuosi pois.

Viittauksia ohjeeseen YVL B.5 "Ydinvoimalaitoksen primääripiiri" on selkeytetty.