

YDINVOIMALAITOKSEN PAINELAITTEIDEN LUJUUDEN VARMISTAMINEN

1	YLEISTÄ	3
2	LUJUUDEN VARMISTAMINEN YDINVOIMALAITOKSEN LUPAMENETTELYN YHTEYDESSÄ	3
2.1	Yleistä	3
2.2	Rakentamislupa	4
2.2.1	Toimitettavat asiakirjat	4
2.2.2	Lujuuden varmistamisen periaatteet	4
2.2.3	Lujuusanalyysisuunnitelma	5
2.2.4	Järjestelmien kuormitustilanteet	6
2.2.5	Alustavat lujuusanalyysit	6
2.3	Käyttölupa	7
2.3.1	Toimitettavat asiakirjat	7
2.3.2	Lujuusanalyysien yhteenvetoraportti	7
2.3.3	Vuotojen ja murtumien todennäköisyydet	7
2.3.4	Lujuustekninen koeohjelma	8
2.3.5	Kuormitusten seurantaohjelma	8
3	PAINELAITTEEN RAKENNESUUNNITELMASSA ESITETTÄVÄT LUJUUSANALYYISIT	9
3.1	Yleiset vaatimukset lujuusanalyysiraportille	9
3.1.1	Sisältö ja tarkoitus	9
3.1.2	Toimitusajankohta	9
3.1.3	Esitystapa	9
3.1.4	Tarkasteltavat kuormitukset	10
3.2	Jännitysanalyysi	11
3.2.1	Yleistä	11
3.2.2	Soveltamisala	11
3.2.3	Rakenteen mallinnus	11
3.2.4	Kuormitusten mallinnus	13
3.2.5	Hyväksymisrajat	13
3.2.6	Väsymistarkastelu	14
3.2.7	Onnettomuustilanteet	15
3.3	Haurasmurtuma-analyysi	15
3.3.1	Soveltamisala	15
3.3.2	Analyysimenetelmät	15
3.3.3	Sitkeysarvot	15

jatkuu

Tämä ohje on voimassa 1.9.2002 alkaen toistaiseksi.

Ensimmäinen painos	ISBN 951-712-550-X (nid.)
Helsinki 2002	ISBN 951-712-551-8 (pdf)
Tummavuoren Kirjapaino Oy	ISBN 951-712-552-6 (html)
	ISSN 0783-2354

3.3.4	Säteilyaurastuminen	16
3.3.5	Eri lämpötiloissa sallittu paine	16
3.3.6	Häiriö- ja onnettomuustilanteet	16
3.3.7	Todennäköisyyspohjainen analyysi	16
4	LUJUUSTEKNINEN LAADUNHALLINTA	17
4.1	Laadunhallintajärjestelmä	17
4.2	Analyysimenetelmät	17
4.3	Lujuusanalyysirekisteri	17
5	VIITTEET	18
Liite: Hyväksymisrajoja turvallisuusluokan 1 painelaitteiden elastisiin jännitysanalyysiin		20

Valtuutusperusteet

Säteilyturvakeskus antaa ydinenergian käytön turvallisuutta, turva- ja valmiusjärjestelyjä sekä ydinmateriaalien valvontaa koskevat yksityiskohtaiset määräykset seuraavien lakien ja määräysten nojalla:

- ydinenergiain (990/1987) 55 §:n 2 momentin 3 kohta
- ydinvoimalaitosten turvallisuutta koskevan valtioneuvoston päätöksen (395/1991) 29 §
- ydinvoimalaitosten turvajärjestelyjä koskevan valtioneuvoston päätöksen (396/1991) 13 §
- ydinvoimalaitosten valmiusjärjestelyjä koskevan valtioneuvoston päätöksen (397/1991) 11 §
- ydinvoimalaitosten voimalaitosjätteiden loppusijoituksen turvallisuutta koskevan valtioneuvoston päätöksen (398/1991) 8 §
- käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen turvallisuutta koskevan valtioneuvoston päätöksen (478/1999) 30 §.

Soveltamissäännöt

YVL-ohjeen julkaiseminen ei sinänsä muuta Säteilyturvakeskuksen ennen ohjeen julkaisemista tekemiä päätöksiä. Vasta kuultuaan asianosaisia Säteilyturvakeskus antaa erillisen päätöksen siitä, miten uutta tai uusittua YVL-ohjetta sovelletaan käytössä tai rakenteilla oleviin ydinlaitoksiin ja luvanhaltijoiden toimintoihin. Uusiin ydinlaitoksiin ohjeita sovelletaan sellaisenaan.

Kun Säteilyturvakeskus harkitsee YVL-ohjeissa esitettyjen, uusien turvallisuusvaatimusten soveltamista käytössä tai rakenteilla oleviin ydinlaitoksiin, se ottaa huomioon valtioneuvoston päätöksen (395/1991) 27 §:ssä säädetyn periaatteen. Sen mukaan *turvallisuuden edelleen parantamiseksi on toteutettava sellaiset toimenpiteet, joita käyttökokemukset ja turvallisuustutkimukset sekä tieteen ja tekniikan kehitys huomioon ottaen voidaan pitää perusteltuina.*

Jos halutaan poiketa YVL-ohjeessa esitetyistä vaatimuksista, on Säteilyturvakeskukselle esitettävä muu hyväksyttävä menettelytapa tai ratkaisu, jolla saavutetaan YVL-ohjeessa esitetty turvallisuustaso.

1 Yleistä

Valtioneuvoston päätöksessä (395/1991) esitetään ydinvoimalaitoksen turvallisuutta koskevat yleiset määräykset. Näitä määräyksiä tämentävät turvallisuusperiaatteet esitetään ohjeessa YVL 1.0.

Ydinvoimalaitoksen primääripiirin ja suojarakennuksen sekä muiden tärkeiden laitteiden ja rakenteiden eheydellä on suuri merkitys ydin- ja säteilyturvallisuudelle. Valtioneuvoston päätöksen (395/1991) 16 §:n mukaisesti *ydinreaktorin primääripiiri on suunniteltava siten, että siihen kohdistuvat rasitukset alittavat riittäväällä varmuudella rakennemateriaaleille määritetyt nopeasti kasvavan murtuman estämiseksi tarkoitetut arvot normaaleissa käyttötilanteissa, odotettavissa olevissa käyttöhäiriöissä ja oletetuissa onnettomuuksissa. Myös muusta syystä aiheutuvan primääripiirin rikkoutumisen mahdollisuuden on oltava pieni. Saman päätöksen 17 §:n mukaisesti suojarakennus on suunniteltava siten, että se kestää luotettavasti odotettavissa olevien käyttöhäiriöiden ja oletettujen onnettomuuksien aiheuttamat paine- ja lämpötilakuormitukset, suihkuvoimat ja lentävien esineiden vaikutukset.* Päätöksessä annetaan myös määräyksiä vakavien reaktorionnettomuuksien huomioon ottamisesta suojarakennuksen suunnittelussa [1].

Tässä ohjeessa esitetään ydinvoimalaitoksen primääripiirin, teräksisen suojarakennuksen ja muiden turvallisuuden kannalta tärkeiden ydinteknisten painelaitteiden lujuusanalyseja ja käytön aikaista lujuuden varmistamista koskevia vaatimuksia. Lujuusanalyseilla tarkoitetaan tässä ohjeessa yleistä jännitysanalyysia, haurasmurtuma-analyysia ja mahdolliseen vuoto ennen murtumaa -periaatteen soveltamiseen liittyviä analyyseja. Vaatimuksia eri laitteiden perusmitoituksesta sekä laitetyyppikohtaisista jännitysanalyysimenettelyistä esitetään ohjeissa YVL 3.1, 3.3, 5.3, 5.4 ja 5.7. Betoniseen suojarakennukseen ja sen teräsosiin sovelletaan ohjeita YVL 4.1 ja 4.2. Maanjäristyksen huomioon ottamisesta ydinlaitoksissa on voimassa ohje YVL 2.6.

Lujuusanalyysit esitetään painelaitteiden rakennesuunnitelmissa ja niillä osoitetaan, että painelaite kestää suunnittelun perusteena olevat käyttö- ja onnettomuustilanteet riittäväällä turvamarginaalilla. Jännitysanalyysien kattavuus ja luotettavuus tarkistetaan koekäyttövaiheessa. Käytön aikana seurataan painelaitteiden kuormituksia sen varmistamiseksi, että toistuvat kuormitukset pysyvät jännitysanalyysin väsymistarkastelujen edellyttämässä rajoissa. Reaktoripainesäiliön säteilyhaurastumisen seuranta edellyttää ohjeen YVL 3.9 mukaisesti erityistä seurantaohjelmaa.

Ydinvoimalaitoksen käytön aikana painelaitteille tehdään määräaikaistarkastuksia rikkomat- tomilla aineenkoetusmenetelmillä. Määräaikaistarkastuksia ja niihin liittyviä vikanäyttämien lujuusanalyseja käsitellään ohjeessa YVL 3.8.

Säteilyturvakeskus (STUK) valvoo ydinlaitosten painelaitteita ja huolehtii erityisesti ydinenergia-asetuksen (161/1988) 117 §:n mukaisista tehtävistä. Valvontaa koskevat yleisohjeet annetaan ohjeessa YVL 3.0.

2 Lujuuden varmistaminen ydinvoimalaitoksen lupamenettelyn yhteydessä

2.1 Yleistä

Ydinvoimalaitoksen turvallisuudelle on ensiarvoisen tärkeätä, että sen painetta kantavat rakenteet ja laitteet, erityisesti primääripiirin osat, sekä suojarakennus kestävät suunnittelun perusteena olevissa käyttö- ja onnettomuustilanteissa syntyvät kuormitukset ja muut ympäristöolosuhteiden vaikutukset riittäväillä marginaaleilla.

STUK arvioi primääripiirin ja suojarakennuksen lujuusteknistä suunnittelua ydinvoimalaitoksen rakentamis- ja käyttölujarahakemusten

sekä asianomaisten painelaitteiden rakenne- suunnitelmien käsittelyn yhteydessä. Suunnittelua koskevia alustavia tietoja tarvitaan myös alustavan turvallisuusarvion tekemiseksi periaatepäätöstä varten. Periaatepäätös- ja lupahakemuksiin liittyvät yleiset menettelyt esitetään ohjeessa YVL 1.1.

2.2 Rakentamislupa

2.2.1 Toimitettavat asiakirjat

Ydinvoimalaitoksen rakentamislupaa haettaessa STUKille on toimitettava hyväksyttäväksi seuraavat selvitykset painelaitteiden lujuuden varmistamisesta:

- primääripiirin ja suojarakennuksen lujuuden varmistamisen periaatteet
- suunnitelma toimitettavista lujuusanalyysistä (lujuusanalyysisuunnitelma)
- suunnittelun perusteena olevat järjestelmien kuormitustilanteet
- reaktoripainesäiliön ja suojarakennuksen alustavat lujuusanalyysit.

Selvitykset voidaan esittää alustavassa turvallisuusselosteessa tai siihen liittyvissä erillisissä asiakirjoissa.

2.2.2 Lujuuden varmistamisen periaatteet

Primääripiiri ja suojarakennus

Primääripiirin lujuuden varmistamista koskevien selvitysten tulee kattaa vastaavien ydinvoimalaitosten käyttökokemusten perusteella tunnetut materiaalien vauriomekanismit ja tapahtumat, joiden seurauksena voi olla nopeaan paineenkantokyvyn menetykseen johtava hauras tai sitkeä murtuminen. Eri vauriomekanismeista on selvittävä niiden eliminoimiseksi suunnitellut valmistusmenetelmät, rakenneaineiden ja hitsauslisäaineiden valinnat, vesikemiat, käyttölämpötilat, virtausolosuhteet, mitoitus- ja muotoiluperusteet sekä mahdolliset muut ratkaisut. Samoin on esitettävä suunnitelmat niistä toimenpiteistä, joilla rajoitetaan voimakkaista paineen ja lämpötilan muutoksista sekä erisuuruissa lämpötiloissa olevien virtausten kohtaamisesta aiheutuvia rasituksia.

Selvityksistä on käytävä myös ilmi reaktoripainesäiliön haurasmurtuman estämiseen liittyvät suunnitteluperiaatteet sekä säteilyhaurastumisen merkitys käyttöään kannalta. Erityisesti tulee esittää perusmitoitus, hitsaussaumojen sijainti, materiaalistandardit tärkeimpine lisävaatimuksineen, mahdolliset poikkeavat rakenneratkaisut, nopeiden neutronien annos sekä arvio sydänalueen transitiolämpötilasta suunnitellun käyttöään päättyessä.

Suojarakennusta koskevissa selvityksissä on esitettävä kantavien teräsosien, kuten läpivientien ja kulkuaukkojen, rakenne ja perusmitoitus. Lisäksi tulee esittää oletettujen onnettomuuksien ja vakavien reaktorionnettomuuksien varalle suunnitellut eheyttä varmistavat järjestelmät ja rakenneratkaisut sekä suunnittelussa huomioon otettavat murtumismekanismat. Selvityksistä pitää myös ilmetä, mitkä ovat vakavien reaktorionnettomuuksien hallintaan liittyvät vaatimukset reaktoripainesäiliön eheydelle.

Putkikatkoihin varautuminen

Ydinvoimalaitoksen suunnittelussa on varauduttava suurten putkistojen täydellisestä, äkillisestä katkeamisesta johtuviin

- jäähdytevuotoihin ja suojarakennuksen yli- paineistumiseen
- reaktoripainesäiliön ja reaktorisydämen tu- entojen kuormitukseen
- pääkiertopumppujen kuormitukseen
- painevesireaktorilaitoksen höyrystimen tu- entojen ja lämmönsiirtoputkien kuormituk- siin

sekä muihin turvallisuustoimintoihin kohdistu- viin vaikutuksiin, kuten tulvimiseen, kosteuden ja lämpötilan nousuun sekä hätäjähdytysjär- jestelmän veteen vapautuviin epäpuhtauksiin.

Katkenneesta putkesta, suihkuista ja lentävistä esineistä tulevat iskut eivät saa aiheuttaa laiteisiin ja rakenteisiin sellaisia vaurioita tai mui- ta jäähdytevuotoja, jotka voivat vaarantaa put- kikatkon tapahtuessa tarvittavien turvallisuus- toimintojen, kuten reaktorin pikasulun, hätä- jäähdytyksen, jälkilämmön poiston ja suojar- kennuksen eristämisen, onnistumisen. Tärkeät laitteet on sijoitettava etäälle korkeaenergisistä

putkistoista, ja toisiaan varmistavat turvallisuusjärjestelmät sekä turvallisuusjärjestelmien rinnakkaiset osat on riittävästi erotettava toisistaan rakennusten osastoineilla. Rasitetuimpien kohtien katkeamisesta johtuvat iskut on ensisijaisesti estettävä murtumatuilla ja suihkusuojuilla viitteessä [2] annettujen ohjeiden mukaisesti.

Mikäli primääripiirin putkistoja on tarkoitus rakentaa ilman murtumatukia ja suihkusuojuja, on tämä suunnitelma toimitettava STUKille hyväksyttäväksi alustavan turvallisuusselosteen käsittelyn yhteydessä. Suunnitelmassa on eriteltävä ne järjestelmät tai järjestelmän osat, joita suunnitelma koskee, sekä suunnitelman perusteena oleva erotteluperiaatteen toteutus kullekin järjestelmälle tai järjestelmän osalle.

Lisäksi suunnitelmassa on selvitettävä perusteluna käytettävät koetulokset, kelpuutetuilla menetelmillä tehdyt analyysit sekä vertailukelpoisten ydinvoimalaitosten käyttökokemukset. Todennäköisyystarkasteluja voidaan tehdä kohdassa 2.3.3 esitetyillä menetelmillä. Näiden selvitysten tulee osoittaa, että putkistojen ja niiden varusteiden muotoilu, rakenneaineet, valmistusmenetelmät, laaduntarkastus sekä kuormitus- ja ympäristöolosuhteet ovat sellaiset, että katkeamisriskin aiheuttavien särökokojen syntyminen on hyvin epätodennäköistä. Määräaikaistarkastusohjelmien, muiden kunnonvalvontamenetelmien sekä vuotojen valvonnan tulee antaa hyvät edellytykset särön havaitsemiseen ja tarvittaviin toimenpiteisiin, ennen kuin särö on kasvanut vaarallisen suureksi (vuoto ennen murtumaa- eli LBB-periaate). Tämä suunnitelma tulee kysymykseen vain sellaisille putkistoille, joihin ei kohdistu vaikeasti havaittavia tai arvioitavia haitallisia kuormitustilanteita ja vauriomekanismeja, kuten paineiskuja tai korrosioilmiöitä.

Suunnittelun perusteena olevista putkikatkoista ja niiden mekaanisista vaikutuksista on esitettävä analyysit asianomaisten painelaitteiden rakennesuunnitelmissa. Niistä järjestelmistä, joiden putkikatkojen aiheuttamiin iskuihin ei varauduta suojaavilla rakenteilla, on laskennallisesti osoitettava LBB-periaatteen toteutumisen.

Analyyseissa voidaan noudattaa viitteissä [3] ja [4] esitettyjä menettelyjä. Oletetun vuotokohdan murtumismekaaninen stabiiliustarkastelu tulee tehdä suurimman paikallisen rasituksen aiheuttaville käyttöolosuhteille, mukaan lukien ohjeessa YVL 2.6 tarkoitettu suunnittelu- ja maanjäristys.

2.2.3 Lujuusanalyysisuunnitelma

Noudatettavat standardit

Lujuusanalyysisuunnitelmassa on mainittava primääripiirin ja suojarakennuksen jännitys- ja haurasmurtuma-analyyseihin käytettävät standardit.

Pääsääntöisesti tulee käyttää standardia ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III, Division 1 (ASME III) [5a]. Sen osissa NB, NE, NF ja NG annetut pakolliset määräykset lujuusanalyyseista pätevät tällöin niiltä osin, kuin STUK ei ole esittänyt täsmennettyjä vaatimuksia. Vaihtoehtoisesti voidaan STUKille esittää hyväksyttäväksi muu ulkomaisen valvontaviranomaisen hyväksymä, periaatteiltaan vastaava painelaitteiden suunnittelu- ja lujuusanalyysistandardi. Hyväksymisen yhtenä edellytyksenä on, että kyseistä standardia on aiemmin noudatettu vastaavan tyyppisiä ydinvoimalaitoksia rakennettaessa.

Analysoitavat painelaitteet

Lujuusanalyysisuunnitelmassa on esitettävä luettelo niistä painelaitteista, joille tämän ohjeen vaatimusten perusteella tehdään jännitysanalyysi tai haurasmurtuma-analyysi. Luettelossa tulee mainita haurasmurtuma-analyyseissa tarkasteltavat painelaitteen yksityiskohdat.

Lujuusanalyysien toimittajat

Lujuusanalyysisuunnitelmassa on esitettävä yhteenveto primääripiirin ja suojarakennuksen osien tärkeimmistä lujuusanalyysien toimittajista. Lisäksi on selvitettävä tärkeimmät käytettävät tietokoneohjelmat ja mahdolliset analyysien kulkuun vaikuttavat tietojärjestelmät toimittajineen.

2.2.4 Järjestelmien kuormitustilanteet

Huomioon otettavat käyttötilanteet ja -tapahtumat

Järjestelmien kuormitustilanteita koskevissa selvityksissä on esitettävä primääripiirin painelaitteiden sekä suojarakennuksen mitoituksessa ja lujuusanalyysissä huomioon otettavat normaalit käyttötilanteet ja odotettavissa olevat käyttöhäiriöt lukumäärineen sekä oletetut onnettomuudet ja vakavat reaktorionnettomuudet. Ulkoisista tapahtumista on selvitettävä suunnittelussa huomioon otettu, ydinvoimalaitoksen sijaintipaikalla mahdolliseksi arvioitu lentokonetörmäys sekä ohjeen YVL 2.6 mukainen suunnittelumaanjäristys.

Kuormitustilanteiden ja -yhdistelmien määrittely

Niistä yhden alkutapahtuman käynnistämistä tapahtumaketjuista, jotka aiheuttavat järjestelmään eri ilmiöistä johtuvia samanaikaisia kuormituksia, on esitettävä kuormitusyhdistelmät. Hyväksyttäviä dynaamisten kuormitusten yhdistämisperiaatteita esitetään viitteessä [5h]. Maanjäristyksen ja sen aikana vaikuttavien muiden kuormitusten yhdistämistä koskevat vaatimukset esitetään ohjeessa YVL 2.6.

Kustakin kuormitustilanteesta ja -yhdistelmästä tulee esittää eri järjestelmiin kohdistuvat paine- ja lämpötransientit, dynaamiset kuormitukset sekä niiden aikariippuvuudet. Kuormitusten perusteena olevat koetulokset tai kelpuutetuilla menetelmillä tehdyt analyysit on myös esitettävä. Vertailukelpoisten ydinvoimalaitosten vastaavia selvityksiä sekä käyttökokemuksiin perustuvia arvioita voidaan käyttää tässä hyväksi.

Painelaitteiden kestävyysvaatimukset eri tilanteissa

Järjestelmien kuormitustilanteita koskevissa selvityksissä tulee esittää myös periaatteet kohdan 3.1.4 mukaisesta painelaitteiden käyttökuormitusten ryhmittelystä ja kestävyysvaatimusten määrittelystä järjestelmien erityyppiin häiriö- ja onnettomuustilanteisiin.

2.2.5 Alustavat lujuusanalyysit

Käyttötilanteet ja oletetut onnettomuudet

Alustavat lujuusanalyysit on esitettävä reaktoripainesäiliöstä ja suojarakennuksesta. Erityisesti tulee analysoida ne järjestelmien kuormitustilanteet, jotka määräävät rasiitetuimpien rakenneosien mitoituksen tai sallittavan paine- ja lämpötila-alueen.

Reaktoripainesäiliön alustavaan lujuusanalyyssiin tulee liittää yhteenvedo reaktorisydäntä tukevien ja sen jäähdytettävyydelle tärkeiden sisärankenteiden lujuusteknisistä suunnitteluperusteista.

Normaalia käyttöä, odotettavissa olevia käyttöhäiriöitä ja oletettuja onnettomuuksia koskevat lopulliset lujuusanalyysit on toimitettava luvun 3 vaatimusten mukaisesti painelaitteiden rakennesuunnitelman osana.

Vakavat reaktorionnettomuudet

Suojarakennuksen alustavassa lujuusanalyyssissä on selvitettävä myös vakavien reaktorionnettomuuksien vaikutukset. Syntyvät paineen ja lämpötilan muutokset samoin kuin mahdolliset lentävät esineet eivät saa aiheuttaa suojarakennuksen rakenteisiin niin suuria jännityksiä tai muodonmuutoksia, että seurauksena voi olla tiiviyn vaarantava rakenteiden murtuminen tai stabiiliuden menetys. Tarkasteluissa tulee käydä läpi suojarakennustyyppin mahdolliseksi tekevät, eri rakenneosien jäykkyys- ja lujuussuhteista riippuvat yleiset ja paikalliset murtumismekanismit, kuten läpivientien, kulkuaukkojen, jäykisteiden sekä vaipan ja pohjalaatan liitoksen pettäminen. Lujuusarvojen mahdollinen heikkeneminen tulee ottaa huomioon, mikäli rakenteissa ehtii tapahtua merkittävää lämmön siirtymistä tai kemiallisia reaktioita. Iskumaisien kuormitusten dynaamiset vaikutukset on selvitettävä ja nopeiden paineen laskujen aiheuttamaa lommahdusriskiä tulee tarkastella. Haurasmurtuman riski on otettava huomioon tarkasteltaessa matalassa käyttölämpötilassa tapahtuvia äkillisiä paineen nousuja.

Mikäli vakavien reaktorionnettomuuksien hallinta edellyttää reaktoripainesäiliön ehjänä säilymistä, on esitettävä myös tämän ehdon toteutusta koskeva alustava lujuusanalyysi.

Vakavien reaktorionnettomuuksien lujuusanalyysissä on ensisijaisesti sovellettava kohtien 3.2 ja 3.3 mukaisia jännitys- ja haurasmurtumanalyysimenetelmiä sekä hyväksymisrajoja ottaen huomioon mahdolliset toimintakyvylle asetetut vaatimukset. Kokeellisesti oikeaksi osoitettujen, sallittuun venymään perustuvien kriteerien käyttö voidaan hyväksyä tapauskohtaisesti. Jos lämpötilat ylittävät ASME III:n mukaiset pätevyysrajat, tarkasteluissa tulee ottaa huomioon viruminen ja siitä johtuvat murtumismekanismit.

2.3 Käyttölupa

2.3.1 Toimitettavat asiakirjat

Ydinvoimalaitoksen käyttölupaa koskevan hakemuksen yhteydessä STUKille on toimitettava hyväksyttäväksi seuraavat selvitykset painelaitteiden lujuuden varmistamisesta:

- lujuusanalyysien yhteenvetoraportti
- alkutapahtumiksi oletettujen vuotojen ja murtumien todennäköisyydet
- koekäytön aikainen lujuustekninen koeohjelma
- käytön aiheuttamien kuormitusten seurantaohjelma.

2.3.2 Lujuusanalyysien yhteenvetoraportti

Lujuusanalyysien yhteenvetoraportissa on esitettävä luettelo painelaitteiden rakennesuunnitelmien yhteydessä toimitetuista lujuusanalyysiraporteista sekä yhteenveto siitä, miten niiden tulokset täyttävät tämän ohjeen vaatimukset. Yhteenvetoraportissa tulee myös luetella lopullisten lujuusanalyysien perusteena olevat selvitykset järjestelmien kuormitustilanteista.

Käytön aikana ylläpidettävää lujuusanalyysirekisteriä koskevat vaatimukset esitetään kohdassa 4.3.

2.3.3 Vuotojen ja murtumien todennäköisyydet

Ydinvoimalaitoksen suunnittelussa ja turvallisuusanalyysissä on otettava huomioon tärkeimpien painelaitteiden lujuuteen liittyvät epävarmuudet. Vaurioiden ja niitä seuraavien onnettomuusketjujen aiheuttamat riskit eivät saa ylittää todennäköisyyspohjaisessa turvallisuusanalyysissä (PSA) sovellettavia ohjeen YVL 2.8 mukaisia turvallisuustavoitteita. Reaktoripainesäiliön haurasmurtuman todennäköisyyspohjaista analyysia koskevat vaatimukset esitetään kohdassa 3.3.7.

Alkutapahtumien esiintymistäajuuksia koskevassa selvityksessä painelaitteiden vuodot ja murtumat on luokiteltava niiden kohteen ja tyyppin sekä vuotovirtauksen poikkipinta-alan perusteella. Murtumana on käsiteltävä painelaitteen tai sen osan täydellinen kuormankantokyvyn menetys, joka aiheuttaa vuodon lisäksi kohdassa 2.2.2, putkikatkoihin varautuminen, tarkoitettuja kuormituksia ja iskuja laitteisiin ja rakenteisiin. Luokittelussa on otettava huomioon myös yksittäisten kantavien ja toiminnallisten osien, kuten lämmönsiirtoputkien, laippaliitosten ja akselitiivistien, vauriot sekä toiminta-, käyttö- ja huoltovirheistä johtuvat vuodot ja murtumat.

Esiintymistäajuuksien arviointiin tulee käyttää riittävän kattavasti vastaavilta laitoksilta saatavia tilastoja, eriateisten vuoto- ja murtumataapausten välisiä korrelaatioita sekä todennäköisyyspohjaisia murtumismekaanisia analyysia. Murtumismekaanisten analyysien tulee perustua vauriomekanismien (väsymis-, korroosio- ja vanhenemisilmiöt) kehittymistä koskeviin fyysikaalisiin malleihin. Muita tarkasteltavia tekijöitä ovat

- vikojen ja kuormitusten satunnaisuus
- vian kasvunopeus suhteessa tarkastusjakson pituuteen
- määräaikaistarkastusten ja vuotojen valvonnan luotettavuus
- lopullisen murtuman mekanismi ja siihen vaikuttavat materiaaliominaisuudet.

Käytön aikana tulee käyttökokemuksista kerättävään, ohjeen YVL 2.8 tarkoittamaan luotettavuustietokantaan sisällyttää vikanäyttämiä, vuotoja ja murtumia sekä niiden syytä ja havaitsemistapaa koskevat tiedot.

2.3.4 Lujuustekninen koeohjelma

Ydinvoimalaitoksen koekäytön yhteydessä on varmistettava, että painelaitteiden jännitysanalyysissä käytetyt kuormitukset on määritelty konservatiivisesti eikä haitallisia kuormituksia ole jäänyt ottamatta huomioon. Koekäytön yhteydessä voidaan myös tehdä kokeellisia jännitysanalyyssejä sellaisille kohteille, joita varten ei ole käytettävissä riittäviä laskentamenetelmiä.

Kokeelliset selvitykset on tehtävä pääasiallisesti järjestelmäkokeiden ja tehokokeiden aikana. Koeohjelmassa tulee eritellä toteutettavat koetilanteet, valvottavat kohteet ja ilmiöt sekä käytettävät menetelmät ja hyväksymiskriteerit. Koetilanteet tulee toteuttaa mahdollisimman hyvin suunnitteluarvoja ja niiden normaaleja vaihteluvälejä vastaavilla käyttöparametreilla ja poikkeamat niistä tulee ottaa huomioon hyväksymiskriteereitä asetettaessa.

Koeohjelman laajuuden ja menetelmien valinnassa on painotettava sellaisia kohteita ja kuormitustilanteita, jotka jännitysanalyysien mukaan ovat kriittisimpiä tai joiden mallintaminen on epävarmaa. Tällaisia ovat muun muassa varo- ja eristysventtiilien aiheuttamat painetransientit, lämpötilatransientit ylösajo- ja hätäjähdytystilanteissa, lämpötilakerrostumat sekä putkistojen ja reaktoripainesäiliön sisäosien värähtelyt.

Koeohjelman laajuudesta voidaan rajoittaa vaativimpia koejärjestelyjä, mikäli niitä on aiemmin toteutettu vastaavalla ydinvoimalaitoksella ja tulokset toimitetaan STUKille. Tällöin esimerkiksi reaktoripainesäiliön sisäosien värähtelymittaukset voidaan korvata koekäytön jälkeen tehtävällä sisäosien ja niiden tuentapisteiden tarkastuksella [6].

Ydinvoimalaitoksen koekäytön aikaista putkistojen värähtelyjen ja lämpöliikkeiden valvontaa

käsitellään ohjeessa YVL 3.3, ja sen lisäksi tulee soveltuvin osin noudattaa standardien [7a] ja [7b] mukaisia menettelyjä.

STUK valvoo lujuusteknisen koeohjelman toteutusta ja raportointia ohjeen YVL 2.5 mukaisia menettelyjä noudattaen.

2.3.5 Kuormitusten seurantaohjelma

Ydinvoimalaitoksen käytön aikana on pidettävä kirjaa sellaisista käyttötilanteista ja -tapahtumista, jotka aiheuttavat tärkeimpiin painelaitteisiin väsyttäviä paine- ja lämpötransientteja. Niiden kulusta on kerättävä riittävästi mittaus-tietoja niin, että lämpötilojen muutosnopeudet ja muut oleelliset tekijät voidaan jälkikäteen tarkistaa. Seuranta on järjestettävä siten, että myös käytön aikana ilmenevät odottamattomat kuormitustyyppit havaitaan.

Seurantaohjelmassa tulee selvittää seurattavat käyttötilanteet ja -tapahtumat, niiden spesifoidut lukumäärät sekä niiden aikana seurattavat mitaussuureet. Lisäksi on esitettävä kuormitus-seurannan tekninen ja hallinnollinen toteutus.

Primääripiirin käytönaikaiseen valvontaan tulee ensisijaisesti käyttää tietokonepohjaisia jatkuvatoimisia seurantajärjestelmiä. Seurattavia suureita ovat muun muassa prosessisuureet, pintalämpötilat, venymät ja värähtelyt. Väsymiskertymän jatkuvatoiminen seuranta on tarpeen sellaisissa rasitetuimmassa kohdissa, joista ei voida esittää luotettavaa väsymistarkastelua.

Käytön aikana luoksepäästäväistä kohteista tulee ohjelmaan sisältyä säännöllisiä laitoskierroksia ja määräaikaishkojeita värähtelyjen, vuotojen, paineiskujen, kavitaation, tuentojen toimivuuden ja muiden vastaavien ilmiöiden havaitsemiseksi. Primääripiirin lämpöliiketoimien säilyminen on tarkastettava seisokkien aikana.

Seurantaohjelmassa käytettävillä mittausjärjestelmillä on voitava havaita luotettavasti myös primääripiiriin joutuneet irtokappaleet, ellei muutoin osoiteta, että irtokappaleiden kulkeutuminen turvallisuustoimintojen kannalta tärkeisiin kohteisiin on estetty primääripiirin muo-

toilulla, sihdeillä, virtauksen jakajilla tai muilla toimenpiteillä. Irtokappaleiden valvontaan soveltuvia ohjeita annetaan viitteessä [7d].

Kuormitusten seurantaohjelman tulokset tulee toimittaa STUKille ohjeen YVL 1.5 mukaisen vuosiraportin osana.

3 Painelaitteen rakennesuunnitelmassa esitettävät lujuusanalyysit

3.1 Yleiset vaatimukset lujuusanalyysiraportille

3.1.1 Sisältö ja tarkoitus

Kohdassa 3.2.2 tarkoitetuista painelaitteista on toimitettava STUKille lujuusanalyysiraportti. Lujuusanalyysiraportissa on esitettävä jännitys-analyysi väsymistarkasteluineen ja onnettomuustilanteiden analyysineen sekä kohdassa 3.3.1 mainituissa tapauksissa myös haurasmurtuma-analyysi.

Putkistojen lujuusanalyysiraportteihin on lisäksi sisällytettävä LBB-analyysi niistä järjestelmistä, joihin kyseistä periaatetta sovelletaan kohdan 2.2.2, putkikatkoihin varautuminen, vaatimusten mukaisesti.

Lujuusanalyysiraportin tarkoituksena on osoittaa, että painelaitteen rakenne täyttää suunnitteluperusteiden mukaisissa kuormitustilanteissa sovellettavan lujuusanalyysistandardin vaatimukset sekä mahdolliset muut lujuudelle ja jäykkyydelle asetetut vaatimukset. Jännitysanalyysin avulla voidaan myös mitoitaa sellaisia painelaitteita tai niiden osia, joille standardit eivät anna käyttökelpoisia perusmitoitussääntöjä.

3.1.2 Toimitusajankohta

Lujuusanalyysiraportti on toimitettava STUKille painelaitteen rakennesuunnitelman osana. Tapauskohtaisesti STUK voi perustellusta syystä hyväksyä myöhemmän toimitusajankohdan.

Mikäli painelaitteen valmistuksessa toteutuneet ainevahvuudet tai koekäytön aikana havaitut kuormitukset poikkeavat lujuusanalyysissä käytetyistä arvoista ja poikkeamat saattavat heikentää saavutettavia varmuuskertoimia, STUKille tulee toimittaa hyväksyttäväksi tarpeellisilta osilta uusitut laskelmat.

Lujuusanalyysien uusiminen on tarpeen lisäksi seuraavissa tapauksissa:

- muutostyöt, joiden seurauksena painelaitteen mitat, materiaaliarvot, tuentatapa, kuormitukset tai muut tekijät saattavat muuttua epäedullisesti
- suunnittelupaineen tai -lämpötilan nostaminen tai käyttötavan muuttaminen kuormituksia lisäävästi
- käytön aikana havaittu kuormitusten kasvu, seinämän oheneminen, odotettua nopeampi sitkeysarvojen heikkeneminen tai muu turvamarginaaleja heikentävä poikkeama lähtöarvoista.

3.1.3 Esitystapa

Lujuusanalyysiraportin esitystavan on oltava selkeä. Siitä tulee yksikäsitteisesti ilmetä annetut lähtötiedot ja niiden lähteet, sovelletut standardit ja analyysimenetelmät sekä lopputulokset johtopäätöksineen. Esitystavassa on lisäksi otettava huomioon seuraavat seikat:

- rakenneaineiden lujuusarvot sekä muut käytetyt rakenneaineiden ja painelaitteen sisälön fysikaaliset ominaisuudet on ilmoitettava huoneen lämpötilassa ja suunnittelulämpötilassa
- elementtiverkot ja muut numeeriset laskentamallit on esitettävä yksityiskohtaisesti ja tarpeellisia osasuurennuksia käyttäen
- kuormitukset, reunaehdot, symmetriaehdot, tehdyt yksinkertaistukset sekä analyysien kulkuun liittyvät kohtien 3.2.3, 3.2.4 ja 3.3.2 mukaiset tiedot on esitettävä selvästi
- kaavoissa, taulukoissa ja kuvissa käytetyt yksiköt sekä muut kuin standardin mukaiset merkinnät on selitettävä
- viittauksia tehtäessä lähteistä käytetyt tiedot on esitettävä raportissa ja vaikeasti saatava lähdekirjallisuus on toimitettava STUKille

- riittävin selityksin varustetut atk-tulosteet on liitettävä raporttiin; samoin käytetyt rakennepiirustukset, jos raporttia ei toimiteta rakennesuunnitelman yhteydessä.

Tärkeimpien poikkileikkausten lämpötila- ja jännitysjakaukset tulee esittää niin kattavasti, että rasiitetuimmat kohdat voidaan helposti päätellä ja tarkistaa niiden avulla. Graafisten menetelmien, tarvittaessa värien käyttö on suositeltavaa. Tällöin on kuitenkin esitettävä myös suurimpien jännitysten lukuarvot.

Raportissa esitettyjä tietoja voidaan täydentää näyttämällä tietokoneanimaatioita tai toimittamalla analyysia varten laadittu tietokoneohjelma tai -malli STUKille.

3.1.4 Tarkasteltavat kuormitukset

Lujuusanalyysiraportissa tulee esittää painelaitteen suunnittelukuormitukset, käyttökuormitukset, painekokeet ja muut lujuusteknisistä syistä vaaditut kokeet sekä merkittävät kuljetusten aiheuttamat kuormitukset.

Suunnittelukuormitukset

Suunnittelukuormitukset käsittävät sovellettavan standardin mukaisesti määritettävän suunnittelupaineen, suunnittelulämpötilan ja ne muut mekaaniset suunnittelukuormitukset, jotka yhdessä suunnittelupaineen kanssa aiheuttavat normaaleissa käyttöolosuhteissa suurimmat primääriset jännitykset.

Käyttökuormitukset

Käyttökuormituksia määritettäessä lähtökohtana on käytettävä kohdassa 2.2.4 tarkoitettuja järjestelmien kuormitustilanteita mukaan lukien odotettavissa olevat käyttöhäiriöt ja oletetut onnettomuudet. Järjestelmän yleisestä käyttäytymisestä poikkeavat paikalliset ilmiöt, kuten reaktoripainesäiliön ja painevesireaktorilaitoksen paineistimen yhteiden sekä putkistojen haaroitusten lämpötransientit, on kuitenkin määritettävä ja analysoitava erikseen. Käyttökuormituksista on selvitettävä niiden lukumäärät sekä aikariippuvuudet ja niitä koskevat analyysit.

Tyypillisiä käyttökuormituksiin vaikuttavia tekijöitä ovat

- oma paino mukaan lukien sisältö, lisälaitteet ja lämpöeristeet
- sisäpuolinen ja ulkopuolinen paine
- lämpötilan muutokset ja epätasainen jakautuminen
- äkilliset paineen muutokset ja hydrodynaamiset reaktiovoimat
- tukien reaktiovoimat
- asennuksesta johtuvat esikiristyksiset ja jännitykset
- liittyvistä putkistoista tulevat voimat ja momentit
- laitteiden aiheuttamat iskut ja värinät
- virtauksen aiheuttamat värähtelyherätteet
- kuljetusten aiheuttamat kuormitukset
- maanjäristykset, lentävät esineet ja suihkuvoimat.

Käyttökuormitusten ryhmittely

Käyttökuormitukset on jaettava ryhmiin ensisijaisesti sen perusteella, miten kukin kuormitustilanne saa vaikuttaa painelaitteen eheyteen. Täten esimerkiksi turvallisuusjärjestelmän suunnittelematonta käynnistymistä pidetään siihen kuuluvien painelaitteiden kannalta normaalina käyttötilanteena. Turvallisuusluokan 1 painelaitteille ryhmittely on seuraava:

- A. Kuormitustilanteet, joiden alaisena painelaitte on suunnitellussa normaalikäytössä.
- B. Sellaiset poikkeamat normaalikäytön aiheuttamista kuormituksista, jotka painelaitte on suunniteltu kestävänsä lasketun elinikänsä ajan ilman korjaamista.
- C. Epänormaalit kuormitustilanteet, joita ei ole otettu huomioon painelaitteen elinikälaskelmissa ja jotka voivat johtaa niin suuriin paikallisiin muodonmuutoksiin, että painelaitte on tarkastettava ja mahdollisesti korjattava ennen käytön jatkamista.
- D. Epänormaalit kuormitustilanteet, jotka paineenkantokyvyn edelleen säilyessä aiheuttavat painelaitteeseen muodon laajaa vääristymistä ja voivat edellyttää painelaitteen käytöstäpoiston.

Suunnitteluperusteissa asetetut mahdolliset muut, esimerkiksi pumppujen, venttiilien ja si-

säosien toimintakykyyn liittyvät lujuustekniset vaatimukset on mainittava lujuusanalyysiraportissa ja otettava huomioon käyttökuormitusten ryhmittelyssä.

3.2 Jännitysanalyysi

3.2.1 Yleistä

Jännitysanalyysin päävaiheet ovat tarkasteltavia kuormituksia vastaavien jännitystilojen lujuusopillinen määrittäminen sekä jännitystilojen hyväksyttävyyden arviointi vertaamalla niitä sovellettavassa standardissa eri vauriomekanismien suhteen asetettuihin hyväksymisrajoihin.

Jännitystilojen hyväksyttävyyden arviointiin on käytettävä eri painelaitetyypeille (painesäiliöt, putkistot, pumput, venttiilit) asianomaisissa YVL-ohjeissa hyväksytyjä menettelyjä tai tämän ohjeen mukaista yleistä menettelyä, joka esitetään turvallisuusluokan 1 painelaitteille ASME III:n artiklassa NB 3200. Perusteet valitun standardin käytölle tulee mainita lujuusanalyysiraportissa. Kaikissa tapauksissa yleinen lähtökohta on, että painelaite täyttää sovellettavan standardin vaatimukset mitoituksesta ja muotoilusta.

3.2.2 Soveltamisala

Jännitysanalyysi on tehtävä kaikista turvallisuusluokkaan 1 kuuluvista primääripiirin osista sekä seuraavista turvallisuusluokkaan 2 kuuluvista rakenteista (sulkeissa sovellettavat ASME III:n artikkelit):

- painevesireaktorilaitoksella höyrystimen sekundääripuoli sekä suojarakennuksen sisään jäävät höyry- ja syöttövesijärjestelmien pääputkien osat ulompiin eristysventtiileihin asti (NB 3200 ja 3600)
- suojarakennus metalliosiltaan mukaan lukien läpiviennit (NE 3200)
- primääripiirin kannatinrakenteet (NF 3200)
- reaktorisydäntä tukevat ja sen jäähdytettävyyden kannalta tärkeät reaktoripainesäiliön sisä rakenteet (NG 3200).

Muista, esimerkiksi PSA:n avulla tärkeiksi arvioiduista, ydinteknisistä painelaitteista jännitys-

analyysi vaaditaan tapauskohtaisesti ottaen huomioon todellinen primäärinen jännitys sekä taivannomaisesta poikkeava muotoilu tai kuormitus.

Maanjäristysluokkaan S1 kuuluville painelaitteille tulee jännitysanalyysin avulla osoittaa maanjäristyskestävyys ohjeen YVL 2.6 mukaisen suunnittelumaanjäristyksen aiheuttamalle kuormitukselle, ellei sitä osoiteta kokemusperäisesti.

Betonisen suojarakennuksen ja sen teräsosien lujuuslaskuihin soveltuvia vaatimuksia esitetään ohjeissa YVL 4.1 ja 4.2.

3.2.3 Rakenteen mallinnus

Laskentamallin laajuus

Painelaitteen rakenne on yleisessä jännitysanalyysissa mallinnettava riittävän kattavasti. Mallin tulee sisältää kuormitusten oleelliset vaikutusalueet sekä ne painelaitteen osat, joilla on merkitystä hyväksymisrajojen lähtökohtana olevien vauriomekanismien kehittymiseen. Yksittäisiin painelaitteen osiin rajoitettavia laskentamalleja voidaan käyttää, jos lähellä ei sijaitse jännitys jakaumiin vaikuttavia epäjatkuvuuskohtia ja reunaehtojen oikeellisuus tai konservatiivisuus perustellaan. Symmetriaehtoja hyödynnettäessä tulee samanaikaisesti ottaa huomioon painelaitteen geometria, kuormitukset ja muut reunaehdot sekä materiaaliominaisuudet.

Painelaitteen rakenneosien yksityiskohtainen mallinnus on tarpeen silloin, kun painelaitteeseen kohdistuu voimakkaita lämpötilagradientteja ja paikallisia mekaanisia kuormituksia tai kun painelaitteessa on lämpölaajenemiskertoimien ja seinämän paksuuden muutosten kaltaisia oleellisia rakenteellisia epäjatkuvuuskohtia. Tällaisia kohteita ovat muun muassa

- putkiyhteiden alueet
- haaroitukset ja läpiviennit
- lieriön ja päädyn liitokset
- laippaliitokset ruuveineen
- sisäosien tukien liittyminen painerunkoon
- painelaitteen ripustimien ja kannattimien liitokset
- suojarakennuksen jäykisteet.

Malleissa on myös otettava huomioon kuoriteoriasta oleellisesti poikkeava lujuusopillinen käyttäytyminen sekä lämpöjännitysten epälineaarinen jakauma suurten seinämäpaksuuksien alueella. Sisäpuolinen austeniittinen pinnoite on sisällytettävä ferriittisten painelaitteiden käyttökuormituksille tehtävien analyysien malleihin, mikäli pinnoitteen paksuus on vähintään 10 % seinämän paksuudesta.

Malleissa on otettava huomioon rakenneosien välisistä esijännityksistä, kitkoista ja välyksistä johtuvat, jännitystilojen kannalta merkitykselliset epälineaarisuudet. Tuntojen laskentamalleissa on kuvattava niiden rakennetyypin lujuusopillinen toimintaperiaate (tanko, palkki, levy, kuori), painelaitteen eri suuntaisten liikkeiden rajoittuminen ja kiinnitykset rakennusteknisiin rakenteisiin.

Putkiston laskentamallit

Putkistojen rakenteen mallintamiseen voidaan käyttää tekniseen taivutusoppiin perustuvia menetelmiä. Pyörähdyssymmetrisestä muodosta poikkeavat lämpötilajakaumat on tällöin kuvattava ekvivalenteilla taivutusmomenteilla ja mallinnettava paikallisia jännitysjakautumia laskettaessa yksityiskohtaisesti. Putkimutkissa, haaroituksissa, laajennuksissa ja supistuksissa sekä muissa muotokappaleissa ja epäjatkuvuuskohdissa syntyvät jännityskeskittymät ja joustavuuden poikkeaminen teknisen taivutusopin mukaisesta käyttäytymisestä tulee ottaa huomioon viitteen [5aV] mukaisesti. Laskentamallien on ulotuttava kussakin päässään jäykempään ja massiivisempaan muuhun painelaitteeseen tai rakenteeseen, ja mahdolliset siitä välittyvät pakoliikkeet tulee ottaa huomioon. Erityiset putkistokannakkeet (kierrejousi, vakiovoima, iskunvaimennin jne.) sekä putkiston liikkeitä seuraavat painelaitteet tulee mallintaa siten, että niiden vaikutus putkiston joustavuuteen, vaimennukseen ja massajakaumaan vastaa todellisuutta. Onnettomuustilanteiden analyyseissa tulee murtumatuista mallintaa spesifioidut liikevarat, vaimenninrakenteiden voima-siirtymäriippuvuudet sekä putken paikalliset muodonmuutokset.

Mikäli alemman kuin 1. turvallisuusluokan putkistoon kuuluu geometrialtaan samankaltaisia, samaa tehtävää suorittavia osia, jännitysanalyysi voidaan rajata rasitetuimpina pidettäviin osiin. Muille osille tulee tehdä ohjeen YVL 3.3 mukainen joustavuusanalyysi.

Materiaaliominaisuudet

Jännitysanalyysissa on käytettävä sovellettavan standardin mukaisia, tarkasteltaviin lämpötiloihin tarkoitettuja materiaalien lujuusarvoja ja fysikaalisia ominaisuuksia [5e, 8]. Muille erikseen hyväksytyille materiaaleille nämä arvot on määritettävä suunnittelussa käytettävän standardin mukaisesti.

Jännitysten ja venymien välisen riippuvuuden kuvaamiseen voidaan käyttää joko elastista tai elastis-plastista materiaalmallia. Elastisen mallin yhtenä tärkeänä perusteena on toistuvan kuormituksen aiheuttamien rakenteen muodonmuutosten mukautuminen (shakedown) myötämisen seurauksena kimmoiselle alueelle siinä tapauksessa, että elastisesti laskettujen jännitysten vaihteluväli on enintään kaksi kertaa niin suuri kuin myötöraja.

Mikäli sitkeästi käyttäytyvän painelaitteen suurinta kantokykyä arvioidaan elastis-plastisella analyysillä, lähtökohtana tulee olla huoneen lämpötilassa ja suunnittelulämpötilassa konservatiivisesti määritetyt materiaalien jännitys-venymäkäyrät. Sovellettavat käyrät sekä niihin mahdollisesti tehtävät matemaattiset sovitteet on esitettävä lujuusanalyysiraportissa. Lisäksi tulee selostaa mallinnuksessa käytetyt jännitysten, venymien, voimien ja siirtymien väliset yhteydet lineaarisuusolettamuksineen sekä käytetyt numeeriset menetelmät, kuten kuormituksen lisäykset ja niihin liittyvät iteroinnit katkaisuhtoineen [9]. Tuloksia tulee verrata vastaavan elastisen analyysin tuloksiin.

Analysoitaessa äkillisten onnettomuustilanteiden kulkua dynaamisilla elastis-plastisilla menetelmillä tulee jännitys-venymäkäyrissä lisäksi ottaa huomioon venymänopeuden vaikutus. Hyväksymisrajojen on kuitenkin perustuttava staattisiin lujuusarvoihin.

3.2.4 Kuormitusten mallinnus

Kuormitustilanteet on mallinnettava yleisessä jännitysanalyysissä painelaitteeseen välittömästi kohdistuvina termisinä ja mekaanisina vaikutuksina. Vaikutusten määrittämiseen voidaan käyttää kuormitustilanteita hallitsevien fysikaalisten ilmiöiden analyysimenetelmiä, konservatiivisia yksinkertaistuksia tai koetuloksia.

Termiset kuormitukset

Lämpötilajakaumien analysointiin on käytettävä riittävän yksityiskohtaisia malleja. Laskettaessa lämpötilaeroa putken seinämän yli voidaan tehdä yksidimensioinen tarkastelu. Mikäli putkilinjassa virtaavan väliaineen lämpötila voi nopeasti vaihdella eri käyttöolosuhteissa, mahdollinen lämpötilakerrostuminen ja lämpötilojen rajapinnan heilahtelu tulee ottaa huomioon [10]. Käsittely ajasta riippuvana lämmönsiirtotehtävänä on tarpeen sellaisissa nopeissa lämpötilan muutoksissa, joissa lämpö johtuu suuren ainepaksuuden, esimerkiksi laippaliitoksen, läpi aikaviiveellä.

Termisten kuormitusten analyyseissä on esitettävä lämmönsiirtokertoimien määrittäminen sekä virtaus- ja lämpökenttien analysointimenetelmien fysikaaliset perusteet ja matemaattiset mallit.

Dynaamiset kuormitukset

Painelaitteelle on tehtävä dynaaminen analyysi, mikäli ajasta riippuvan kuormituksen taajuussisältö vastaa painelaitteen tärkeimpiä ominaisuuksia. Esimerkkejä tällaisesta tilanteesta ovat varo- ja eristysventtiileistä johtuvien painetransienttien, muiden iskumaisten mekaanisten kuormitusten ja virtauksen aiheuttamat putkistojen ja sisäosien värähtelyt sekä suojarakennevärähtelyt onnettomuustilanteissa. Maanjäristysten huomioon ottamista käsitellään ohjeessa YVL 2.6.

Nopeiden painetransienttien putkistoihin aiheuttama kuormitus on dynaamisessa analyysissä mallinnettava tapauksen mukaan klassiseen paineiskuteoriaan tai termohydrauliikkaan perustuvilla menetelmillä. Mahdollisuutta lauhtu-

misaineiskujen ja vesitulppien muodostumiseen on tarkasteltava, jos höyry ja kylmä vesi pääsevät sekoittumaan [10]. Putken katkeamisesta johtuvia kuormituksia voidaan arvioida viitteen [11] esittämällä menetelmillä. Virtauksen aiheuttamista värähtelyherätteistä sekä neste- ja rakenteen vuorovaikutuksesta annetaan ohjeita viitteissä [5h] ja [7c].

Dynaamisessa analyysissä on esitettävä lähtötietoina annetut massa- ja jäykkyysjakaumat, vaimennuskertoimet, lasketut ominaisvärähtelytaajuudet ja -muodot sekä aikaintegrointimenetelmät ja niissä käytetyt aika-astelehdit [9]. Jos malli rajataan lähes samaa suuruusluokkaa olevan massan tai jäykkyyden omaavasta alustasta tai muusta liittyvästä rakenteesta, tämä tulee perustella. Elastis-plastista materiaalmallia sovellettaessa raportista tulee ilmetä tehdyt numeerista stabiiliutta koskevat tarkastelut. Painetransienteista on esitettävä lasketut kuormitusten aikariippuvuudet sekä se periaate, jolla kuormitukset siirretään lujuusanalyysiohjelmaan. Sovellatut diskreetointimenetelmät ja kaksifaasimallit on myös selostettava.

Puristavat kuormitukset

Alipaineesta tai muusta syystä johtuvien puristavien kuormitusten alaisille painelaitteille tai niiden osille on tehtävä stabiiliusanalyysi. Siinä tulee mallintaa yksityiskohtaisesti yleistä tai paikallista stabiiliuden menetystä aikaistavat häiriötekijät, kuten valmistustoleranssien ja vaikuttavien kuormitusten aiheuttamat poikkeamat ideaalisesta muodosta. Muodonmuutosten sekä erityyppisten jännitystilojen epälineaarisen kytketymisen vuoksi mallin oikeaksi osoittamiseen on kiinnitettävä erityistä huomiota. Hyväksyttäviä menettelytapoja esitetään standardeissa [5b] ja [5f].

3.2.5 Hyväksymisrajat

Jännitysanalyysin tulosten hyväksyttävyyden arviointi riippuu sekä painelaitteen tai sen osan luokittelusta että käytetyistä analyysimenetelmistä. Kaikissa tarkasteluissa on noudatettava jännitysanalyysissä käytetyn standardin vaatimuksia ja viitattava sen sovellettuun kohtiin.

Tämän ohjeen liitteessä esitetään ohjeita ASME III:n artiklan NB 3200 mukaisista menettelyistä ja hyväksymisrajoista turvallisuusluokan 1 painelaitteiden elastisiin analyysiin.

3.2.6 Väsymistarkastelu

Toistuvien tai suuruudeltaan vaihtelevien kuormitusten alaisille painelaitteen osille on tehtävä jännitysanalyysin yhteydessä väsymistarkastelu, ellei sen sijasta osoiteta sovellettavan standardin mukaisilla konservatiivisilla tarkasteluilla, että näiden kuormitusten väsyttävä vaikutus on materiaalin väsymislujuuteen verrattuna vähäinen [5aI].

Väsymistarkastelun lähtökohtana on käytettävä kullekin materiaalille tarkasteltaviin olosuhteisiin soveltuvaa väsymiskäyrää, joka esittää harmoniselle vaihtokuormitukselle elastisessa analyysissä sallittavan jännitysamplitudin kuormanvaihtoluvun funktiona. Voimakkaan vaihtokuormituksen aiheuttamaan väsymiseen liittyy toistuva myötäminen (lowcycle fatigue), ja tällöin sallittu jännitysamplitudi vastaa kimmo kertomella kerrottua mitattua venymäamplitudia. Mikäli toistuvaa myötämistä tapahtuu paikallista rakenteellista epäjatkuvuuskohtaa laajemmalla alueella, väsymistarkasteluun on käytettävä sovellettavan standardin mukaisia elastis-plastisia menetelmiä ja niihin soveltuvia väsymiskäyriä.

Jännityskeskittymät

Paikallisten rakenteellisten epäjatkuvuuksien aiheuttamat huippujännitykset on väsymistarkastelussa määritettävä joko geometrian yksityiskohtaisella mallinnuksella tai likimääräisesti käyttäen kokeellisia väsymislajuuden alenemiskertoimia tai kimmoteoreettisia jännityskeskittymäkertoimia [12]. Mallinnustapa tai likimääräiseen menettelyyn käytetty lähde ja sen tiedot tulee selvittää. Hitsausaumojen jännityskeskittymät on arvioitava todellisen geometrian perusteella.

Lujasta teräksestä valmistettujen ruuvien jännityskeskittymäkertoimen tulee olla vähintään 4. Lisäksi pyörityssäteiden on täytettävä sovellettavan standardin vaatimukset.

Ferriittisen painelaitteen pinnoite

Ferriittisestä teräksestä valmistettujen painelaitteiden jännitysanalyysissä on tarkasteltava sisäpuolisen austeniittisen pinnoitteen suuremmasta lämpölaajenemisesta johtuvaa väsymistä. Jännitykset voidaan arvioida lämpötilajakaumien ja painelaitteen muodonmuutosten perusteella, mikäli painelaitteen laskentamalli ei sisällä pinnoitetta.

Ympäristöolosuhteiden vaikutus

Väsymistarkastelussa tulee ottaa huomioon ympäristöolosuhteiden vaikutus. Primääripiirissä käytettyjen materiaalien väsymisikään vaikuttavat muun muassa jäädytteen happipitoisuus, käyttölämpötila, materiaalin epäpuhtaudet ja kuormituksen materiaaliin aiheuttama venymänopeus [13]. Lujuusanalysiraportissa tulee esittää perustelu, mikäli ympäristövaikutteisen väsymisen tarkasteluun käytetään standardin [5e] mukaisia väsymiskäyriä, jotka perustuvat sileillä koesauvoilla kuivissa olosuhteissa suoritettuihin väsymiskokeisiin.

Väsymisljuusarvoja valittaessa on otettava huomioon myös muut väsymisnopeutta kasvattavat tekijät, kuten käyttökuormitusten aiheuttama keskimääräinen jännitystila, jäännösjännitykset ja pinnankarheus.

Ympäristöolosuhteiden vaikutus voidaan ottaa huomioon myös standardin [14] mukaisella säron kasvutarkastelulla. Määräaikaistarkastuksilla on voitava havaita luotettavasti oletetun alkusäron kokoinen materiaalivika.

Väsymiskertymä

Painelaitteisiin kohdistuu käytön aikana usean tyyppisiä väsyttäviä kuormituksia, joiden jännitysamplitudit ja jännitysjakson pituudet vaihtelevat. Väsymistarkastelussa on määritettävä painelaitteen rasitetuimmille kohdille kaikkien kuormitustyyppien yhdessä aiheuttama väsymiskertymä.

Väsymiskertymä voidaan arvioida laskemalla yhteen eri kuormitustyyppien väsytysvaikutuk-

set, jotka kukin suuruudeltaan vastaavat spesifoidun lukumäärän ja jännitysamplitudin perusteella sallittavan kuormanvaihtoluvun suhdetta. Väsymiskertymän tulee olla arvoltaan pienempi kuin yksi (Minerin hypoteesi).

Väsytyksvaikutuksia yhteenlaskettaessa on kiinnitettävä huomiota jännitysjaksojen ajoittumiseen toistensa suhteen. Jos se johtaa suurempiin jännitysten vaihteluväleihin kuin kuormitustyypit yksin esiintyessään aiheuttaisivat, on arviointia varten määriteltävä uudet laskennalliset jännitysjaksot kuormitusten eri vaiheita yhdistelemällä.

3.2.7 Onnettomuustilanteet

Laitekokonaisuuksien vaste

Painelaitteen suunnitteluperusteissa esitettävät ryhmän D käyttökuormitukset liittyvät yleensä ydinvoimalaitoksen oletettuihin onnettomuuksiin, kuten maanjäristyksiin ja putkikatkoihin. Tällaiset tilanteet kuormittavat laajojen laitekokonaisuuksien, että yksittäiseen painelaitteeseen kohdistuva kuormitus voidaan selvittää vain analysoimalla laitekokonaisuuden dynaaminen käyttäytyminen ja syntyvät muodonmuutokset (vaste).

Laitekokonaisuuden vasteanalyysi on toimitettava lujuusanalyysiraportin osana, ellei vastavaa selvitystä ole esitetty erikseen.

Vaikutukset painelaitteisiin

Onnettomuustilanteen vaikutukset yksittäiseen painelaitteeseen ja sen tuentoihin on analysoitava käyttäen laitekokonaisuuden vasteanalyysin mukaisia kuormituksia. Ensisijaisena tavoitteena on varmistaa riittävä eheyden säilyminen niin, ettei muita laitteita vaarantavia vauriokejuja pääse syntymään. Vaikutusten analyysiin tulee soveltaa painelaitetyyppejä koskevassa standardissa [5a–d] sekä viitteessä [5f] annettuja ohjeita. Hyväksymisrajat riippuvat siitä, onko analyysi elastinen vai elastis–plastinen.

3.3 Haurasmurtuma-analyysi

3.3.1 Soveltamisala

Haurasmurtuma-analyysi on tehtävä kaikkien ferriittisestä teräksestä valmistettujen turvallisuusluokan 1 painelaitteiden rasitetuimmille osille. Tärkeimpiä kohteita ovat reaktoripainesäiliön sydänalue, suurimmat putkiyhteet ja kannen laippaliitos. Mahdollisia muita haurasmurtumatarkastelua vaativia kohteita ovat painevesireaktorilaitoksen höyrystimen sekundääripuoli, teräksinen suojarakennus, primääripuurin murtumatuet sekä pääkiertopumppujen akselit ja vauhtipyörät.

3.3.2 Analyysimenetelmät

Turvallisuusluokan 1 painesäiliöiden haurasmurtuma-analyysi on tehtävä murtumismekaniikan menetelmillä. Oletettujen säröjen kriittisyyttä kuvaava jännitysintensiiteettitekijä K_I tulee laskea säröllisen rakenteen yksityiskohtaisen mallin avulla tai johtaa jännitysanalyysin tuloksista viitteen [14] mukaisella tai muulla konservatiivisella menetelmällä. Kustakin säröstä on selvitettävä turvamarginaalit sen äkillisen kasvun suhteen vertaamalla K_I :n arvoja materiaalin murtumissitkeyteen K_{Ic} . Tarkastelussa on otettava huomioon lineaaris-elastisen murtumismekaniikan tarkkuuden heikkeneminen myötävän alueen koon kasvaessa, ja tarvittaessa tulee soveltaa elastis–plastisia menetelmiä. Käytettyjen murtumismekaanisten suureiden laskentatapa on esitettävä.

Muiden kohteiden tarkastelu voi olla yksinkertaisempi ja perustua esimerkiksi alimman käytössä esiintyvän lämpötilan ja hauras-sitkeämuutoslämpötilan (transitiolämpötilan) väliseen erotukseen.

3.3.3 Sitkeysarvot

Haurasmurtuma-analyysissa tulee selvittää käytettävät K_{Ic} :n arvot ja niiden riippuvuus materiaalin lämpötilasta. Standardissa [14a] esitetään yleisimmille reaktoripainesäiliön teräslaa-

duille hyväksyttäviä arvoja ns. referenssikäyrinä. Muille teräksille käytettävät arvot on perusteltava erikseen. Transitiolämpötila on määritettävä sovellettavan materiaalistandardin mukaisesti.

Murtumissitkeys voidaan myös määrittää tekemällä viitteen [15] mukainen master-käyräsovitte painelaitteen materiaalista mitattuihin sitkeysarvoihin. Näin on erityisesti tarkistettava reaktoripainesäiliön materiaaleille sovelletut arvot. Laaduntarkastuksen tuloksena saatuja sitkeysarvoja voidaan käyttää tapauskohtaisesti ottaen huomioon teräksen epähomogeenisuuden ja suuntaisuuden vaikutus sekä koetulosten hajonta.

Haurasmurtuma-analyysissä on lisäksi otettava huomioon mahdollisesta käytön aikaisesta vanhenemisesta johtuva sitkeysarvojen aleneminen. Dynaamisissa kuormitustilanteissa myös materiaalin suuri venymänopeus heikentää murtumissitkeyttä.

3.3.4 Säteilysaurastuminen

Reaktoripainesäiliön haurasmurtuma-analyysissä on esitettävä laskennallinen ennuste neutronisäteilyn aiheuttamalle transitiolämpötilan säteilysiirtymälle. Käytön aikana ennusteen konservatiivisuudesta tulee varmistua ohjeen YVL 3.9 mukaisen säteilysaurastumisen seurantaohjelman avulla.

Säteilysiirtymän ennusteen on perustuttava teräksen seosaineiden, kemiallisten epäpuhtauksien ja nopeiden neutronien annoksen väliseen kokemukseräiseen korrelaatioon. Käytön aikana lähtökohtana voidaan käyttää myös säteilysaurastumisen seurantaohjelman tuloksiin tehtyä sovitetta. Materiaalin epähomogeenisuus ja koetuloksiin liittyvä hajonta tulee tällöin ottaa huomioon. Käytetyt arvot on perusteltava.

3.3.5 Eri lämpötiloissa sallittu paine

Haurasmurtuma-analyysissä on laskettava korkein paine, joka voidaan sallia painelaitteelle normaaleissa käyttötilanteissa eri lämpötiloissa.

Lasketut arvot tulee ottaa huomioon turvallisuusteknisten käyttöehtojen mukaista sallittua paine- ja lämpötila-aluetta määritettäessä. Lisäksi on laskettava alimmat sallitut lämpötilat painelaitteen painekokeille.

Analyysissä voidaan käyttää viitteessä [5g] esitettyjä oletettuja säröjä ja laskentamenetelmiä. Muut laskentatavat on perusteltava.

3.3.6 Häiriö- ja onnettomuustilanteet

Haurasmurtuma-analyysissä tulee tarkastella sellaiset häiriö- ja onnettomuustilanteet, joissa painelaitteen seinämä jäähtyy voimakkaasti tai painelaite voi paineistua kylmänä. Reaktoripainesäiliötä koskevassa tarkastelussa huomioon otettavia tekijöitä ovat muun muassa [16]

- hätäjähdytykseen johtavat alkutapahtumat
- laitoksen järjestelmien toiminta
- laitoksen ohjaajien toiminta
- hätäjähdytteen aiheuttama paikallisesti kylmempi alue
- virtausnopeudet ja lämmönsiirto
- paineen ja lämpötilaerojen aiheuttamat jännitykset
- pinnoitteen ja perusaineen erilainen lämpölaajeneminen ja lämmönjohtuminen
- jäännösjännitykset
- säröjen koko, muoto, suunta ja sijainti
- sitkeysarvot ja säteilysiirtymä.

Analyysi tulee tehdä tapahtumaketjujen tarkastelun perusteella äärimmäisiksi mahdollisiksi arvioituille kuormitustilanteille. Reaktoripainesäiliön määräaikaistarkastusohjelmalla on voitava havaita luotettavasti analyysissä oletetut säröt. Eri tekijät ja käytetyt lähtötiedot on perusteltava.

Hyväksymiskriteerinä on käytettävä riittävää varmuuskerrointa oletetun särön kasvamisen suhteen. Lisäperusteluna voidaan tapauskohtaisesti ottaa huomioon analyysi särönkasvun pysähtymisen antamasta turvamarginaalista.

3.3.7 Todennäköisyypohjainen analyysi

Reaktoripainesäiliön rakennesuunnitelmassa on esitettävä kohdan 3.3.6 mukaisen deterministi-

sen analyysin lisäksi vastaavat tekijät huomioon ottava riittävän yksityiskohtainen arvio haurasmurtuman todennäköisyydestä. Hyväksymiskriteerinä on vaatimus, että haurasmurtuman todennäköisyys on erittäin pieni ja vain vähäinen osa PSA:lla arvioidusta reaktorisydämen vaurioitumisen kokonaistodennäköisyydestä.

4 Lujuustekninen laadunhallinta

4.1 Laadunhallintajärjestelmä

Painelaitteiden lujuusanalyseissa on noudatettava dokumentoitua lujuusteknistä laadunhallintajärjestelmää. Luvanhakijan tai -haltijan on varmistettava ulkopuolisen toimittajan pätevyydestä ja siitä, että tämän käytettävissä on tarvittavat lähtötiedot. STUK valvoo luvanhakijan tai -haltijan sekä tärkeimpien ulkopuolisten lujuusselvitysten toimittajien toiminnan laatua tekemällä laadunvarmistusauditteja ja riippumattomia vertailuanalyyseja.

Laadunhallintajärjestelmän lähtökohtana voidaan käyttää luvanhakijan tai -haltijan yleistä laadunhallintajärjestelmää, SFS-EN ISO 9000 sarjan standardeja sekä erityisesti lujuusanalyysiin tarkoitettuja laatustandardeja [17]. Laadunhallintajärjestelmästä pitää ilmetä muun muassa seuraavat asiat:

- lujuuslaskentaa suorittavan, tarkastavan ja hyväksyvän henkilöstön pätevyydet lujuustekniikassa ja sitä tukevilla aloilla sekä asema yrityksessä
- menettelyt ja vastuut ohjelmistoja hankittaessa, ajan tasalla pidettäessä, kehitettäessä ja oikeaksi osoitettaessa
- lujuusselvitysten hankinta-, tarkastamis- ja hyväksymismenettelyt
- luotettavuusvaatimukset ja vaativiin analyysiin käytettävät menetelmät
- käytettävät tietokoneet, käyttöjärjestelmät ja tietokoneohjelmat
- dokumentointi, arkistointi ja varmuuskopiointimenettelyt.

Lujuustekniset asiakirjat on tarkastettava riippumattomasti. Luvanhakijan tai -haltijan käsit-

telyssä tarkastajana on oltava lujuuslaskentainsinööri, joka ei ole osallistunut asiakirjojen laatimiseen. Lujuuslaskentainsinöörin peruskoulutuksena vaaditaan lujuustekniikan alalta suoritettu korkeakoulututkinto. Yleisiä vaatimuksia ydinvoimalaitoksen teknisen tukihenkilöstön koulutuksesta esitetään ohjeessa YVL 1.7.

Laskennan suorittajalla tulee olla lujuustekniikkaan liittyvän peruskoulutuksen lisäksi aiemmillä analyysikokemuksilla hankittu käytännön perehtyneisyys kussakin lujuusselvityksessä tarvittaviin tietokoneohjelmiin ja analyysimenetelmiin.

4.2 Analyysimenetelmät

Primääripiirin painelaitteille ja suojarakennukselle tehtävien lujuusselvitysten on perustuttava riittävän koeteltuihin analyysimenetelmiin, jotka on kelpuutettu soveltuvilla tutkimustuloksilla. Lujuusanalyysiraporteissa tulee selvittää valittujen menetelmien perusteet, rajoitukset sekä soveltuvuus analysoitaviin tapauksiin. Tietokoneohjelmia käytettäessä on mainittava ohjelman nimi, versio ja tekijä. Ohjelman kelpuus vastaaviin tapauksiin sekä tarvittavat ohjelman piirteet tulee selvittää, ellei kysymyksessä ole tunnetun yleiskäyttöisen ohjelman soveltaminen standarditehtävään. Mikäli tällainen selvitys on aiemmin esitetty, riittää viittaus asiakirjaan tai laadunvarmistusaudittiin.

Vaativissa tapauksissa ja erikoisohjelmia käytettäessä tulee esittää laskentamallin virhearvio tai sen oikeellisuuden osoittamiseksi tehdyt vertailulaskelmat. Atk-tulosteista tulee ilmetä ohjelman suorittamat, oikeellisuuteen liittyvät tarkistukset ja varoitukset.

4.3 Lujuusanalyysirekisteri

Voimassa olevista lujuusanalyseista ja järjestelmien kuormitustilanteita koskevista selvityksistä on pidettävä rekisteriä. Rekisterin avulla on voitava selvittää luotettavasti määräaikaistarkastusohjelmissa, kuormitusten ja säteilyhaurastumisen seurantaohjelmissa sekä mahdollisissa muutostöissä tarvittavat painelaitteiden lujuustekniset tiedot.

5 Viitteet

- 1 Valtioneuvoston päätös ydinvoimalaitosten turvallisuutta koskevista yleisistä määräyksistä (395/91), 14. helmikuuta 1991.
- 2 Determination of Rupture Locations and Dynamic Effects Associated with the Postulated Rupture of Piping, Standard Review Plan 3.6.2, Rev. 1, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1981.
- 3 Leak-Before-Break Evaluation Procedures, Standard Review Plan 3.6.3, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Federal Register, Vol. 52 No. 167, Aug. 28, 1987.
- 4 Leak-Before-Break Evaluation Procedures for Piping Components, K. Ikonen et al., STUK-YTO-TR 83, Helsinki, 1995.
- 5 ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components, Division 1, the American Society of Mechanical Engineers, New York, 1995.
 - a) Subsection NB, Class 1 Components
 - I) Subarticle NB 3200, Design by Analysis
 - II) Subarticle NB 3300, Vessel Design
 - III) Subarticle NB 3400, Pump Design
 - IV) Subarticle NB 3500, Valve Design
 - V) Subarticle NB 3600, Piping Design
 - b) Subsection NE, Class MC Components
 - c) Subsection NF, Component Supports
 - d) Subsection NG, Core Support Structures
 - e) Appendix I, Design Stress Intensity Values, Allowable Stresses, Material Properties, and Design Fatigue Curves
 - f) Appendix F, Rules for Evaluation of Service Loadings With Level D Service Limits
 - g) Appendix G, Protection Against Non-ductile Failure
 - h) Appendix N, Dynamic Analysis Methods
- 6 Comprehensive Vibration Assessment Program for Reactor Internals During Preoperational and Initial Startup Testing, Regulatory Guide 1.20, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Rev. 2, May/1976.
- 7 Code for Operation and Maintenance of Nuclear Power Plants, the American Society of Mechanical Engineers, New York, 1998.
 - a) Part 3, Requirements for Preoperational and Initial Start-Up Vibration Testing of Nuclear Power Plant Piping Systems
 - b) Part 7, Requirements for Thermal Expansion Testing of Nuclear Power Plant Piping Systems
 - c) Part 11, Vibration Testing and Assessment of Heat Exchangers
 - d) Part 12, Loose Part Monitoring in Light-Water Reactor Power Plants
- 8 ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section II, Materials, Part D—Properties, the American Society of Mechanical Engineers, New York, 1995.
- 9 Finite Element Procedures in Engineering Analysis, K. J. Bathe, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, U.S.A., 1982.
- 10 HDR-tutkimusohjelman tulosten arviointi, H. Talja et al., STUK-YTO-TR 90, Helsinki, 1995.
- 11 Design Basis for Protection of Light Water Nuclear Power Plants Against Effects of Postulated Pipe Rupture, ANSI/ANS-58.2-1980, the American Nuclear Society, 1980.
- 12 Stress Concentration Factors, R. E. Peterson, John Wiley & Sons, New York, U.S.A., 1974.
- 13 Environmental Effects on Fatigue Crack Initiation in Piping and Pressure Vessel Steels, NUREG/CR-6717, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, 2001.

- 14 ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI, Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components, the American Society of Mechanical Engineers, New York, 1995.
 - a) Appendix A, Analysis of Flaws
 - b) Appendix C, Evaluation of Flaws in Austenitic Piping
 - c) Appendix G, Fracture Toughness Criteria for Protection Against Failure
 - d) Appendix H, Evaluation of Flaws in Ferritic Piping
- 15 Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T_0 , for Ferritic Steels in the Transition Range, ASTM E 1921-97.
- 16 Format and Content of Plant-Specific Pressurized Thermal Shock Safety Analysis Reports for Pressurized Water Reactors, Regulatory Guide 1.154, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Jan. 1987.
- 17 NAFEMS Quality System Supplement to BS EN ISO 9001 Relating to Engineering Analysis in the Design and Integrity Demonstration of Engineered Products, Issue 2.0, the National Agency for Finite Element Methods and Standards.

Liite: Hyväksymisrajoja turvallisuusluokan 1 painelaitteiden elastisiin jännitysanalyysihin

1 Jännitysten luokittelu

Jännitysanalyysissa lasketut jännitystilat on luokiteltava ennen hyväksymisrajojen soveltamista eri vauriomekanismien kannalta merkityksellisiin jännitystyyppihin. Menettely on toistettava kaikille tarkastelluille painelaitteen kohdille ja kuormituksille.

Sitkeän murtumisen kannalta määrääviä ovat yleiset primääriset kalvojännitykset P_m , jotka pitävät rakennetta tasapainossa siihen kohdistuvien mekaanisten kuormitusten kanssa. Sekundääriset jännitykset Q vaikuttavat yhdessä primääristen jännitysten kanssa eri tavoin lämpölaajenevien tai jäykkyydeltään erilaisten rakenneosien mukautumiseen liitoskohdissaan. Jos mukautumista ei tapahdu, seurauksena on toistuvan myötämisen aiheuttama kasvava muodonmuutos (ratcheting). Paikallisissa rakenteellisissa epäjatkuvuuskohdissa, kuten terävissä nurkissa ja lovilla tai pinnoitteessa, syntyvät huippujännitykset F puolestaan aiheuttavat toistuessaan materiaalin väsymistä. Muita jännitystyyppiä ovat putkiston lämpöliikkeiden rajoittumisesta johtuvat laajenemisjännitykset P_e sekä primäärinen taiputusjännitys P_b ja paikallinen primäärinen kalvojännitys P_L , jotka vaikuttavat mekaanisten kuormitusten aiheuttamaan paikalliseen myötämiseen.

Painelaitteen eri kohtiin vaikuttava moniakselinen jännitystila on elastisessa analyysissa reducoidava kullekin jännitystyyppille enimmäisleikkaushypoteesin mukaisiksi jännitysintensiteeteiksi S , joiden perusteella jännitystilaa verrataan materiaalin lujuusarvojen avulla ilmaistuihin hyväksymisrajoihin. Vertailu on tehtävä erikseen suunnittelukuormituksille, eri ryhmiin kuuluville käyttökuormituksille sekä koekuormituksille niiden jännitystyyppien ja lujuusarvojen perusteella, jotka sovellettava standardi

edellyttää kussakin tapauksessa otettavaksi huomioon.

Yleiskäyttöisillä tietokoneohjelmilla tehtävissä jännitysanalyysissä on selvitettävä se menettely, jolla ohjelman laskemista jännitystiloista johdetaan eri jännitystyyppien osuus sekä vastaavat jännitysintensiteetit. Käyttökuormituksista johtuvien jännitys jakaumien esitykseen tulee käyttää tärkeimpiä koordinaattiakselien suuntaisia jännityskomponentteja, pääjännityksiä ja lujuushypoteesin mukaisia vertailujännityksiä tapauksen mukaan.

2 Suunnittelukuormitukset

Suunnittelukuormituksista johtuva yleisen primäärisen kalvojännityksen intensiteetti tulee olla turvallisuusluokan 1 painelaitteiden elastisessa analyysissä pienempi kuin suunnittelujännitysintensiteetti S_m . S_m määritellään sovellettavassa standardissa tärkeimmille materiaalityypeille spesifioitun minimimyötörajan S_y ja minimimurtörajan S_u avulla. Käytännössä S_m on yleensä

- lujille teräksille $S_u/3$ tarkastelulämpötilassa
- pehmeille ferriittisille teräksille $S_y/1,5$ tarkastelulämpötilassa
- austeniittisille ruostumattomille teräksille $0,9 \times S_y$ tarkastelulämpötilassa tai $S_y/1,5$ huoneen lämpötilassa, jos tarkastelulämpötila on matala.

Suunnittelukuormitusten suhteen edellytetään lisäksi, että jännitysten P_L ja $P_L + P_b$ intensiteetit eivät ylitä arvoa $1,5 \times S_m$. Jälkimmäisessä ehdossa käytetään standardin mainitsemisissa tapauksissa pienempää kerrointa.

Sovellettaessa suunnittelukuormitusten hyväksymisrajoja ferriittiseen painelaitteeseen ei austeniittisen pinnoitteen kuormankantokykyä oteta huomioon.

3 Käyttökuormitukset

Ryhmiiin A ja B kuuluvien toistuvien käyttökuormitusten hyväksyttävyyys tulee osoittaa laskeamalla ne rajat, joiden välillä jännitysintensiiteetti vaihtelee jännitysjaksojen aikana. Eri akselien suuntaisten jännityskomponenttien suhteiden mahdollinen muuttuminen on otettava huomioon. Toistuvassa myötämässä laajeneemisjännitysten sekä jännityssumman $P_L + P_b + P_e + Q$ intensiteettien hyväksyttävä vaihteluväli on $3 \times S_m$. Suurempi vaihteluväli voidaan hyväksyä sovellettavan standardin mukaisen elastisplastisen analyysin perusteella. Väsymistarkastelussa jännityssumman $P_L + P_b + P_e + Q + F$ intensiteetin vaihteluvälin puolikas ei saa ylittää väsytykskokeiden perusteella sallittavia jännitysamplitudin S_a arvoja.

Suunnittelukuormitusten hyväksymisrajoja tulee soveltaa myös ryhmän B käyttökuormitukseen, mikäli ne aiheuttavat korkeampia primäärisiä jännityksiä esimerkiksi suunnittelupaineen ylittyessä. Tällöin voidaan S_m -arvoa korottaa 10 %.

Ryhmän C käyttökuormituksista johtuvien primääristen jännitysten intensiteeteille hyväksytään muuten samat arvot kuin suunnittelukuormitusten suhteen, mutta S_m :n tilalla voidaan käyttää 20 % korotettua arvoa tai arvoa S_y , jos se on suurempi. Ferriittisen materiaalin painekuormituksesta johtuvana P_m -jännitysintensiiteetin hyväksymisrajana on lisäksi käytettävä suurempaa arvoista $1,1 \times S_m$ ja $0,9 \times S_y$. Väsymislujuuden ylittävien jännitysheilahdusten lukumäärän tulee täyttää sovellettavan standardin vaatimukset.

Ryhmän D käyttökuormitusten vaikutuksia analysoitaessa tulee ottaa huomioon hyväksymisrajat painelaitteen ja sen tuentojen primäärisille jännityksille. Putkistojen dynaamisissa kuormitustilanteissa sallitaan jännityksen $P_L + P_b$ intensiteetille pienempi arvoista $3 \times S_m$ ja $2 \times S_y$.

Ryhmiiin A–C kuuluvat käyttökuormitukset eivät myöskään saa ylittää muodonmuutosten

suhteen spesifioituja hyväksymisrajoja eikä sovellettavassa standardissa asetettuja erityisiä hyväksymisrajoja, jotka koskevat muun muassa tuentakohtien pintapuristusta, avattavien liitosten kasvavaa muodonmuutosta, puhtaita leikkauskuormituksia sekä jännitystilan kolmiakselisuutta.

Kaikissa ryhmissä mahdollinen alipaine ja muut puristavat käyttökuormitukset tulee rajoittaa sovellettavan standardin sallimiin arvoihin. Ryhmässä D ne eivät saa ylittää kahta kolmasosaa konservatiivisella stabiiliusanalyysillä tai muulla luotettavalla tavalla selvitetystä kriittisestä lommahduskuormasta.

4 Paineokeet

Painesäiliöille, putkistoille ja pumpuille tehtävissä painekokeissa jännityksen P_m intensiteetti ei saa ylittää arvoa $0,9 \times S_y$ koelämpötilassa. Jännityksen $P_m + P_b$ intensiteetin tulee täyttää sovellettavan standardin mukaiset P_m :stä riippuvat ehdot. Mikäli painekokeita on enemmän kuin 10, ne tulee tämän lukumäärän ylittävältä osalta ottaa huomioon painelaitteen väsymistarkastelussa. Jännityssumman $P_L + P_b + P_e + Q$ intensiteetin vaihteluvälin hyväksymisrajaksi voidaan tällöin valita suurempi arvoista $3 \times S_m$ ja $2 \times S_y$, mikäli painekokeet vaikuttavat vaihteluvälin laajuuteen.

5 Hyväksymisrajat ruuveille

Ruuvien suunnittelukuormituksilla hyväksyttävä jännitys S_m on pienempi suureen $S_y/3$ tarkastelulämpötilassa ja huoneen lämpötilassa saamista arvoista. Ruuvien esikiristys-, paine- ja lämpölaajenemiskuormituksista johtuvalle poikkipinnan keskimääräiselle jännitykselle voidaan käyttökuormitusten ryhmissä A–C pitää hyväksymisrajana arvoa $2 \times S_m$. Vedosta ja taivutuksesta johtuvan maksimijännityksen arvo saa olla $3 \times S_m$, mikäli kiristys tapahtuu pysyvää vääntömomenttia aiheuttamatta. Muussa tapauksessa jännitysintensiiteetin S hyväksymisraja on $3 \times S_m$. Kuormitukset ja poikkipinta-ala on määritettävä ruuviliitoksen suunnittelussa käytetyn standardin mukaisesti.