



Alexi Toivanen

Seismisen analyysin laitosverho- käyrä

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Bio- ja kemiantekniikka

Insinöörityö

1.1.2022

Tiivistelmä

Tekijä: Aleksi Toivanen
Otsikko: Seismisen analyysin laitosverhokäyrä
Sivumäärä: 36 sivua
Aika: 1.1.2022

Tutkinto: Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma: Bio- ja kemiantekniikka
Ammatillinen pääaine: Kemian prosessitekniikka
Ohjaajat: Erytisasiantuntija Timo Leppänen
Lehtori Timo Seuranen

Ydinlaitoksen seismisen analyysin tarkoituksena on selvittää, kuinka tarkasteltavan laitoksen turvallisuudelle tärkeät rakennukset ja laitteet kestävät alueella todennäköisesti esiintyvän maanjäristyksen. Tässä insinööriyössä kuvataan todennäköisyysperusteisen seismisen analyysin työvaiheita maanjäristyksen esiintymisen ennustamisesta laitteiden kestävyysanalyysiin saakka. Työssä esitetään myös menettely rakennuksiin liittyvien suunnittelutietojen yhdistämisestä. Menettelyn tarkoituksena on yksinkertaistaa suunnittelutietojen esittämistä ja helpottaa tietojen vertailua.

Tarkasteltavalla alueella todennäköisesti esiintyvän maanjäristyksen voimakkuutta ja järjestyksen aiheuttamaa maanliikettä arvioidaan todennäköisyysperusteisella seismisellä hasardianalyysillä. Analyysin tuloksia esitetään kahdessa muodossa: hasardikäyrinä ja maavastespektrinä. Hasardikäyrät esittävät maanjäristysten toistuvuuden ja maanliikkeen kiihtyvyyden suhdetta eri luottamustasoilla. Maavastespektrin kuvaajalla esitetään maanpinnan liikettä tutkittavan maanjäristyksen aikana.

Maavastespektrin mukainen maanjäristys voidaan kohdistaa rakennuksien FEM-laskentamalleihin laskentaohjelmien avulla. Erilaisilla simulaatioilla selvitetään rakennusten maanjäristyskestävyyttä ja rakennuksissa esiintyvää liikettä laitteiden analysointia varten. Rakennusten maanjäristyskestävyyttä arvioitaessa laskentaohjelma ilmoittaa rakennukselta vaadittavia rakenteellisia ominaisuuksia, jotka rakennus vähintään tarvitsee kestääkseen maanjäristyksen aiheuttamat rasitukset. Laitteiden analysoimisessa tarvittavia rakennuksessa esiintyviä maanjäristyskiihtyvyyksiä esitetään kerrosvastespektreillä. Ne muodostetaan maanjäristysanalyysissä tavanomaisesti kerroskohtaisista kiihtyvyyksisarvoista. Kerrosvastespektrejä käytetään laitteiden kestävyysanalyysien lähtötietoina.

Rakennusten kestävyys selvityksen lisäksi toinen keskeinen seismisten analyysien tehtävistä on laitteiden kestävyysanalyysi. Kerrosvastespektrit esittävät laitteiden alustojen liikettä, vastaavasti kuten maavastespektri esittää rakennusten alustan eli maan liikettä. Rakennusten värähtely välittyy siihen ankkuroituihin laitteisiin, joiden kestävyyttä tarkastellessa rakennuksen liikkeestä aiheutuvat rasitukset huomioidaan muiden rasitusten mukana. Rakennuksen kaikkien eri korkeusasemien ja suuntien kerrosvastespektrien korkeimmat arvot voidaan yhdistää yhteen kuvaajaan, joka esittää koko rakennuksen kerrosten korkeimpia kiihtyvyyksiä.

Avainsanat: maanjäristys, seisminen analyysi, vastespektri

Abstract

Author: Aleksi Toivanen
Title: Sitewide Seismic Envelope
Number of Pages: 36 pages
Date: 1 January 2022

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Biotechnology and Chemical Engineering
Professional Major: Chemical and Process Engineering
Supervisors: Timo Leppänen, Senior Specialist
Timo Seuranen, Principal Lecturer

The purpose of a nuclear power plant's seismic analysis is to determine how the plant's safety-related buildings and secondary systems fare during a probabilistic earthquake at a specific site. This thesis describes in a simplified manner the different phases of probabilistic seismic analysis from predicting earthquakes to analysing equipment. This thesis also describes how to form an envelope spectrum that covers the acceleration spectra site's buildings. The purpose of the envelope is to simplify the display and comparison of design information.

Seismic hazard assessment estimates probable earthquake strength and ground motion. Probabilistic seismic hazard assessment results can be displayed as hazard curves and ground response spectrum. Hazard curves are a plot of annual frequency of exceedance versus spectral acceleration on certain confidence levels. The ground motion response spectrum is a graph corresponding to the predicted ground motions. The earthquake's effects represented in the ground response spectrum, together with FEM-models, can be analysed in suitable programs. The response of buildings and in buildings can be attained through different simulations and calculations. To assess the building's earthquake resistance, a structural analysis is needed. When analysing existing buildings, the data from structural analysis is compared to the structural information of the building. In-building response to the earthquake are plotted as floor response spectra through titular analysis. These graphs are usually formed from the highest acceleration values for each corresponding storey. These values are in turn used as initial data for structural analysis of the equipment.

Structural analysis is conducted on buildings and on the equipment and systems inside the buildings. The floor response spectrum or the in-structure response spectrum is used to describe the motion a secondary structure experiences in the same manner as the ground motion response spectrum is used to describe the motion a building experiences. The building's movement imposes a seismic load on equipment, which is to be accounted for in the structural analysis of these secondary structures.

The highest acceleration values of a building's floor response spectra can be compiled into an envelope. This envelope represents the greatest initial accelerations a secondary structure can experience in the specific building. If the equipment can withstand the accelerations plotted on the building's envelope, it can withstand the design basis earthquake.

Keywords: Earthquake, Seismic Analysis, Response Spectrum

Sisällys

Lyhenteet

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Johdanto | 1 |
| 2 | Viranomaisvaatimuksia | 2 |
| 2.1 | Maanjäristysluokittelu ja -kestävyyden arviointi | 2 |
| 2.2 | Suunnitteluperusteiset maanjäristykset | 4 |
| 3 | Seisminen hasardianalyysi | 5 |
| 3.1 | Yleistä | 5 |
| 3.2 | Seisminen katalogi | 6 |
| 3.3 | Lähdealuejako | 8 |
| 3.4 | Seismiset aktiivisuusparametrit | 10 |
| 3.5 | Maksimimagnitudit | 10 |
| 3.6 | GMPE-yhtälöt | 11 |
| 3.7 | Logiikkapuu | 11 |
| 3.8 | Hasardikäyrä | 13 |
| 3.9 | Maavastespektri | 14 |
| 4 | Rakennuksen vastespektrien analyysit | 16 |
| 4.1 | Yleistä | 16 |
| 4.2 | Aikahistoriat | 17 |
| 4.3 | Kuormaselvitys | 18 |
| 4.4 | 3D-malli | 19 |
| 4.5 | Kerrosvastespektrien laatiminen FEM-analyysillä | 19 |
| 5 | Rakennusten kestävyysanalyysi maanjäristyskuormalle | 23 |
| 5.1 | Analyysimenetelmät | 23 |
| 5.2 | Kestävyysanalyysi | 24 |
| 6 | Laitteiden analyysit | 26 |
| 6.1 | Standardit ja vaatimukset | 26 |
| 6.2 | Käytännön menetelmät | 27 |
| 6.3 | Analyysimenetelmät | 29 |
| 6.3.1 | Vastespektrimenetelmä | 30 |

| | |
|----------------------------------|----|
| 6.3.2 Korvausvoimamenetelmä | 31 |
| 7 Laitosverhokäyrä | 32 |
| 7.1 Verhokäyrä | 32 |
| 7.2 Rakennuskohtainen verhokäyrä | 33 |
| 7.3 Laitosverhokäyrä | 33 |
| 8 Yhteenveto | 34 |
| Lähteet | 37 |

Lyhenteet

ABS: Absolute sum. Konservatiivinen rakenteiden vasteiden yhteenlaskumenetelmä.

ASCE: American Society of Civil Engineering. Rakennustekniikkaan ja suunnitteluun keskittynyt insinöörijärjestö.

BDBE: Beyond design basis earthquake. Suunnittelumaanjärityksen ylittävä maanjäritys.

CQC: Complex-quadratic-combination. Rakenteiden vasteiden yhteenlaskumenetelmä, jota käytetään, kun vasteiden värähtelyjaksot ovat lähekkäin.

DBE: Design basis earthquake. Suunnittelumaanjäritys, jota käytetään seismisenä suunnitteluperusteena.

EPRI: Electrical power research institute. Energian tuotannon, jakelun ja tutkimuksen insinöörijärjestö.

FEM: Finite element method. Elementtimenetelmää käytetään esimerkiksi lujuusanalyseissa.

FENCAT: Fennoskandian seisminen katalogi. Seisminen katalogi, johon on sisällytetty useiden muiden seismisten katalogien tietoja Fennoskandian alueelta.

FNSN: Finnish national seismic network. Suomen seisminen katalogi.

GMPE: Ground motion prediction equation. Maanvaimennusyhtälöillä esitetään maanjärityksen värähtelyn vaimenemista maankuoressa.

HY: Helsingin yliopisto.

IAEA: International atomic energy agency. Kansainvälinen atomienergiajärjestö.

KTA: Kerntechnische ausschuss. Saksalainen ydinturvallisuuden standardeja julkaiseva järjestö.

NRC: Nuclear regulatory commission. Yhdysvaltojen ydinsäätelyjärjestö.

OBE: Operating basis earthquake. Käyttöperusteisen maanjäristyksen odotetaan toistuvan kerran sadassa vuodessa ja huomioidaan seismisesti aktiivisilla alueilla.

PGA: Peak ground acceleration. Maanpinnan huippukiihtyvyys kuvaa maanjäristyksen aiheuttamaa korkeinta maanpinnan kiihtyvyyttä tarkasteltavalla alueella.

PSHA: Probabilistic seismic hazard assessment. Todennäköisyysperusteinen seismisen hasardin analyysi.

SNSN: Swedish national seismic network. Ruotsin seisminen katalogi.

SRSS: Square root of sum of squares. Neliösummien neliöjuurta käytetään rakenteiden vasteiden yhteenlaskussa värähtelyjaksojen erotessa toisistaan vähintään 10 %.

STUK: Säteilyturvakeskus. Säteilyvalvonnasta ja ydinturvallisuusvalvonnasta vastaava viranomainen.

YVL: Ydinturvallisuusohjeet.

1 Johdanto

Tässä insinööriyössä annetaan yleistajuinen selvitys seismisen analyysin eri työvaiheista, käytetyistä menetelmistä ja tulosten tulkitsemisesta. Aiheita lähestytään ydinvoimalan maanjäristysanalyysien näkökulmasta. Työn soveltavassa vaiheessa yhdistetään seismisen analyysin pohjalta saatuja suunnittelutietoja yksinkertaisesti esitettävään muotoon. Uusi muoto helpottaa rakennusten suunnittelutietojen vertailua.

Maanjäristys syntyy, kun mannerlaattojen liikkeestä aiheutuvat jännitystilat purkautuvat. Jännitystiloja muodostuu mannerlaattojen välisestä kitkasta, kun mannerlaatat joko hankautuvat toisiaan vasten tai kulkeutuvat päällekkäin. Maaperän murtuessa mannerlaattojen välisellä siirrosvyöhykkeellä jännitystila purkaantuu vapauttaen energiaa. Vapautunut energia jakaantuu sekä maapallon läpi että pintaa pitkin niin sanottuina maanjäristysaaltoina. Näiden maanjäristysaaltojen maan pinnalla aiheuttamaa liikettä kutsutaan maanjäristykseksi. [1; 2.]

Maanjäristysten vaikutukset riippuvat useista eri tekijöistä, kuten maanjäristyksen keskuksen eli episentrin sijainnista tai maanjäristyksen voimakkuudesta. Heikkoja maanjäristyksiä ei voi havaita kuin tarkoilla mittalaitteilla, mutta pahimmillaan järistykset voivat olla erittäin tuhoisia infrastruktuurille. Voimakkaimmat maanjäristykset voivat vaurioittaa rakennuksia jopa satojen kilometrien päässä episentristä. [1; 3.]

Seismisen turvallisuuden parantamiseen käytetään seismistä analyysia. Analyysilla selvitetään maanjäristyksen vaikutuksia, ja analyysin tulosten pohjalta pyritään ennaltaehkäisemään maanjäristyksen todennäköisesti aiheuttamia vaaratilanteita. Laitosalueiden seisminen analyysi tutkii muun muassa maanjäristysten esiintymiseen liittyviä todennäköisyyksiä, rakennuksissa esiintyviä voimia ja laitteiden kestävyyyksiä. [4; 5.]

Tavanomaisesti seismisen analyysin ensimmäisiin vaiheisiin kuuluu seismisen hasardin selvittäminen. Hasardianalyysilla arvioidaan laitospaikalla potentiaalisesti esiintyvän maanjäristysliikkeen voimakkuutta ja esiintymistodennäköisyyttä. [4; 5.]

Rakennuksia analysoitaessa tarkastellaan sekä rakennukseen itseensä kohdistuvia että rakennuksen sisällä esiintyviä voimia. Rakennuksen maanjäristyskestävyyttä analysoitaessa ajatellaan maanpinnan kohdistavan voimia rakennukseen. Laitteita analysoitaessa ajatellaan rakennuksen välittävän maanpinnan värähtelyn laitteeseen. [6, s.3.]

Rakennusten ja laitteiden maanjäristyskestävyyttä määritellään yleisesti erilaisin standardein ja ohjein. Suomen ydinvoimalaitoksilla noudatetaan säteilyturvakeskuksen (STUK) ydinvoimalaitosohjeita (YVL-ohje). Niissä määritetään kaikille ydinvoimalaitoksen rakenteille, laitteille ja järjestelmille eli laitososille jokin maanjäristysluokka. [4; 7, s.2.]

Seismisen analyysin lopullinen tavoite on varmistaa, että laitososat ovat maanjäristysluokkansa vaatimusten mukaisia. Uudet laitokset, hankinnat ja rakennukset suunnitellaan maanjäristyskestävyys huomioiden. Vanhemmissa laitoksissa, joissa seismisiä suunnitteluperusteista ei ole rakentamisen aikana vielä huomioitu, seismisiä analyysejä voidaan hyödyntää muun muassa kunnostus- ja korjaustöiden yhteydessä esimerkiksi laitteiden ankkurointia tai kannakointia suunniteltaessa. [8, s.1; 9.]

2 Viranomaisvaatimuksia

2.1 Maanjäristysluokittelu ja -kestävyyden arviointi

Ydinvoimalaitoksen laitososille määritetään niiltä vaadittavan maanjäristyskestävyyden mukainen maanjäristysluokka. Käytettäviä maanjäristysluokkia on yleensä kolme tai neljä. Kansainvälinen atomienergiajärjestö IAEA käyttää maanjäristysluokkia 1, 2, 3 ja 4. Suomessa noudatettavan YVL-ohjeen mukaisia luokkia on kolme: S1, S2A ja S2B. [5; 10.]

S1-luokka sisältää ydinvoimalaitoksen primääripiirin, reaktorin painesäiliön sisäosineen, merkittävät päästölähteet, keskeisimmät turvallisuusjärjestelmät ja niiden toiminnan kannalta tarpeelliset apujärjestelmät, joita tarvitaan laitoksen turvalliseen alasajoon. S2A-luokka sisältää kohteet, jotka voivat maanjäristyksen seurauksena aiheuttaa vahinkoa S1-luokan kohteille, esimerkiksi kaatumalla tai putoamalla S1-kohteen päälle. S2A-kohteet voivat aiheuttaa vaurioituessaan vaaraa myös epäsuorasti S1-kohteelle. S2A-laitososan rikkoutuminen voi esimerkiksi vapauttaa vesi- tai höyrysiuhkun, tai palavaa aineita, minkä seurauksena S1-luokan kohteen toiminta estyy. Vauriolähteen uhkan S1-kohteelle tulee olla selkeä toimintakykyä tai tiiveyttä vaarantava tekijä. S2A-kohteiden tapaa vaikuttaa S1-kohteisiin maanjäristystilanteessa kutsutaan seismiseksi vuorovaikutukseksi. S2B-luokituksen saavat kaikki laitteet, jotka eivät kuulu S1- tai S2A-luokkaan. [4; 5.]

Laitoksissa, jotka on rakennettu ennen kuin seismistä suunnittelua ja maanjäristyskuormia edellytettiin suunnitteluperusteina, ei ole välttämättä ollut maanjäristysluokittelua. Maanjäristysluokittelu on voitu tehdä vasta paljon laitoksen rakentamisen jälkeen. Näissä laitoksissa maanjäristysluokitusta sovelletaan aikaisemmin esitettyjen määritysten mukaan, mutta S2A-luokan laitososien luokittelua voidaan suorittaa myös laitoskierroksilla. Niillä arvioidaan aikaisempien tietojen, koestuksen ja yksinkertaisten testien avulla silmämääräisesti kohteiden kestävyyttä. [5; 10.]

Yksityiskohtainen kestävyystarkastelu voidaan rajata edustavaan otantaan, mikäli tarkasteltavia kohteita on paljon. Esimerkiksi samanlaisia venttiilejä tai muita painelaitteita voi olla lukuisia. Osa on voitu sijoittaa paikalle, jossa laitetta ei pääse normaalioloissa tarkastelemaan. Laitteiden sijainti ja ympäristö vaikuttavat mahdollisiin seismisiin vuorovaikutuksiin. Seismisiä vuorovaikutuksia ei voida huomioida pelkällä otannalla, joten laitoskierroksilla kiinnitetään erityisesti huomiota tarkasteltavan kohteen ympäristöön potentiaalisten vaaratilanteiden varalta. Laitoskierroksilla S2A-luokittelu vaatii koulutetun arvioijan, joka osaa kokemusperäisen tiedon pohjalta arvioida laitteiden käyttäytymistä maanjäristystilanteessa. [4; 10.]

2.2 Suunnitteluperusteiset maanjäristykset

Suunnittelussa käytettävien suunnitteluperusteisten maanjäristysten luokittelussa noudatetaan tavanomaisesti IAEA:n turvallisuusoppaan mukaisia tasoja 1 ja 2. Tason määräytymiseen vaikuttaa, kuinka usein maanjäristyksen voidaan odottaa tapahtuvan tarkasteltavalla alueella. Voimakkuudeltaan pieniä maanjäristyksiä tapahtuu useammin, kuin suuria maanjäristyksiä. [11, s.32.]

Suunnitteluperusteisen maanjäristyksen oletetaan esiintyvän tarkasteltavalla alueella kerran tietyn ajanjakson sisällä. Tason 1 (SL-1, Seismic Level 1) maanjäristyksen oletetaan toistuvan kerran 100 vuodessa, eli järityksen toistuvuustiheys on 10^{-2} . Tason 1 maanjäristystä käytetään laitoksen käyttöaikaisen maanjäristyskestävyyden suunnitteluperusteena. Tätä tasoa kutsutaankin käyttöperusteiseksi maanjäristykseksi (OBE, Operating Basis Earthquake). Käyttöperusteisen maanjäristyksen aikana laitoksen tulee pysyä tehoajolla, eikä laitoksen toimintaa keskeytetä. OBE on käytössä esimerkiksi Japanissa. Suomen kaltaisilla matalan seismisyyden alueilla tason 1 suunnitteluperusteista maanjäristystä ei käytetä. Suomen alueella kerran sadassa vuodessa todennäköisesti esiintyvät maanjäristykset ovat voimakkuudeltaan hyvin pieniä. [10, s.17.]

Tason 2 (SL-2, Seismic Level 2) maanjäristyksen oletetaan toistuvan kerran 1000–100 000 vuodessa, eli sen esiintymistaajuus on 10^{-3} – 10^{-5} . Suunnitteluperusteisen maanjäristyksen voimakkuus riippuu tarkasteltavan alueen sijainnista. Esimerkiksi tason 2 maanjäristys on Suomessa huomattavasti erilainen kuin Japanissa, koska voimakkaammat maanjäristykset ovat Japanissa todennäköisempiä. [10, s.17.]

Rakennusten suunnitteluperusteena käytetään tavanomaisesti tason 2 maanjäristystä eli suunnittelumaanjäristystä (DBE, Design Basis Earthquake). Tällaisen maanjäristyksen esiintyessä laitos on voitava ajaa turvallisesti alas. Suomen kaltaisilla matalan seismisyyden alueilla laitokohtaisesti määritetty tason 2 maanjäristys on voimakkuudeltaan yleensä suhteellisen matala. Käytännössä Suomessa voidaan havaita tason 2 maanjäristys ihmisaistein esimerkiksi kevy-

enä tai kohtalaisena tärinä. Toisin sanoen, IAEA:n määrittelemän toistuvuusajan puitteissa Suomessa ei todennäköisesti esiinny kovin voimakasta maanjäristystä. [10; 12, s.43.]

Suomalaisen tason 2 maanjäristyksen matalan voimakkuuden takia Suomessa käytetään usein viranomaisvaatimuksissa IAEA:n suunnittelumaanjäristyksille suosittelemaa maanpinnan huippukiihtyvyyden minimivoimakkuutta 0,1 g. Maanpinnan huippukiihtyvyys (PGA, Peak Ground Acceleration) on yksinkertainen tapa kuvata maanjäristysaaltojen aiheuttaman liikkeen voimakkuutta. Esimerkiksi magnitudit kuvaavat maanjäristykseen liittyvää energiaa, mutta PGA:lla kuvataan maanjäristyksen vaikutuksia maan pinnalla. PGA kertoo tarkasteltavan alueen maan pinnalla esiintyvän suurimman kiihtyvyyden. Kiihtyvyyden yksikköä ilmaistaan usein maan putoamiskiihtyvyyden yksikkönä g tai kiihtyvyyden yksikkönä m/s^2 . [10, s.5; 13.]

Huippukiihtyvyyden minimivoimakkuuden lisäksi viranomaisvaatimuksissa voidaan edellyttää suunnittelumaanjäristyksen ylittäviin maanjäristyksiin (BDBE, Beyond Design Basis Earthquake) valmistautumista. Tällä pyritään varmistamaan laitoksen turvallinen toiminnallisuus ennalta määritettyjen, laskennallisten maanjäristysten ulkopuolellakin. BDBE:n käytöllä pyritään välttämään niin sanottua cliff edge -ilmiötä, jossa pienikin suunnitteluperustan ylittäminen johtaa laitoksen vaurioitumiseen. Käytännössä BDBE-järistysten avulla tutkitaan siis laitoksen käytöstä odotettua pahemmissa tilanteissa. [10, s.18.]

3 Seisminen hasardianalyysi

3.1 Yleistä

Seisemisellä hasardianalyysillä arvioidaan tarkasteltavan alueen maan pinnalla esiintyvien maanjäristysten voimakkuutta ja todennäköisyyttä. Seisminen hasardianalyysi tutkii, millaista maanliikettä tarkasteltavalla alueella todennäköisimmin esiintyy. Tätä maanliikettä käsitellään maanjäristysanalyysissä rakennukseen kohdistuvana ulkoisena voimana eli herätteenä. [14; 15; 16.]

Suomalaisissa ydinvoimalaitoksissa maanjäristyksen aiheuttamaa riskiä laitoksen turvalliselle toiminnalle tutkitaan todennäköisyysperusteisella seismisen hasardin analyysillä (PSHA, Probabilistic Seismic Hazard Assessment). PSHA kehitettiin 1970-luvulla maanjäristyksiin liittyvien epävarmuuksien huomioimiseen. Se perustuu ajatukseen, että maanjäristyksen sijaintia, ajankohtaa, voimakkuutta tai vaikutuksia kohdealueella ei tiedetä. [9; 16, s.5.]

Todennäköisyysperusteinen laskenta pohjautuu vaihtoehtoisten tapahtumaketjujen yhteenlaskettuihin todennäköisyyksiin. Huomioitavia tekijöitä ovat esimerkiksi magnitudi, etäisyydet kohdealueisiin, maanjäristysten lähdealueet ja toistumisajat, maanliikkeen intensiteetti ja näihin liittyvät epävarmuudet. Todennäköisyysperusteisen seismisen hasardianalyysin määrittäminen Suomen olosuhteissa sisältää seuraavat työvaiheet:

- seismisen katalogin määrittäminen
- lähdealuejako
- lähdealueiden seismisten parametrien määrittäminen
- tarkasteltavien maksimimagnitudien valinta
- logiikkaan laadinta
- maanvaimenemismallin valitseminen
- hasardianalyysi analyysiohjelmalla. [16; 17.]

3.2 Seisminen katalogi

Seismisellä katalogilla tarkoitetaan tutkittavalla alueella esiintyneistä maanjäristyksistä tehtyä luetteloa, jossa esitetään muun muassa maanjäristyksen voimakkuus, esiintymisen ajankohta ja sijainti sekä mittauksen tarkkuuteen liittyvät epävarmuudet. Seisminen katalogi voi kattaa tietoja satojen vuosien ajalta vanhoista havaintokertomuksista ennen seismisten mittalaitteistojen aikaa ja mitausajalta noin 1960-luvulta alkaen. Havaintopohjaisten maanjäristysten sijaintia pyritään arvioimaan mahdollisimman tarkasti. Historiallisen seismologian tiuk-

koja sääntöjä käyttämällä vanhempiakin maanjäristyksiä voidaan hyödyntää tietokannassa. Pidempi tarkastelu-aika mahdollistaa harvinaisten maanjäristysten etsimisen, joilla ei muuten ole nykyaikaisia vertailukohteita. [18; 19.]

Seismiseen katalogiin voidaan yhdistää tietoja useista muista seismisistä katalogeista. Suomessa analysoitavan alueen sijainnista riippuen tarkasteltavaan katalogiin voi olla perusteltua koota tietoja Suomen lisäksi myös Ruotsin itäalueiden, Baltian ja Venäjän länsialueiden seismisen historian selvityksistä. [12, s.37; 19.]

Kuvassa 1 on katkelma Fennoskandian seismisestä katalogista eli FENCAT-tietokannasta. Kuvan 1 tiedot on esitetty järjestyksessä vasemmalta oikealle: lähdeviite, tapahtuman päivämäärä, maanjäristyksen tyyppi, tapahtuman kellon-aika, episentrin koordinaatit, syvyys ja syvyyden lisätietoja, magnitudin suuruus ja lisätietoja, toisen toimijan mittaama magnitudi, aluekoodi, mittaukseen käytettyjen asemien määrä, tietoa järjestyksen esiintymiskulmasta ja pienin etäisyys mittausasemalta episentriin. [18; 20.]

| | | | | | | | | | |
|-----|-----------|----------|--------|--------|---------------|---|----|-----|-----|
| HEL | 20141218 | 071158.6 | 66.924 | 24.177 | 4F0.6L | F | 10 | 68 | 48 |
| BER | 20141218 | 140510.1 | 61.939 | 4.954 | 15 1.1L | O | 7 | 235 | 99 |
| HEL | 20141220 | 235640.1 | 65.819 | 30.065 | 22 0.5L | F | 9 | 239 | 24 |
| BER | 20141221 | 123703.3 | 66.923 | 12.849 | 7 1.4L | N | 19 | 164 | 39 |
| BER | 20141221 | 125358.8 | 67.441 | 14.104 | 3 1.0L | N | 20 | 74 | 24 |
| BER | 20141222 | 002441.3 | 61.730 | 2.828 | 1 1.6L | O | 17 | 195 | 118 |
| BER | 20141222 | 043202.1 | 61.869 | 4.843 | 15 1.4L | O | 11 | 237 | 91 |
| BER | 20141222 | 191901.9 | 57.678 | 6.710 | 23 1.9L 2.4LD | R | 15 | 203 | 79 |
| HEL | 20141223 | 192552.7 | 69.753 | 24.887 | 12 1.7L 1.5LB | N | 18 | 113 | 34 |
| HEL | 20141224a | 030218.9 | 61.050 | 27.281 | 1F1.1L | F | 12 | 122 | 36 |
| BER | 20141224 | 050731.5 | 59.632 | 5.055 | 12 1.4L | N | 20 | 187 | 49 |
| HEL | 20141225a | 022156.4 | 61.056 | 27.312 | 1F0.4L | F | 6 | 191 | 38 |
| HEL | 20141225a | 022327.1 | 61.039 | 27.288 | 1F0.3L | F | 4 | 220 | 36 |
| HEL | 20141225 | 065738.2 | 64.276 | 20.717 | 9 0.9L | S | 5 | 220 | 44 |
| HEL | 20141225a | 075900.5 | 61.053 | 27.257 | 1F0.2L | F | 5 | 219 | 36 |
| HEL | 20141225a | 101807.3 | 61.068 | 27.332 | 1F0.1L | F | 6 | 193 | 40 |
| HEL | 20141225a | 110244.5 | 61.056 | 27.303 | 1F0.4L | F | 6 | 190 | 38 |
| HEL | 20141227 | 020459.3 | 66.871 | 31.205 | 10F1.0L | U | 10 | 157 | 92 |
| BER | 20141228 | 084806.9 | 67.093 | 14.074 | 5 1.2L | N | 14 | 104 | 7 |
| HEL | 20141229 | 021415.8 | 66.074 | 23.100 | 11F-.0L | S | 5 | 169 | 27 |
| BER | 20141229 | 103803.8 | 72.743 | 4.877 | 0 2.1L | O | 13 | 223 | 485 |
| BER | 20141229 | 214105.0 | 72.679 | 4.923 | 10F2.2L | O | 8 | 348 | 600 |
| HEL | 20141229 | 224430.3 | 64.129 | 20.545 | 25 1.0L | S | 11 | 179 | 28 |
| BER | 20141230 | 020650.3 | 67.917 | 11.219 | 13 1.4L | O | 10 | 277 | 68 |

Kuva 1: Esimerkki Helsingin yliopiston ylläpitämästä seismisestä katalogista [18].

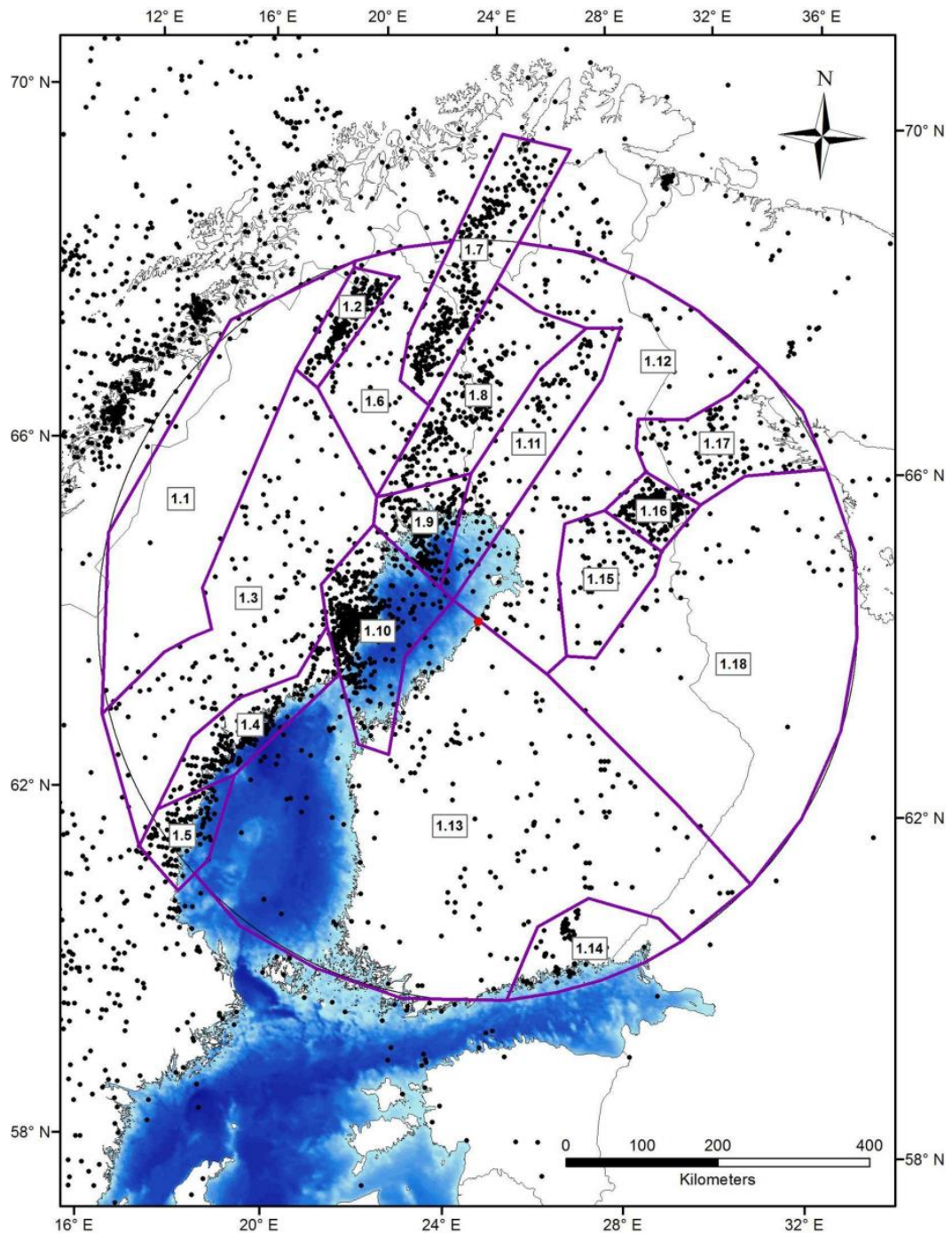
Laitospaikan seismistä hasardia määrittäessä maanjäristystiedot niin sanotusti deklusteroidaan, eli erotellaan esi-, pää- ja jälkijäristyksiin. Tavoitteena on löytää toisistaan riippumattomia tapahtumia. Maanjäristysten riippumattomuus toisistaan on tarpeellinen tieto lähdealueiden aktiivisuutta kuvaavien seismisten parametrien määrittämisessä. [19; 21.]

3.3 Lähdealuejako

Suomen maaperä on pääosin vakaata kalliota ja kaukana tunnetuista mannerlaattojen siirrosvyöhykkeistä. Tämän ansiosta Suomi on yksi maailman seismisesti rauhallisimmista alueista. Suomen kallioperän voidaan ajatella kuuluvan niin sanottuun diffuusiin seismisyyden alueeseen, eli seismisyys ei ole yhdistettävissä esimerkiksi mihinkään tiettyyn aktiiviseen siirrokseen tai ruhjeeseen. Siirrokset ja ruhjeet ovat erilaisia maaperän rakenteita, jotka mahdollistavat helpomman maanliikkeen. Esimerkiksi kallioperä voi murtua ruhjealueilla helpommin kuin muualla. [19, s.152; 22, s.50.]

Suomen kaltaisissa maissa, joissa ei ole yhtä selkeää maanjäristyksen lähdeettä, tehdään seisminen lähdealuejako. Tarkoituksena on erottaa alueet, joissa maanjäristys esiintyy eri todennäköisyydellä, kuin viereisillä alueilla. Jako tehdään tarkasteltavan alueen geologisten ominaisuuksien ja esiintyneiden maanjäristysten perusteella. [19, s.152.]

Kuva 2 esittää Helsingin yliopiston (HY) vuonna 2015 tekemää seismisen tutkimuksen ensimmäistä lähdealuejakoa Hanhikiven ydinvoimalaitospaikan lähdealueista Fennoskandiassa. Kyseisessä lähdealuejaossa käytettyyn seismiseen katalogiin kerättiin tietoja tarkasteltavan alueen kattavista FENCAT- FNSN- ja SNSN-tietokannoista. Kuvasta voi nähdä, että lähdealuejakoon voi vaikuttaa paitsi maanjäristysten esiintymisryppäät, myös maanjäristysten vähäisyys tai puute. [19, s.55.]



Kuva 2: HY:n seismisen lähdealueutkimuksessa rajattuja lähdealueita [19, s.155].

3.4 Seismiset aktiivisuusparametrit

Seismisten lähdealueiden määrittämisen jälkeen jokaiselle lähdealueelle määritetään seismistä aktiivisuutta kuvaavat aktiivisuusparametrit b ja λ . Aktiivisuusparametri b eli niin sanottu b -arvo ilmaisee tietyn suuruisen maanjäristyksen esiintymistäajuutta. Arvoa käytetään Gutenberg-Richterin laista johdetuissa laskukaavoissa. Gutenberg-Richterin lailla ilmaistaan maanjäristyksen voimakkuuden suhdetta sen esiintymistäajuuteen. Yksinkertaisesti selitettynä Gutenberg-Richterin lain mukaan maanjäristyksen magnitudin kasvaessa yhden yksikön verran, esiintyvyys pienenee kymmenesosan. Aktiivisuusparametrin b selvittämisessä hyödynnetään katalogin aineistoa ja Gutenberg-Richterin lakia. [23.]

B -arvon lisäksi seismiselle hasardianalyysille tärkeä parametri on λ , joka ilmaisee tietyllä kohdealueella tapahtuvien eri kokoisten maanjäristysten määrää tietyssä ajanjaksossa. Ajanjakso voi olla esimerkiksi vuosi. Deklusteroitu katalogi on tarpeellinen λ :n selvittämiseksi, sillä λ :n laskennalliset perusteet edellyttävät maanjäristysten riippumattomuutta. [23.]

3.5 Maksimimagnitudit

Lähdealuejaossa määritetään myös lähdealueilla todennäköisesti esiintyvien maanjäristysten suurimmat voimakkuudet. Suomessa käytettyjä suurimpia magnituteja m_{\max} ovat olleet esimerkiksi magnitudit 5,5, 6,0, 6,5 ja 7,0 [24, s.4]. Voimakkuuksien arviointiin on useita menetelmiä, joista viimeaikaisimpia ovat esimerkiksi Kijkon tai EPRI:n (Electrical Power Research Institute) julkaisussa kuvatut menetelmät [25; 26].

Suurimman magnitudin määrittämiseen käytetään usein aktiivisuusparametrejä ja Gutenberg-Richterin laista johdettuja funktiota. Laskukaavojen avulla suurimmille magnituteille annetaan suhteellinen todennäköisyys, jolla voimakkuuksien odotetaan esiintyvän. Gutenberg-Richterin lain mukaisesti pienempiä maanjäristyksiä esiintyy useammin, joten esimerkiksi m_{\max} 5,5 esiintymisen suhteellinen painoarvo on suurempi kuin m_{\max} 7,0. [25; 26; 27.]

3.6 GMPE-yhtälöt

Seismisen hasardianalyysin tavoite on kuvata maanliikkeen kiihtyvyyksivaikutuksia laitospaikalla. Maanjäristyksen aiheuttama liike johtuu maankuoren värähtelystä, jota esiintyy useilla eri taajuuksilla. Jokainen taajuus vaimenee omalla tavallaan. Maanliikkeettä ennustavat vaimennusyhtälöt (GMPE, Ground Motion Prediction Equations) arvioivat maanliikkeen kiihtyvyyden vaimennusta järjestyksen episentristä tarkasteltavaan pisteeseen. GMPE-yhtälöiden perusteella voidaan määrittää magnitudiltaan erisuuruisten maanjäristysten eri taajuuskomponenttien vaimenemista. GMPE-yhtälöillä voidaan toisin sanoen ennustaa, millälaisia maanjäristyksen vaikutukset tarkasteltavalla alueella ovat. [23; 24, s.2.]

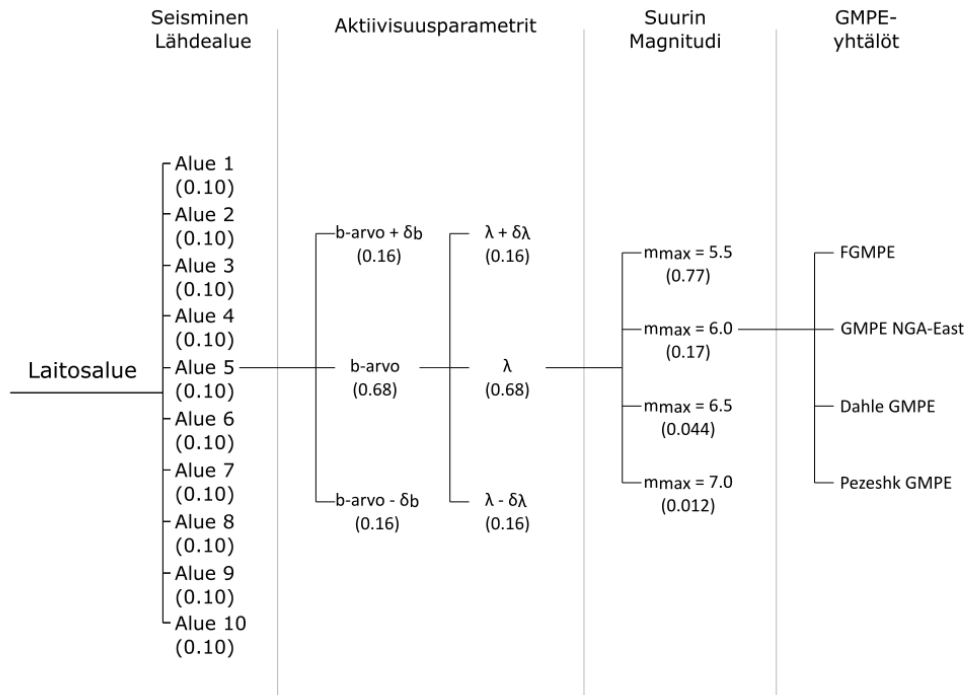
Erilaisia GMPE-yhtälöitä on maailmanlaajuisesti useita kymmeniä. Käytettävän yhtälön valintaan vaikuttavat tarkasteltavan alueen maaperän ominaisuudet. Fennoskandian alueelle on esimerkiksi kehitetty oma GMPE-yhtälö FGMPE. Toinen esimerkki Suomen kovan kallioperän olosuhteisiin soveltuvasta yhtälöstä on Pohjois-Amerikassa laadittu GMPE NGA-East. [23; 28.]

3.7 Logiikkapuu

Logiikkapuu on jäsentelytyökalu, jolla voidaan selvittää tapahtuman kaikki mahdolliset lopputulokset ja lopputulokseen vaikuttaneet tekijät. Alkutilanteesta lähdettäessä logiikkapuu jakautuu valintapoluiksi, joita nimitetään oksiksi. Oksien haarautuvia valintoja kutsutaan puun niveliksi tai solmuiksi. Jokaisella solmulla voi olla erilainen valinnan suhteellista todennäköisyyttä esittävä painoarvo. Logiikkapuun oksat voidaan jakaa tasoihin, joilla tarkoitetaan valintapolulla esiintyneiden valintojen määrää. Esimerkiksi logiikkapuun kolmas taso vastaa valintapolun kolmansia solmuja. Oksan päässä olevissa lehdistä huomioidaan kaikki valintapolussa esiintyneet arvot tai tapahtumat, jolloin jokin lopputulos eli lehti voi muodostua toista todennäköisemmäksi. [29.]

Seismisessä hasardianalyysissä lehdet vastaavat yhtälöitä, joiden muuttujat määräytyvät valintapolulla esiintyneiden arvojen mukaan. PSHA:n logiikkapuu-

hun kerätään maanjäristysten esiintymiseen ja niiden voimakkuuteen vaikuttavat tekijät ja tekijöihin liittyvät epävarmuudet. Tällaisia tekijöitä ovat esimerkiksi aikaisemmin kuvatut lähdealuejako, aktiivisuusparametrit ja suurimmat magnitudit (kuva 3). [23; 24, s.29; 30.]



Kuva 3: Rajattu esitys logiikkapuun polusta GMPE-lehtiin asti. [23; 24, s.29, muokattu]

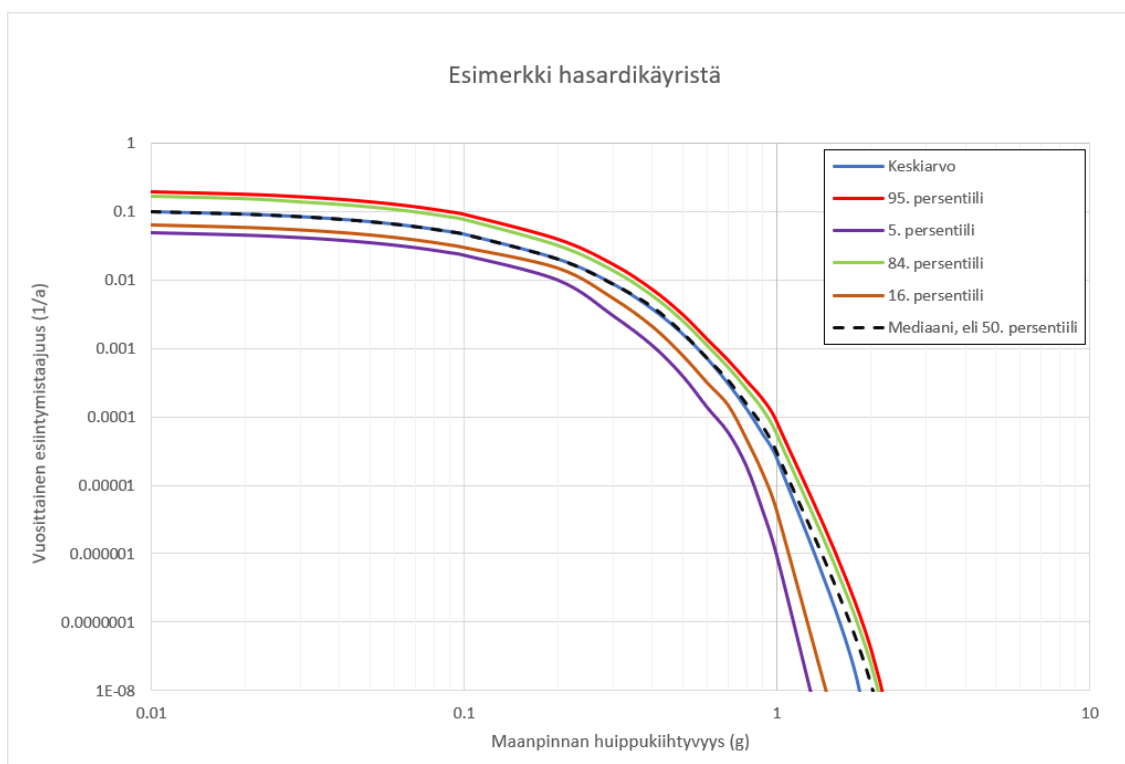
Logiikkapuun jokainen polku johtaa GMPE-lehteen, jonka yhtälössä käytetään polun parametrejä. Logiikkapuun oksat kuvaavat vaihtoehtoisia laskentamalleja ja parametrien arvoja. Jokaiselle solmulle annetaan oma todennäköisyyspohjainen painoarvo, joka vaikuttaa polun valintaan. Painoarvot esittävät solmun valintojen suhteellisia todennäköisyyksiä, joten yhden haarautuman vaihtoehtojen yhteenlaskettu todennäköisyys on aina 1,0. Seismisen hasardianalyysin logiikkapuun jakautuu tyypillisesti viiteen tasoon, jotka kuvaavat lähdealueiden, seismisten parametrien, suurimman magnitudin ja GMPE-yhtälöiden todennäköisyyksien painoarvoja. [23; 24, s.29.]

3.8 Hasardikäyrä

Käytännössä seismisen hasardin arviointi tarkoittaa tarkasteltavalla alueella tapahtuvan maanliikkeen todennäköisyyden ja siitä aiheutuvan riskin arviointia. Logiikkapuuhun kerättyjä tietoja käytetään hasardilaskennassa, jonka tulosten perusteella laaditaan hasardikäyriä. Hasardikäyrät esittävät eri luottamustasoilla maanjäristyksen aiheuttaman kiihtyvyyden esiintymistäajuutta tietyllä kiihtyvyyden taajuudelle. [6.]

Maanjäristyksen eri taajuiset värähtelyt aiheuttavat erilaisia kiihtyvyyksiä tarkasteltavalla alueella. Teoriassa seismiset hasardikäyrät voidaan piirtää kaikille tutkittaville taajuuksille 0–100 Hz, mutta tavanomaisesti rajoitutaan piirtämään hasardikäyrät esimerkiksi taajuuksille 1, 5, 10, 25, 50 ja 100 Hz. YVL B.7-ohje edellyttää hasardikäyrän piirtämistä vähintään PGA:ta vastaavalle taajuudelle [13]. 50–100 Hz:n taajuuden katsotaan vastaavan maanpinnan huippukiihtyvyyden hasardikäyrää. [9; 23.]

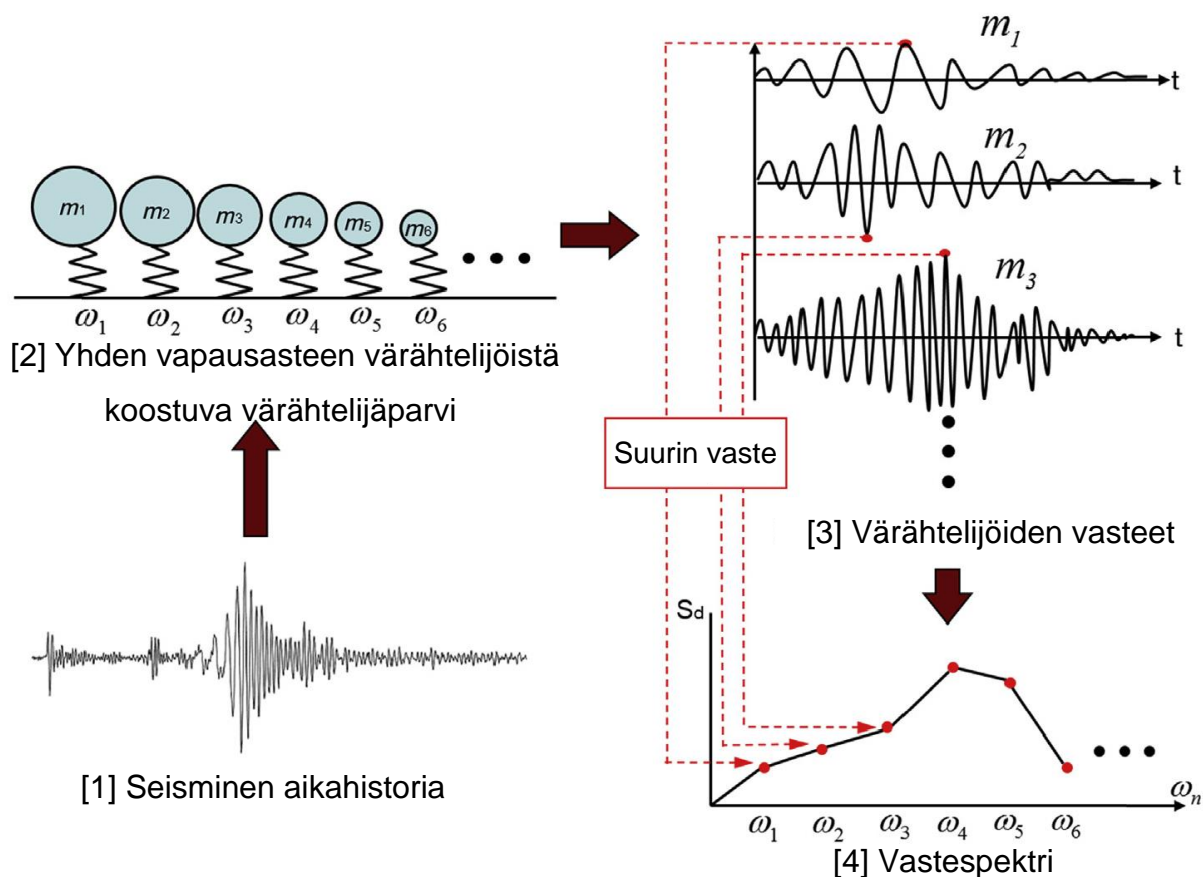
Hasardikäyrien kuvaajan vaaka-akselilla on tavanomaisesti valittua taajuutta vastaavia kiihtyvyyksiä. Pystyakselilla käytettävät arvot esittävät joko ylittymistodennäköisyyttä tai vuosittaista esiintymistäajuutta. Hasardikäyrillä voidaan siis esittää kiihtyvyyksisarvoja, jotka ylittyvät pystyakselilla ilmoitettujen todennäköisyyksien mukaan tietyllä ajanjaksolla, esimerkiksi 10 000 vuoden aikana. Yhdysvaltojen ydinsäätelykomissio (NRC, Nuclear Regulatory Commission) on turvallisuusmääräyksessään käyttänyt vuosittaista esiintymistäajuutta, joka ilmaisee, kuinka usein maanjäristys toistuu vuodessa [31, s.4]. IAEA ohjeistaa piirtämään käyrät tavallisesti luottamustasoille 5 %, 16 %, 50 %, 84 %, 95 % ja keskiarvolle, kuten kuvassa 4 on esitetty. Esiintymistäajuuden arvoista tarkastellaan tavanomaisesti väliä 10^{-2} – 10^{-8} a⁻¹ eli toistuvuusajoja välillä 1/100–1/100 000 000 vuotta. [6, s.92; 11, s.49; 13.]



Kuva 4: Esimerkki hasardikäyrästä.

3.9 Maavastespektri

Maavastespektri esittää nimensä mukaisesti, kuinka maanpinta reagoi maanjäristyksen aiheuttamaan värähtelyyn eli kuvaa maan vastetta seismiseen herätteeseen. Vastespektrejä laadittaessa tarkasteltavan kohteen, kuten maanpinnan tai rakennuksen lattian, voidaan ajatella muodostuvan joukosta erilaisia värähtelijöitä (kuva 5). Yhdessä näitä värähtelijöitä voidaan kutsua värähtelijäparveksi. Jokainen tämän joukon värähtelijöistä on yhden vapausasteen värähtelijä, eli se voi liikkua edestakaisin vain yhteen suuntaan. Edestakainen liike tarkoittaa, että tarkasteltavan pisteen nopeus muuttuu liikesuunnan vaihtuessa eli värähtelijä kiihtyy. Jokaisella värähtelijällä on ominaistajuuus, jota vastaava maanjäristyksen värähtely aiheuttaa värähtelijässä kaikkein voimakkaimman liikkeen. [5; 9; 32.]



Kuva 5: Vastespektrin muodostaminen aika-kiihtyvyysherätteestä ja yhden vapausasteen värähtelijöistä [32, s.832, muokattu].

Kohdistettaessa värähtelijäparven värähtelijöihin yksi kerrallaan seismisen herätteen mukainen liike jokaisen värähtelijän kiihtyvyysherätteen mukainen liike voidaan ratkaista, ja esittää aika-kiihtyvyysskuvaajan avulla. Jokainen värähtelijä kokee seismisen herätteen aiheuttaman värähtelyn eri tavalla, koska niillä on erilaiset ominaistajuuudet. Jokaisen värähtelijän korkein kiihtyvyyssarvo edustaa kyseisen värähtelijän kokemaa suurinta arvoa maanjäristysherätteestä ja tulee pisteeksi vastespektrin kiihtyvyyss- ω -kuvaajaan. [32.]

Seismisessä analyysissä keskitytään kiihtyvyysherätteisiin. Kohteeseen vaikuttavan kiihtyvyyden ja massan avulla voidaan dynamiikan toisen peruslain $F=ma$ mukaan selvittää kohteeseen vaikuttavat voimat. Maavastespektrillä kuvataan seismisen hasardin hazardikäyrästä esittämällä kiihtyvyyss useille taajuuksille samanaikaisesti [13].

Hasardikäyrien tapaan myös maavastespektri voidaan esittää esiintymistajuutta 10^{-2} – 10^{-8} a^{-1} ja luottamustasoille 5 %, 16 %, 50 %, 84 % ja 95 %. Rakennusten ja laitososien analyyseissa käytetään yleensä esiintymistajuutta 10^{-5} ja mediaanin tai keskiarvon mukaista luottamustasoa. [11, s.49; 13.]

Seismisen hasardianalyysin maavastespektrin arvot eivät välttämättä yllä viranomaisvaatimuksissa esitetyille suunnitteluperusteisten arvojen vähimmäistasolle. Tällöin arvoja täytyy käsitellä, jotta niitä voidaan hyödyntää suunnittelussa. Mikäli hasardianalyysin maavastespektrin PGA-taajuutta vastaava kiihtyvyys ei saavuta haluttua vähimmäisarvoa 0,1 g, kaikkia spektrin kiihtyvyyden arvoja skaalataan ylemmäksi. Skaalauskerroin on kaikille taajuuksille sama eli se, jolla PGA:ta vastaavaa kiihtyvyyttä kerrotaan arvoksi 0,1 g. [13; 11, s.6.]

4 Rakennuksen vastespektrien analyytit

4.1 Yleistä

Rakennuksen sisältämien S1- ja S2A-laitteiden on kestettävä suunnittelumaanjärjestyksen aiheuttama kuorma, jotta ne säilyttävät niiltä vaaditun toimintakyvyn maanjärjestyksilanteessa. Maanjärjestyksen aiheuttama liike maan pinnalla, rakennuksissa ja laitososissa on kolmiulotteista ja näennäisesti satunnaista. Maanjärjestyksen aiheuttamat kuormat koostuvat kahdesta vaakasuuntaisesta X- ja Y-akselien suuntaisesta sekä pystysuuntaisesta Z-akselin suuntaisesta komponentista. [4; 5; 7.]

Maavastespektri ei kuitenkaan riitä kuvaamaan rakennuksen eri korkeusaseilla sijaitseviin laitteisiin kohdistuvaa värähtelyä, koska rakennuksen geometria ja materiaali vaikuttavat maanjärjestyksen aiheuttamaan värähtelyyn. Laitteiden vasteen analysoimiseen tarvitaan tieto, mitä maanjärjestyksen värähtelylle tapahtuu rakennuksessa. Kerrosvastespektri kuvaa, mitä maanjärjestyksen värähtelylle tapahtuu rakennuksessa. Rakennus yleensä vahvistaa maavastespektrissä esitettäviä kiihtyvyyksiä. [4; 5.]

Deterministisessä analyysissä rakennuksen laattojen ja seinien kerrosvastespektrien laskenta perustuu laitospaikan suunnittelumaavastespektriin. Lisäksi tarvitaan tiedot rakennuksen geometriasta ja materiaaliominaisuuksista sekä muista rakennukseen vaikuttavista kuormista [6, s.102]. Vasta näiden tietojen jälkeen voidaan suorittaa analyysiohjelmalla kerrosvastespektrianalyysi.

4.2 Aikahistoriat

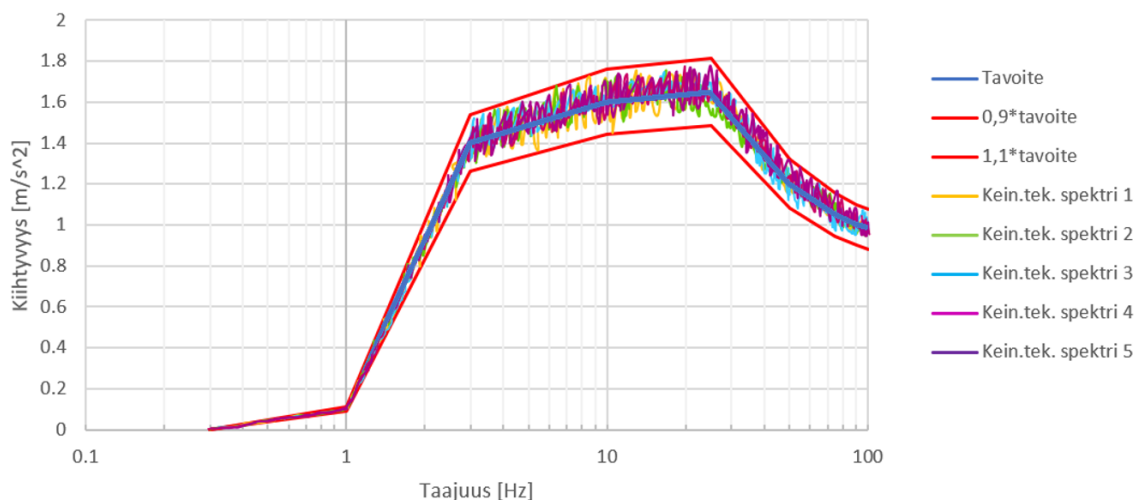
ASCE (American Society of Civil Engineering) 4-16-standardi suosittelee ydinvoimatekniikassa käyttämään aikahistoria-analyysia kerrosvastespektrien laatimisessa [9]. Aikahistorian avulla voidaan esittää maanjäristystä ajasta riippuvaisena dynaamisena ilmiönä. Kyseessä on kuvaajatyyppejä, jolla voidaan esittää maanjäristyksen aiheuttamaa liikettä tarkasteltavassa kohteessa ajan funktiona. Seismisissä analyyseissä käsitellään tavanomaisesti aika-kiihtyvyysskuvaajia eli kiihtyvyyssaikahistorioita. [13.]

Suunnittelumaanjäristystä vastaavista todellisista maanjäristyksistä on harvoin tarpeeksi tietoa luotettavan kiihtyvyyssaikahistorian laatimiseksi. Tällöin suunnittelumaavastespektrin pohjalta luodaan laskentaohjelman avulla keinotekoinen kiihtyvyyssaikahistoria. Suunnittelumaanjäristyksen tiedot syötetään esimerkiksi SIMQKE-laskentaohjelmaan, joka luo lähtötietojen perusteella satunnaisen kiihtyvyyssaikataulukon. Taulukko on 20 s pitkä ja aika-askel on 2 ms. [7, s.28; 33.]

Yhden keinotekoisien kiihtyvyyssaikahistorian käyttö ei kuitenkaan anna riittävän luotettavaa lopputulosta. Standardissa KTA 2201.1 vaaditaan vähintään kolmea kiihtyvyyssaikahistoriaa pysty- ja vaakasuuntaiselle liikkeelle. ASCE 4-16 vaatii viittä kiihtyvyyssaikahistoriaa eri suuntaisille liikkeille, eli standardien vaatimusten täyttämiseksi tulee laatia viisi X-, Y- ja Z-suuntaista kiihtyvyyksiä kuvaavaa erilaista aikahistoriaa. Näiden keinotekoisien aikahistorioiden tulee olla satunnaisia ja toisistaan riippumattomia. [9; 34.]

Keinotekoisien kiihtyvyyssaikahistorioiden pohjalta luodut vastespektrit eivät saa poiketa liikaa alkuperäisestä maavastespektristä. Ero tavoite- eli suunnittelumaavastespektriin saa olla esimerkiksi standardin KTA 2201.1 kohdan 4.3.3 (2)

mukaan enimmillään 10 %. Käyrien vertailua on esitetty kuvassa 6, jossa on esitetty 10 % ylä- ja alarajat. [34.]



Kuva 6: Esimerkki keinotekoisten aikahistorioiden sovittamisesta suunnittelu- maavastespektriin.

Keinotekoisia kiihtyvyyssajakahistorioita käytetään kuvaamaan maanjäristyskuor- maa FEM-laskentamallissa (FEM, Finite Element Method). Kiihtyvyyssajakahisto- riat kohdistetaan laskentaohjelmassa rakennuksen malliin. Ne toimivat maanjä- ristyskuormaa kuvaavana herätteenä rakennuksen alustaan. [35.]

4.3 Kuormaselvitys

Rakennuksen kuormitustiedot ovat tarpeellisia sekä rakennusten kestävyysana- lyyseille että kerrosvastespektrien analyyseille. Rakennuksen kuormituksia ovat maanjäristyskuorman lisäksi tavanomaisesti rakennuksen ja laitteiden oma- paino, maanpaine, rakennuksen hyötykuormat, tuulikuormat, lumikuormat ja prosessista aiheutuvat kuormat. Kerrosvastespektrin analyysimallissa otetaan huomioon massoina näistä kuormista rakennuksen ja laitteiden omapaino, 25 % lumikuormasta ja tarvittaessa osuus hyötykuormasta. [36.]

Kerrosvastespektrien analyysissä rakennusten laattoihin ja seiniin kohdistuvia massoja tarkastellessa huomioidaan laitteiden sijainnit, kiinnitykset, massat ja jäykkyys. Painavat laitteet, kuten isot pumput, moottorit ja säiliöt, huomioidaan

erillisinä massapisteinä kerrosvastespektriä laadittaessa. Pienet laitteet huomioidaan erillisessä tasomassassa. [36.]

Laitteiden ja irrallisten rakenteiden massoista ei aina ole tarkkaa tietoa. Tällöin massojen määrittelyssä voidaan käyttää erilaisia standardeja ja laitevalmistajan tietokantoja. Tarvittaessa laitososien massoja voidaan selvittää laitoskierroksilla suoritettavilla arvioinneilla. [36.]

4.4 3D-malli

Kerrosvastespektrin laskentaan tarvitaan muiden lähtötietojen lisäksi 3D-malli analysoitavasta rakennuksesta. Tämä malli voidaan luoda joko itse analysointiohjelmalla tai tehtävään sopivalla CAD-ohjelmalla. Erillistä CAD-ohjelmaa käytettäessä on varmistettava, että malli voidaan siirtää luotettavasti analyysiohjelmaan. 3D-malli laaditaan tyypillisesti joko laserkeilausaineiston tai rakennuspiirustusten pohjalta. [37.]

Toisinaan etenkin CAD-ohjelmilla tehdyt mallit sisältävät liian paljon yksityiskoh-
tia soveltuakseen suoraan analyysissä käytettäväksi laskentamalliksi. Tarvittaessa 3D-mallista muokataan elementtimenetelmälle laskentamalli, joka on muo-
doiltaan yksinkertaistettu tilavuus- tai kuorimalli. Elementtimenetelmässä tarkas-
teltava kohde jaetaan pienempiin analysoitaviin elementteihin. [38, s.1–2, s.25.]

Tilavuuselementtejä käytettäessä matalat kynnykset, korotukset tai muut vas-
taavat rakenteet voivat vaikeuttaa elementtijakoa. Näitä analyysiohjelmalle han-
kalia rakenteita muokataan, täytetään tai poistetaan ennen mallin viemistä ana-
lyysiohjelmaan. Muutoksia tulee tehdä maltillisesti, jotta mallinnetun rakennuk-
sen rakenteellisia ominaisuuksia ei muuteta merkittävästi. [38, s.10–13.]

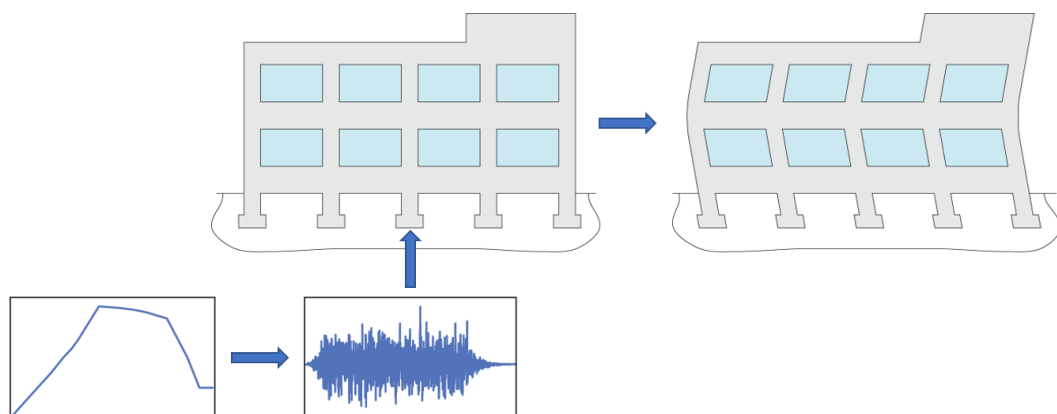
4.5 Kerrosvastespektrien laatiminen FEM-analyysillä

Kerrosvastespektrit laaditaan FEM-ohjelmalla. Tarkasteltavan rakennuksen CAD-malli tuodaan FEM-analysointiohjelmaan, jossa se jaetaan verkotusvai-
heessa solmuista ja niiden välisistä muotofunktioista koostuviin elementteihin.

Rakennuksen FEM-mallissa analysoitavien elementtien ja solmujen lukumäärä voi olla jopa miljoonia riippuen käytetyn elementin koosta ja tyypistä. [35.]

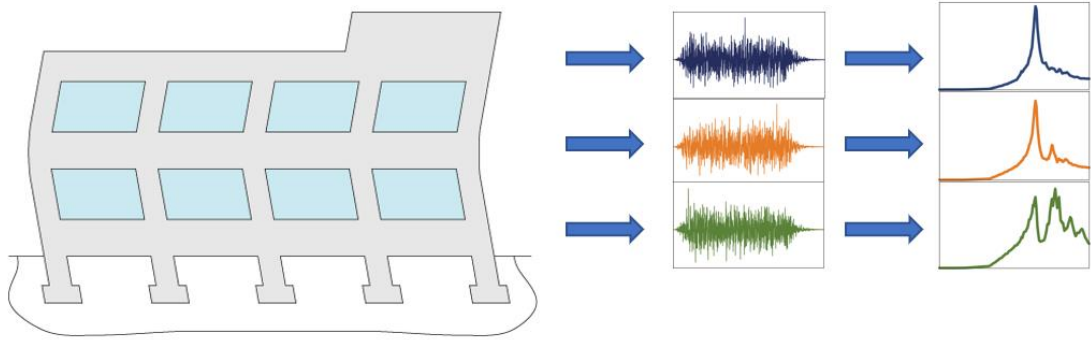
Jokaiselle elementille määritetään materiaaliominaisuudet ja malliin lisätään laitteiden, jälkivalujen, lumen ja hyötykuormaosuuden massatiedot. Tarkasteltavan rakennuksen ollessa paikallaanvalettu teräsbetonirakennus määritetään materiaaliominaisuudet rakennuksessa käytetyn betoniluokan mukaisesti. [35.]

Analyysiohjelmassa rakennuksen ja kallion rajapintaan eli rakennuksen pohjalaattaan tai anturoihin (kuva 7) kohdistetaan aikahistorioiden mukaiset kiihtyvyyss-aikaherätteet. Ohjelma analysoi rakennuksen ominaismuotoihin perustuvalla moodisuperpositioperiaatteella rakennuksen vastetta aikahistorian kuvaamassa maanjäristyksessä. [35.]



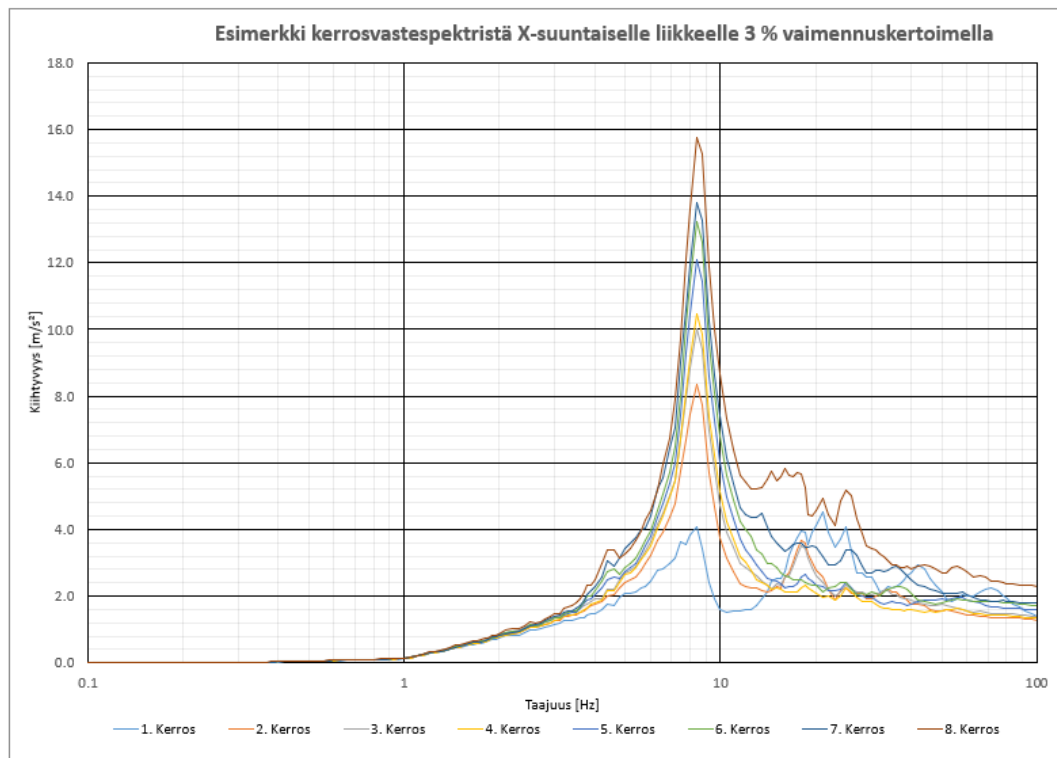
Kuva 7: Maavastespektristä muodostetaan kiihtyvyyss-aikahistoria, joka kohdistetaan rakennuksen anturoihin (kuvassa) tai pohjalaattaan laskentaohjelmassa.

Kerrosvastespektrianalyyseissa FEM-ohjelma laskee pyydetyille solmuille vasteen maanjäristystä vastaavalle kiihtyvyyss-aikaherätteelle. Solmut valitaan rakennuksen kerrostasoilta laatoista ja näiden välisistä seinistä. Solmuista saaduista kiihtyvyyss-aikahistorioista muodostetaan vastespektri. Yhden kerrostason laattojen tai seinien lukuisten solmujen vastespektrit voidaan yhdistää kuvaamaan koko kerrostason vastespektriä (kuva 8). Vastespektrejä muodostetaan vaimennuskertoimen 0,02–0,15 mukaisille arvoille. ASCE 4-16 mukaisesti suunnittelussa tavanomaisin vaimennuskertoimen on 0,05 eli 5 %. [9, s.5; 35.]

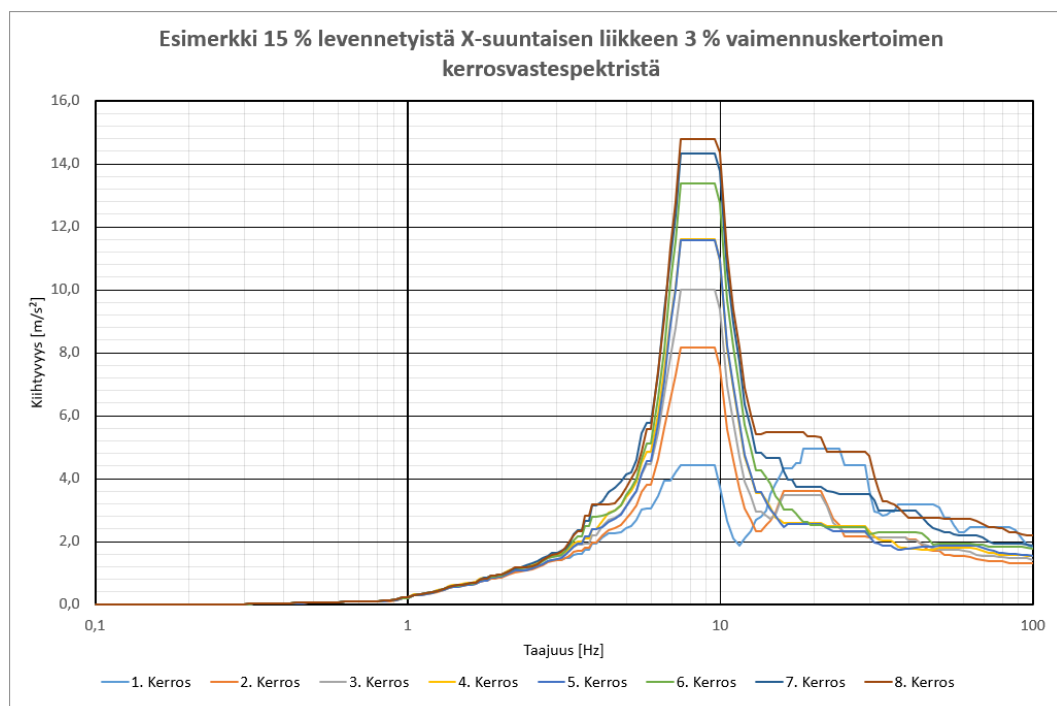


Kuva 8: Kerrosvastespektrianalyysin kuvaajien muodostamisen järjestys. Vasemmalta oikealle: Rakennus, kerroksen kiihtyvyyssaikeahistoria ja siitä laadittu kerrosvastespektri.

Kuva 8 esittää kerrosvastespektrin muodostamista. Kerrosvastespektrissä esiintyvät huiput vastaavat rakenteiden ominaistajuuksia, joilla värähtely rakennuksessa voimistuu. Levittämällä kuvaajien taajuuksia 15 % kuvaajaan saadaan laakeita huippuja, jotka kattavat analyysissä esiintyvät epävarmuudet. Käytännössä käyrien taajuuksien levittäminen tarkoittaa, että valitun taajuuden kiihtyvyyden sijaan etsitään 15 %:n päässä olevista taajuuksista korkeinta kiihtyvyyssarvoa. Esimerkiksi 50 Hz:n kohdalla esiintyvän kiihtyvyyden sijaan käytetäänkin suurinta kiihtyvyyttä, joka esiintyy taajuusvälillä 42,5–57,5 Hz. Kuvassa 10 esitetään kuvan 9 spektristä levennetty spektri. [7; 39.]



Kuva 9: 3 %:n vaimennuskertoimen kerrosvastespektri X-suuntaiselle liikkeelle.



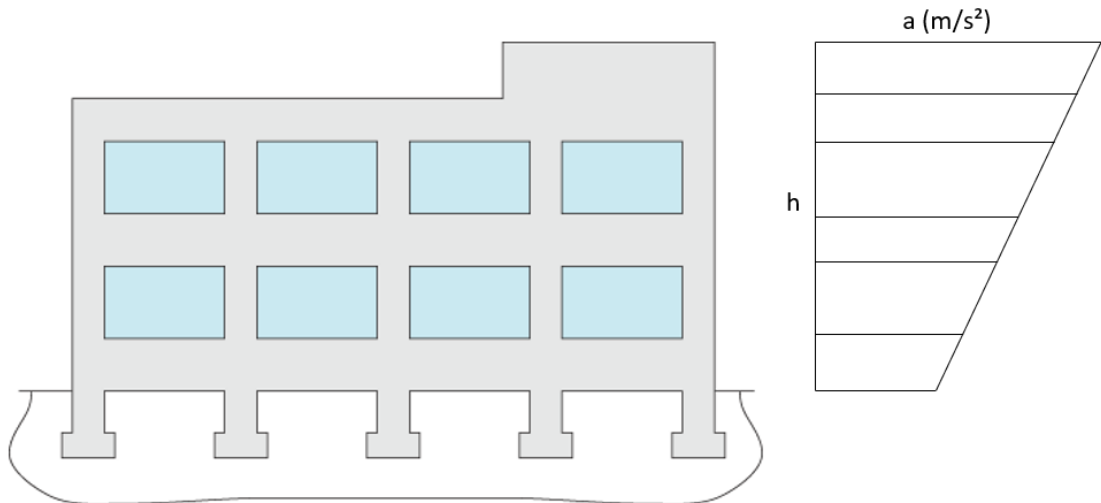
Kuva 10: Levennetty 3 %:n vaimennuskertoimen kerrosvastespektri X-suuntaiselle liikkeelle.

5 Rakennusten kestävyysanalyysi maanjäristyskuormalle

5.1 Analyysimenetelmät

Rakennusten kestävyysanalyysissä käytetään kerrosvastespektrianalyysien tapaan FEM-laskentaohjelmaa ja rakennuksen kuormitustietoja. Laskentaohjelma analysoi eri kuormitusyhdistelmät, jolloin saadaan selville voimasuureet ja tarvittava rauditusmäärä. Analyysin avulla saadaan selville esimerkiksi, kuinka suuri rauditusmäärä betonirakennuksessa tulisi olla, jotta rakennus kestäisi maanjäristystilanteessa. Olemassa olevissa rakennuksissa tätä vaadittua rauditusmäärää verrataan rakennuksessa käytettyyn päärauditusmäärään, ja vertailun pohjalta voidaan arvioida, kestäkö rakennus. Varsinainen kestävyysanalyysi on tavanomainen teräsbetonirakenteen staattinen mitoitus tehtävä. Maanjäristyskuorma on tällöin analyysissä yksi staattinen kuorma, vaikka sen selvittäminen on alun perin dynaaminen tehtävä. [40.]

Maanjäristyskuorman analyysitekniikoita on muutama. Tavanomaisesti käytetään vastespektrimenetelmää. Sen avulla saadaan rakennuksen kullekin korkeusasemalle maanjäristystä vastaava staattinen korvausvoima. Vastespektrimenetelmässä lasketaan rakennuksen ominaistaajuudet ja määritetään maavastespektriin perustuen kunkin korkeusaseman kiihtyvyydet X-, Y- ja Z-suunnissa. Eri ominaismuoto-osuudet summataan tavanomaisesti SRSS-menetelmällä (Square root of sum of squares). Tällöin suurin vaste saadaan menetelmän nimen mukaisesti muotojen vasteiden neliöiden summan neliöjuuresta. Kerrosten kiihtyvyyksien perusteella voidaan piirtää kiihtyvyysoprofiili X-, Y- ja Z-suunnissa. Esimerkki kiihtyvyysoprofiilista on esitetty kuvassa 11. [9, s.32; 41, s.104.]



Kuva 11: Rakennuksen kiihtyvyysoprofiili.

Toinen tapa määrittää korkeusasemien kiihtyvyydet perustuvat laskettuihin kerrosvastespektreihin. Kerrosvastespektreistä poimitaan kunkin kerroksen korkeaa taajuutta eli esimerkiksi noin 100 Hz:ä vastaava kiihtyvyys kuvaamaan kerroksen mukaisen korkeusaseman kiihtyvyyttä. Näitä kiihtyvyyssiietoja käytetään rakennuksen kiihtyvyysoprofiilin piirtämiseen X-, Y- ja Z-suunnissa. Tätä kiihtyvyysoprofiilia voidaan käyttää eri suuntien maanjäristystä kuvaavien staattisten kuormien määrittämisessä. Menettelyllä saadaan likimain sama lopputulos kuin vastespektrimenetelmällä. [40.]

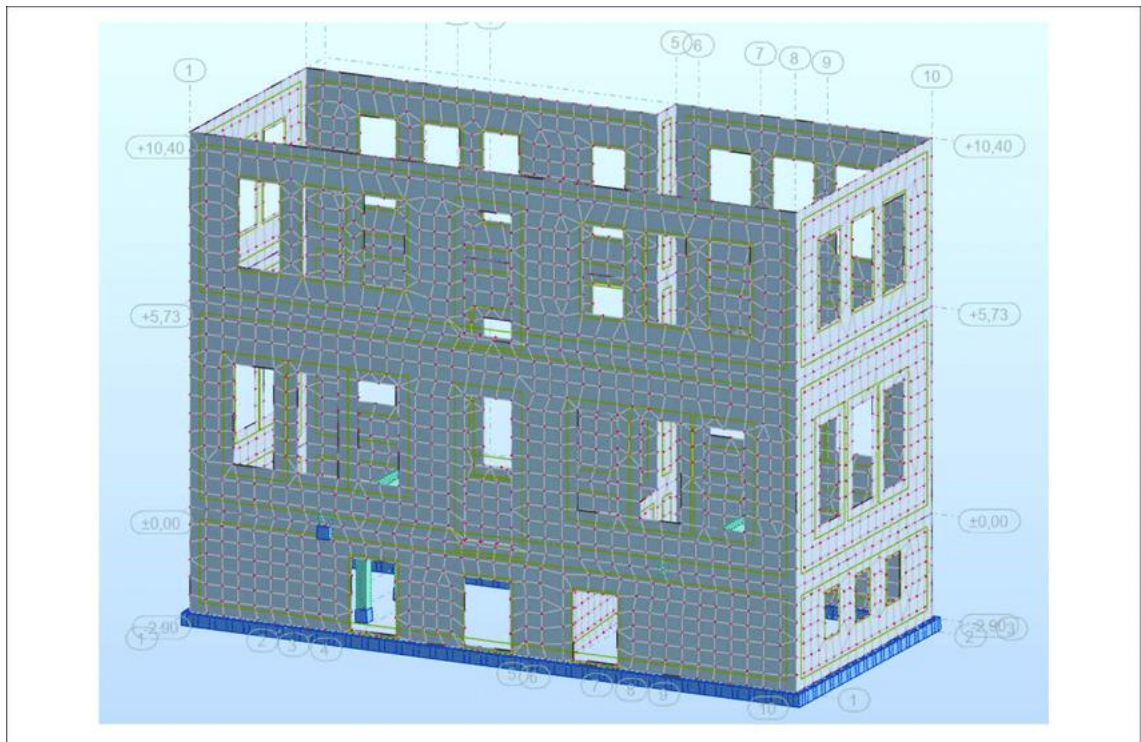
5.2 Kestävyysoanalyysi

Kestävyysoanalyysi tehdään tavanomaisena rakennuksen teräsbetonin staattisena mitoitusastehtävänä onnettomuusrajatilassa, jossa rakennukseen kohdistuu jokin onnettomuudesta johtuva kuorma. Analyysin perusteena ovat Eurokoodistandardit EN 1990, EN 1991, EN 1992-1-1 ja EN 1998. Seismisessä rakennusanalyysissä erityisen tärkeä on EN 1998 eli Eurokoodi 8, koska se on rakenteiden seismisen analyysin Eurokoodi. Kyseisessä standardissa määritetään esimerkiksi, kuinka eri suuntien maanjäristyskuormien yhdistely tulee tehdä. Maan-

järjestyskuorma analysoidaan yhdessä muiden kuormien kanssa. Näihin kuormiin sisältyvät rakennuksen ja laitteiden omapaino, pitkäaikaiset muuttuvat kuormat ja lumikuorma. [42; 43; 44; 45.]

Kuormien vaikutusten yhdistämistä varten jokaiselle kuormalle annetaan oma painokerroin, jota kutsutaan osavarmuuskertoimeksi. Lumikuorman osavarmuuskerroin onnettomuusrajatilassa on 0,2, omapainojen ja maanjärjestyskuorman osavarmuuskerroin on 1,0. Betonin materiaalin osavarmuuskerroin on 1,2 ja raudituksen materiaalin 1,0. Näiden ja kaikkien muiden huomioitavien kuormien vaikutukset yhdistetään niin sanotulla 100–30–30 kombinaatiosäännöllä, joka on esitetty standardissa EN 1998 luvussa 4.3.3.5.2. Säännöllä 100–30–30 tarkoitetaan laskentaperiaatetta, jossa esimerkiksi X-suuntaa tarkastellessa kokonaisvaikutuksessa huomioidaan X-suunnan vaikutukset 100-prosenttisesti, ja Y- ja Z-suuntaiset vaikutukset 30-prosenttisesti. Suuntapainotteinen tarkastelu tehdään kaikille kolmelle suunnalle. Liike voi tapahtua yhdellä akselilla positiiviseksi tai negatiiviseksi valittuun suuntaan. Liikkeiden eri suuntia kuvataan plus- ja miinusmerkein, jolloin erilaisia X-, Y- ja Z-akselin mukaisia liikeyhdistelmiä saadaan kahdeksan. Kun jokaista suuntaa tarkastellaan erikseen 100–30–30 säännön mukaisesti, saadaan 24 erilaista kuormitusyhdistelmää. [45, s.65–66.]

Kaikki alkeiskuormatiedot, kuten lumikuorman, omapainon ja maanjärjestyskuorman osavarmuuskertoimet, syötetään FEM-laskentaohjelmaan. Näiden ja betonirakenteen perustietojen perusteella FEM-ohjelma kykenee laskemaan rakennuksen voimasuureet ja mitoittamaan tarvittavan rauditusmäärän. Kestävyyssanalyysissa käytettävä malli on kuorielementteihin perustuva FEM-malli, josta on esitetty kuvassa 12 esimerkki. Kuvan 12 mallin analyysiohjelma on ollut Robot Autodesk Structural Analysis Professional 2016. Tässä ohjelmassa on dynamiikkaratkaisija, ja sillä on mahdollista tehdä maavastespektriin perustuva rakennuksen vastespektrianalyysi. Ohjelman avulla voidaan määrittää vastespektrianalyysiin perustuva kiihtyvyyssiili ja edelleen maanjärjestyskuorma eri korkeusasemille. [40; 46.]



Kuva 12: Autodeskin Robot Structural Analysis -ohjelmalla laadittu FEM-malli [47].

6 Laitteiden analyysit

6.1 Standardit ja vaatimukset

Laitteiden seismisiä analyysejä tehdään, kun halutaan selvittää, miten laite käyttäytyy maanjäristystilanteissa. Tarkasteltavia kohteita voivat olla esimerkiksi sähköautomaatiokaappeja, yksittäisiä komponentteja, venttiilejä, putkistoja, tai painelaitteita. Analyysejä suoritetaan tavanomaisesti uusia laitehankintoja tehdessä sekä silloin, kun laitteen mekaaniset ominaisuudet muuttuvat muutostyön seurauksena [48]. Näillä analyyseillä tutkitaan esimerkiksi, kestäkö laite seismiset kuormitukset maanjäristysluokkansa vaatimusten mukaisesti.

Mekaanisten ja sähköisten laitteiden analysoimisessa käytetään useita standardeja ja ohjeita laitetyypistä sekä YVL B.2:ssa määritetyistä turvallisuusluokista riippuen. Esimerkiksi putkiston analysoinnissa käytetään yleensä alemmissa turvallisuusluokissa 2, 3 ja EYT standardia EN 13480, jossa määritetään muun

muassa metalliputkiston suunnittelu, tarkastus ja testaus [5; 49]. Korkeimman turvallisuusluokan 1 putkistoanalyysit tehdään tyypillisesti ASME NB-3650:n mukaan [50]. Standardeissa ASCE 43-05- ja 4-16-standardeissa käsitellään laitteiden vaimennuskertoimia [7, s.34; 51, s.27]. Laitteiden rakenteellisten ominaisuuksien, kuten putkiliitosten tai ankkurointien lisäksi käytettävään vaimennuskertoimeen vaikuttaa laitetyyppi. Esimerkiksi teräsputki vaimentaa värähtelyä eri tavalla kuin automaatiokaappi. Kaapissa olevat kaapelit ja muut jäykkydeltään erilaiset komponentit voivat lisätä vaimennusta.

Laitetyyppikohtaisissa ohjeissa, kuten painelaitteiden lujuusanalyysejä käsittelevässä YVL E.4:ssä, on esitetty esimerkiksi insinöörijärjestö ASME:n määrittelemiä käytettäviin suunnittelutietoihin vaikuttavia kuormitusluokkia. Näiden kuormitusluokkien perusteella laitteille määritetään sallitut jännitysrajat, joihin analyysien tuloksia verrataan. [50; 52.]

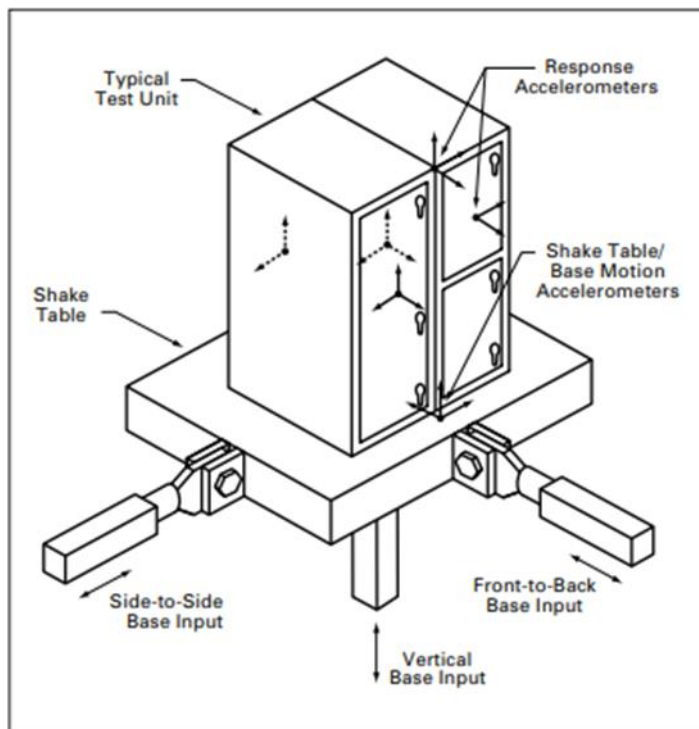
6.2 Käytännön menetelmät

Laitteiden kestävyyttä voidaan arvioida laitoskierroksilla kokemusperäisesti tai yksinkertaisilla käsilaskukaavoilla. Laitteiden seismistä kestävyyttä voidaan myös testata laboratorio-olosuhteissa. Monimutkaisempia FEM-analyysejä tehdään, kun halutaan tarkastella laitetta tarkemmin. Tällainen tilanne voi olla esimerkiksi laitteen sisäisten komponenttien kestävyuden tarkastelu. [13.]

Maanjäristyksen seuraamuksena laitteet voivat heilua, kaatua, liukua, muuten vaurioitua tai vaurioittaa toisia laitteita. Laitoskierroksilla suoritettuna arvioinnin perusteella voidaan esimerkiksi todeta, täytyykö piirilevyjä ruuvata paremmin kiinni sähkökaapin runkoon, tai täytyykö sähkökaapin ankkurointia parantaa, jotta se ei kaadu maanjäristystilanteessa. [53, s.21.]

Tarkemmin laitteiden kestävyyttä voidaan tutkia testeillä, analyyseilla tai näiden kahden yhdistelmällä. Kokeellisesti tutkitaan tyypillisesti laitteita, kuten sähkökaappeja ja releitä, joille on esitetty toiminnallisia vaatimuksia. Laskennallisilla analyyseilla taas tutkitaan mekaanisia laitteita, kuten putkistojärjestelmiä ja venttiilejä. [53, s.21.]

Laitteiden seismistä kestävyyttä testataan käytännössä tavanomaisesti tärypöytätestein. Tärypöytätestissä laite asetetaan esimerkiksi kuvan 13 mukaiselle tasolle, jota liikutetaan kerrosvastespektrin tai maavastespektrin kiihtyvyystietojen mukaisesti. Vastespektristä johdetaan aikahistoria, jolla pyritään kuvaamaan laitteen sijoituspaikalla esiintyviä kiihtyvyyksiä. Tärypöydän aiheuttamien kiihtyvyyksien tulee olla vähintään yhtä suuria kuin käytetyn kiihtyvyyssajakahistorian tai vastespektrin esittämät kiihtyvyydet. Tärypöydän mitattuja kiihtyvyyksiä voidaan esittää niin sanotulla testivastespektrillä, jota verrataan laitteen sijoituspaikan vastespektriin. Testattavaan laitteeseen kiinnitetään kiihtyvyyssantureita, joiden avulla tarkkaillaan laitteeseen kohdistuvia kiihtyvyyksiä. [53, s.29-33; 54, s.6.]



Kuva 13: Testikappale kolmesuuntaisella tärypöydällä [55, s.16].

Laitteen eheyttä tutkitaan simuloitun maanjäristyksen jälkeen eri keinoin, kuten silmämääräisellä tarkistelulla tai resonanssitestillä. Resonanssitestissä tärypöytä kiihdytetään hiljalleen koko taajuusalueen läpi, jotta voidaan tarkastella mil-

loin rakenne alkaa värähdellä voimakkaimmin. Jos tämän värähtelyarvon eli resonanssiipiikin suuruus tai esiintymistaajuus on vaihtunut ehjän laitteen resonanssiipiikistä, jokin rakenteessa on muuttunut. [55.]

6.3 Analyysimenetelmät

Kokeellisen tutkimuspolun lisäksi laitteiden seismistä kestävyyttä voidaan tarkastella laskennallisesti. Laskennallisia metodeja ovat esimerkiksi aikahistoriamenetelmä, vastespektrimenetelmä ja korvausvoima- eli huippuarvomenetelmä. Analyysimenetelmän valintaan vaikuttaa laskentatehokkuus, joten korvausvoimamenetelmä on yleisemmin käytetty vaihtoehto. Aikahistoriamenetelmää käytetään laitteiden analyyseissa harvoin, koska se on laskennallisesti raskas. [53.]

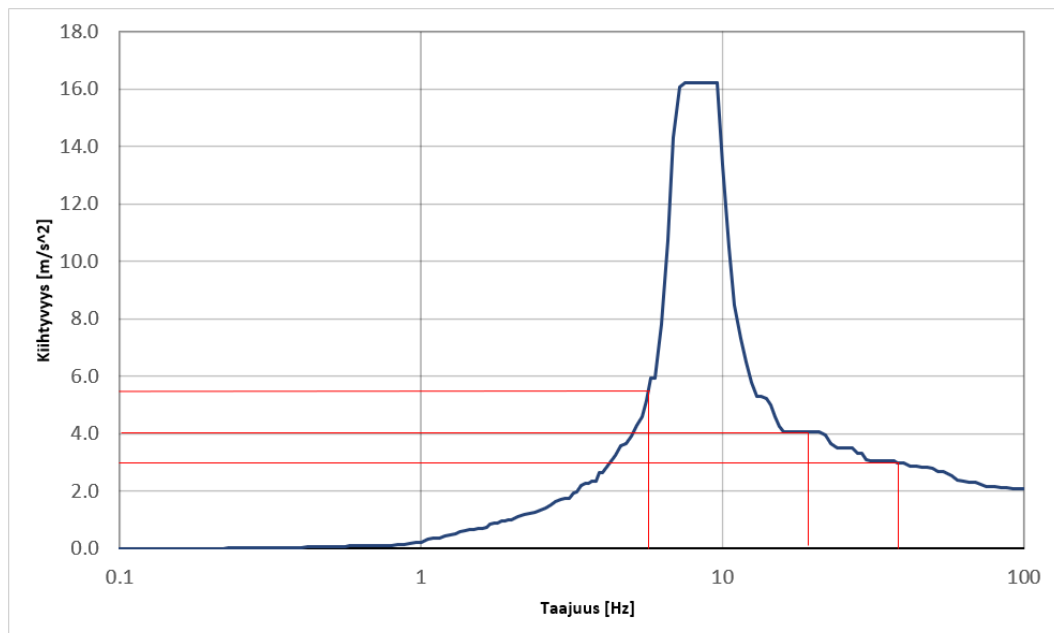
Yksinkertaiset laitteet, kuten venttiilit, voidaan analysoida idealisoituina malleina ja käsikaavoilla. Esimerkiksi venttiilin käyttäytymistä voidaan laskea palkkikaavoilla, kun venttiilin sankayläosa ja toimilaitte ajatellaan venttiilin runkoon laippaliitoksella kiinnitettynä pystysuuntaisena ulokepalkkina. Monimutkaiset laitteet ja laajemmat kokonaisuudet analysoidaan elementtimenetelmään perustuvilla laskentaohjelmilla. [50.]

Laiteiden FEM-analyyseissa käytetään nykyään tavanomaisesti tilavuusmalleja. Isojen laskentamallien, kuten nosturien, mallinnustapa voi olla toteutettu myös palkki- tai kuorielementeillä. FEM-analyysi tehdään pääosin samoin periaattein kuin rakennusten analyyseissa. Laitteet mallinnetaan, verkotetaan ja niiden tukipisteisiin tai alustaan kohdistetaan sijoituspaikalla esiintyvät kiihtyvyyssaikehistoriat. Analyysiin tarpeelliset seismiset kuormitustiedot saadaan tavanomaisesti vastespektri- tai korvausvoimamenetelmällä rakennuksen kerrosvastespektristä. [6; 53.]

6.3.1 Vastespektrimenetelmä

Vastespektrimenetelmä on dynaaminen lähestymistapa laitteiden analysointiin. Dynaaminen menetelmä on tarpeellinen, jos laitteeseen kohdistuvat voimat jakautuvat uudelleen rakenteellisen muodonmuutoksen takia. Riittävän suuren kiihtyvyyden kohdistuminen laitteeseen voi aiheuttaa tällaisia muodonmuutoksia, esimerkiksi taivuttamalla tai murtamalla laitteen osia. Vastespektrimenetelmää käytettäessä tarkasteltavan laitteen ominaistajuuudet selvitetään FEM-analyysilla, minkä jälkeen ominaistajuuksia verrataan kerrosvastespektrin taajuuksiin ja niitä vastaaviin kiihtyvyyksiin. [53, s.51; 56.]

Yleisesti vastespektrimenetelmää käytettäessä määritetään laitteen eri muotoihin kohdistuvat kerrosvastespektrin mukaiset vaikutukset. Kuvassa 14 esitety pystysuuntaiset punaiset viivat ovat laitteen ominaistajuuksien kohdalla ja näitä taajuuksia vastaavat kerrosvastespektrin kiihtyvyydet on esitetty punaisilla vaakatasoisilla viivoilla. Kaikki ominaistajuuksia vastaavat kiihtyvyydet lasketaan yhteen, jolloin saadaan yksi vertailujännitys. Nimensä mukaisesti tätä vertailujännitystä verrataan suunnittelujännityksiin, jotka laitteen tulisi kestää. [56; 57.]

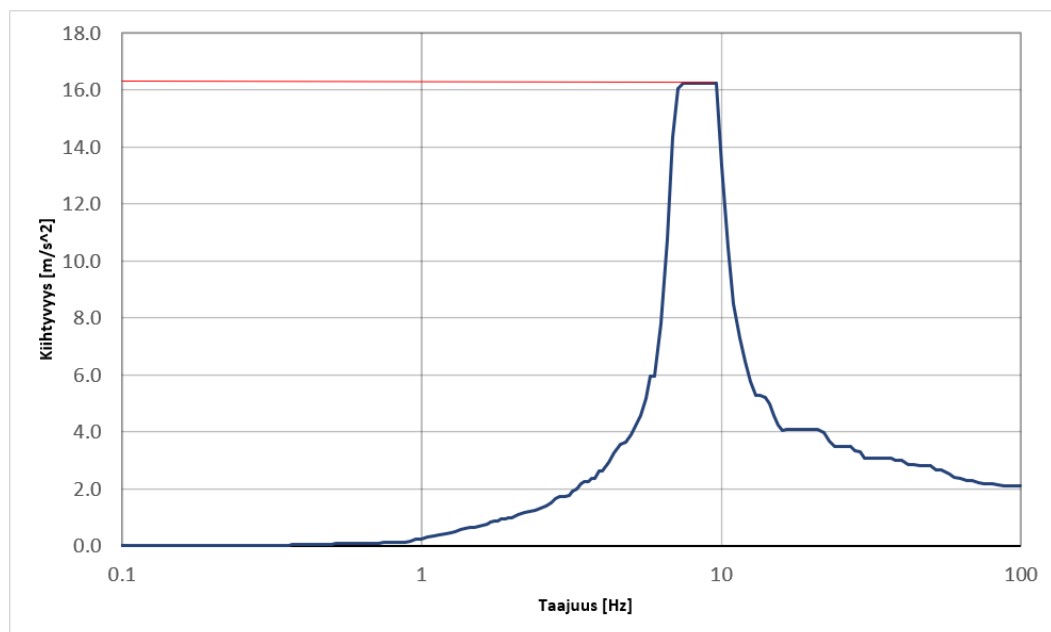


Kuva 14: Kerrosvastespektrin valittuja taajuuksia vastaavat kiihtyvyydet.

Laitteiden vasteiden yhteen laskemista varten on useita laskentametodeja, kuten ABS- (Absolute Sum), SRSS- ja CQC-metodit (Complex-Quadratic-Combination). Laskentametodin valintaan vaikuttavat tulosten haluttu tarkkuus ja tarkasteltavassa kappaleessa esiintyvä värähtely. Esimerkiksi SRSS:ää käytetään, kun värähtelyä aiheuttavien taajuuksien välinen ero on selkeä ja CQC:tä käytetään värähtelyä aiheuttavien taajuuksien ollessa lähekkäin. [56, s.7–8.]

6.3.2 Korvausvoimamenetelmä

Korvausvoimamenetelmää kutsutaan myös huippuarvomenetelmäksi, koska aina tarkasteltava voima on vastespektrin korkein arvo (kuva 15). Tämä vastespektrin arvojen yksinkertaistus muuttaa analyysin dynaamisesta staattiseksi eli käsiteltävä kuorma ei muutu. Korvausvoimamenetelmän käyttö olettaa, että laitteen rakenne on jäykkä. Laite on kiinni perustuksessa, ja jokainen piste laitteessa kokee saman kiihtyvyyden, ja maanjäristyksen hallitseva vaikutus on yhtä suuri vaakatasoiseen voimaan verrattuna. [53.]



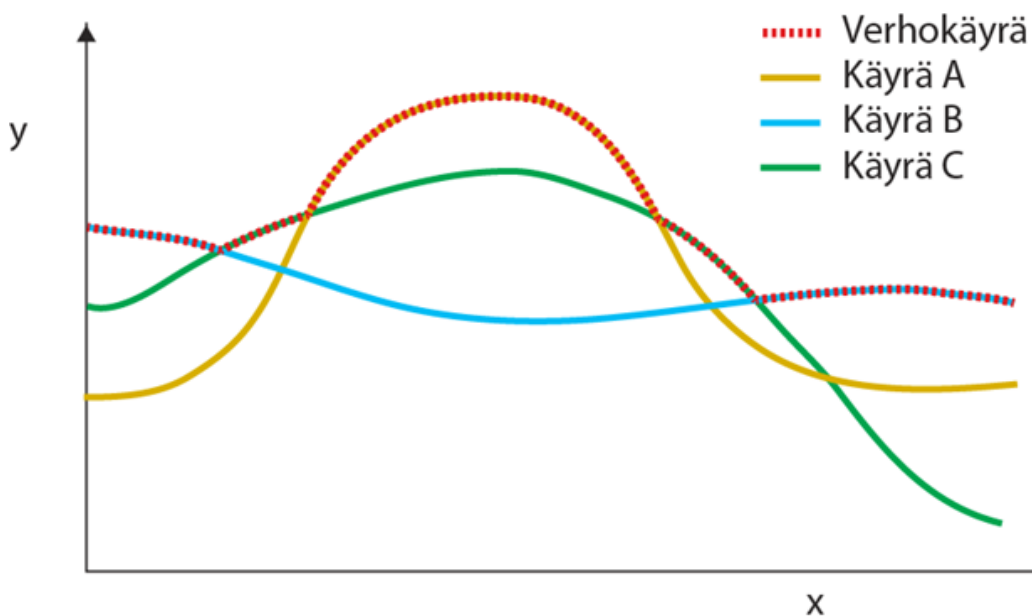
Kuva 15: Korvausvoima- eli huippuarvomenetelmässä käytetään laitteen alustan vastespektrin korkeinta arvoa.

Korvausvoimamenetelmää käytettäessä kiihtyvyyssarvo voidaan liittää FEM-malliin kuormana, eikä ominaistajuuksia huomioida. Tämän jälkeen laitteeseen kohdistuvaa kuormaa verrataan ennalta määritettyyn jännitysrajaan tai sallittuun voimakapasiteettiin. Esimerkiksi ankkuroinneille on voitu antaa jokin sallittu voimakapasiteetti, jonka ne kestävät ja johon analyysin mukaisia kuormia verrataan. Korvausvoimamenetelmää käytetäänkin paljon juuri ankkurointeja tarkastellessa. [58; 59.]

7 Laitosverhokäyrä

7.1 Verhokäyrä

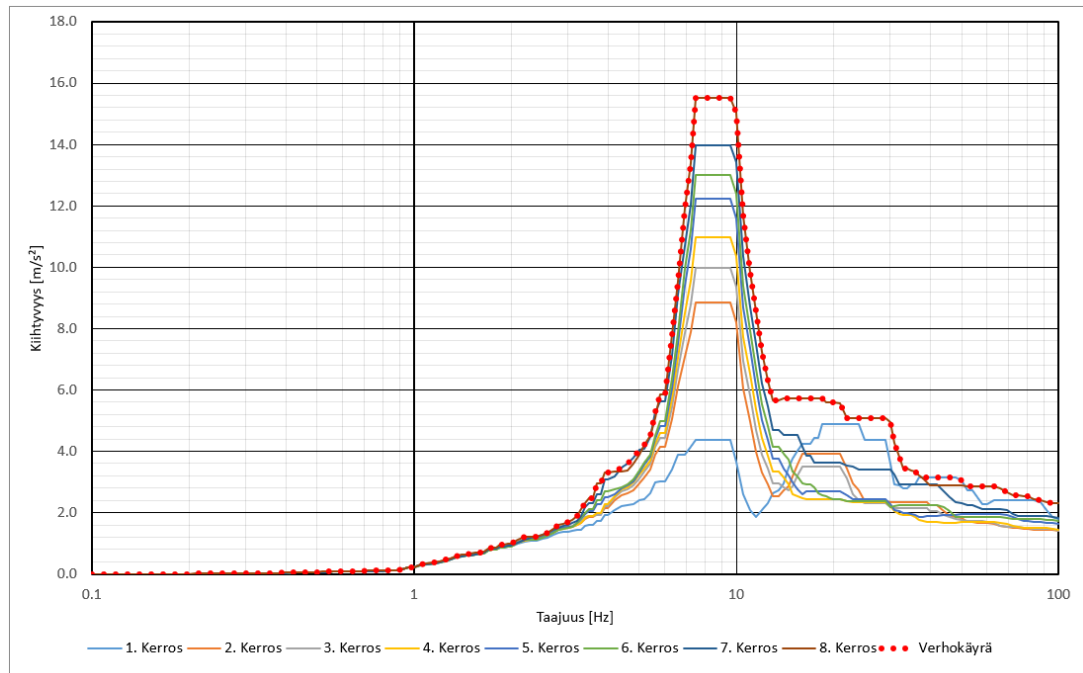
Tässä työssä verhokäyrällä tarkoitetaan kuvaajaa, joka kattaa useamman kuvaajan suurimmat tai pienimmät arvot. Verhokäyrällä saadaan yksinkertaisesti yhdistettyä ja havainnollistettua useamman käyrän kattamat suurimmat tai pienimmät ääriarvot. Kuvassa 16 on esitetty tässä työssä käytetyn verhokäyrän periaate. Verhokäyrään poimitaan käyristä A, B ja C aina suurimmat y-akselin arvot.



Kuva 16: Verhokäyrän periaate tässä työssä.

7.2 Rakennuskohtainen verhokäyrä

Kerrosvastespektrit esittävät rakennuksen eri korkeusasemilla esiintyviä kiihtyvyyksiä. Rakennuksen kerrosvastespektriin pohjalta voidaan laatia kuvan 17 mukainen verhokäyrä, joka kattaa kaikki rakennuksen kiihtyvyydet. Tätä verhokäyrää voidaan käyttää suunnitteluperusteena, jos sen laadinnassa on käytetty suunnitteluperusteisia kerrosvastespektrejä.



Kuva 17: Rakennuksen kerroksien kiihtyvyydet kattava verhokäyrä.

Rakennuskohtainen verhokäyrä on työkalu paitsi korkeusasemien kiihtyvyyksien vertailuun, myös suunnittelutöiden helpottamiseen. Laitteen kestäessä verhokäyrän mukaiset kiihtyvyydet sen sijaintia voidaan muuttaa vapaasti kyseisessä rakennuksessa, kun oletetaan kiinnityksen pysyvän samanlaisena.

7.3 Laitosverhokäyrä

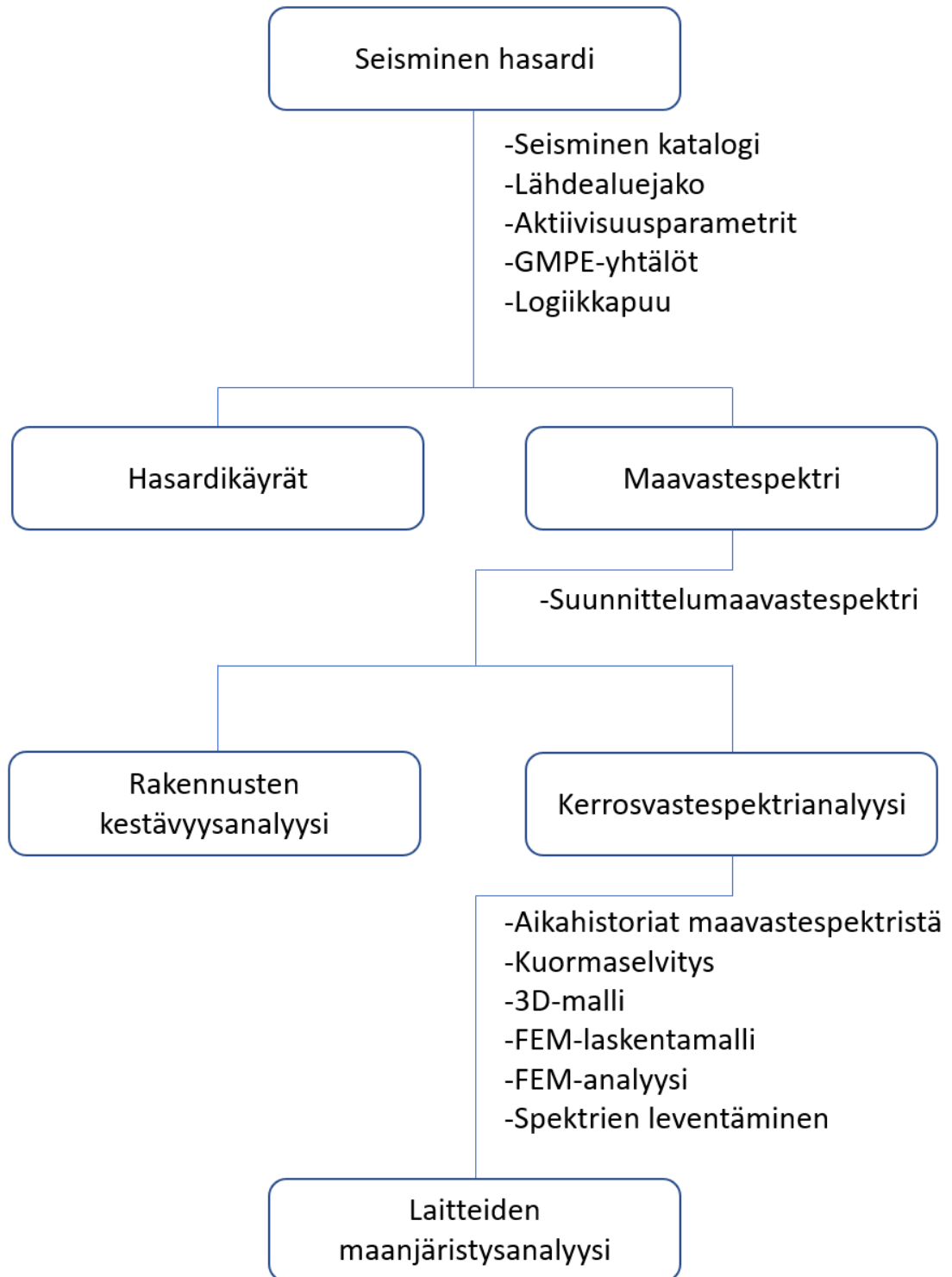
Laitosalueen rakennusten verhokäyristä voidaan laatia koko laitosalueen kattava verhokäyrä eli laitosverhokäyrä. Rakennusten verhokäyrien vertailu mah-

dollistaa samankaltaisia kiihtyvyyksiä kokevien rakennusten ryhmittelyn. Kel-poistamalla laite yhdelle ryhmälle laite voidaan sijoittaa turvallisesti kaikkiin ryhmän rakennuksiin samanlaisella kiinnityksellä. Verhokäyrien vertailukelpoisuus edellyttää, että rakennusten kerrosvastespektrien vaimennuskertoimet ja liikesuunnat vastaavat toisiaan.

Isommilla laitosalueilla käytetään tyypillisesti koko alueen kattavaa laitoskoordinaatistoa. Yksittäisten rakennusten suunnittelussa ja analysoinnissa käytetään usein rakennuskohtaista koordinaatistoa, jonka suunta voi poiketa eri rakennuksissa. Laitosverhokäyrää varten kaikkien rakennusten mahdolliset rakennuskoh- taiset koordinaatistot tulee sovittaa laitoskoordinaatiston mukaisiksi. Tällöin spektrien mukaiset liikesuunnat vastaavat rakennuksissa samansuuntaista lii- kettä. Esimerkiksi rakennusten X-akselin suuntaiset liikkeet ovat vertailukelpoi- sia, jos rakennusten liike on myös todellisuudessa samansuuntainen.

8 Yhteenveto

Seismisesti aktiivisilla alueilla seisminen suunnittelu on täysin normaali osa ra- kennusten, patojen, siltojen ja teollisuuslaitosten suunnittelua. Seismisesti va- kailla alueilla, kuten Suomessa, maanliikkeet huomioidaan tyypillisesti ainoas- taan korkeissa rakennuksissa ja ydinvoimalaitoksissa. Seismisen analyysin eri vaiheita esitetään kuvan 18 kaaviossa samassa järjestyksessä, kuin tässä insi- nöörityössä niitä on selostettu.



Kuva 18: Seismisen analyysin eri vaiheet alkaen seismisen hasardianalyysin määrittämisestä.

Seismisen analyysin ensimmäisinä vaiheina suoritetaan seisminen hasardianalyysi. Seisminen hasardi voidaan esittää hasardikäyrillä ja maavastespektreillä. Maavastespektri kuvaa nimensä mukaisesti maan kiihtyvyyssvastetta tietylle taajuuskaistalle, toistuvuusajalle ja luottamustasolle. Suunnittelumaavastespektriä mediaani- tai keskiarvon luottamustasolle ja toistuvuusajalle 10^{-5} käytetään lähtötietona rakennusten deterministisille analyyseille.

Rakennuksia tarkastellessa voidaan määrittää kerrosvastespektrejä, joissa esitetään, millaisia kiihtyvyyksiä rakennuksien laatoilla ja seinillä esiintyy. Lisäksi voidaan tutkia, kestävätkö rakennukset maanjäristysten aiheuttamat kuormat. Kestävyysanalyyseissa laskentaohjelmaan syötetään maanjäristyksen kuorma, muut samanaikaisesti vaikuttavat kuormat ja rakenteiden materiaalitiedot. Näiden tietojen pohjalta laskentaohjelmasta saadaan esimerkiksi betonirakennukselle rakenneosittain tarvittava raudoitusmäärä, jolla rakennus kestää maanjäristystilanteessa. Olemassa olevissa rakennuksissa tätä raudoitusmäärää verrataan rakennukseen asennettuun pääraudoitusmäärään.

Rakennuksen jokaiselle kerrokselle voidaan laskea oma kerrosvastespektri, joka kuvaa maanjäristyksestä välittyvää värähtelyä rakennuksen kyseiselle korkeusasemalle. Kerrosvastespektrejä käytetään laitteiden analyyseissa. Laitteiden kestävyksiä voidaan tutkia laskennallisten analyysien lisäksi käytännönläheisemmillä menetelmillä, kuten tärypöytätesteillä tai kokemusperäisellä tarkastelulla laitoskierroksien aikana. Maanjäristyskestävyyttä voidaan parantaa analyysien ja tutkimusten perusteella, esimerkiksi tukemalla laitteiden komponentteja paremmin tai ankkuroimalla laitteita lattiaan.

Rakennuksen kerrosvastespektrien korkeimmat kiihtyvyydet voidaan yhdistää verhokäyräksi kutsuttuun kuvaajaan. Kestävyystietoja tarkastellessa voidaan käyttää verhokäyrän kiihtyvyyssarvoja sijoituspaikan tarkemmista tiedoista välittämättä. Tarkempaa kerrosvastespektrien tarkastelua ei tarvitse suorittaa, jos laite kestää rakennuksessa esiintyvät korkeimmat kiihtyvyydet. Yhdistämällä useiden rakennusten verhokäyrät voidaan luoda koko laitosalueen kiihtyvyydet kattava laitosverhokäyrä.

Lähteet

- 1 Maanjäristys on luonnon tuhoisimpia ilmiöitä. 2004. Verkkoaineisto. Yle Uutisten artikkeliarkisto. <<https://yle.fi/uutiset/3-5744722>>. 29.12.2004. Päivitetty 28.10.2008. Luettu 18.11.2021.
- 2 Teräsrakenteiden maanjäristysmitoitus. 2013. Verkkoaineisto. Teräsrakenneyhdistys ry. Teräsrakenteiden T&K-päivät. <https://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/118/19c1dc0/jalkanen_terasrakenteiden_maanjristysmitoitus.pdf>. Luettu 23.10.2021
- 3 Rafferty, John P. & Pletcher, Kenneth. 2021. Verkkoaineisto. Japan earthquake and tsunami of 2011. Encyclopedia Britannica. <<https://www.britannica.com/event/Japan-earthquake-and-tsunami-of-2011>> 30.11.2021. Luettu 4.12.2021.
- 4 Suurnäkki, Olli. 2016. Maanjäristysluokitus Loviisan voimalaitoksella. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, energiatekniikan koulutusohjelma. <<https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2016120230176>>.
- 5 Ohje YVL B.2. Ydinlaitoksen järjestelmien, rakenteiden ja laitteiden luokittelu. 2019. Säteilyturvakeskus. <http://www.finlex.fi/data/normit/41401-YVL_B.2.pdf>. 15.6.2019
- 6 Bo, Li. 2015. Response Spectra for Seismic Analysis and Design. University of Waterloo. <<http://hdl.handle.net/10012/9245>>.
- 7 Tuori, Jyri. 2015. Seismiset analyysimenetelmät rakennesuunnittelussa. Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan koulutusohjelma.
- 8 Seismic Walkdown Guidance: For Resolution of Fukushima Near-Term Task Force Recommendation 2.3: Seismic. 2012. Technical Report. Electrical Power Research Institute. <<https://www.epri.com/research/products/000000000001025286>>.

- 9 Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures. 2017. ASCE/SEI 4-16. American Society of Civil Engineers.
- 10 Seismic Design for Nuclear Installations, SSG-67. 2021. International Atomic Energy Agency.
- 11 Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations, Specific Safety Guides. 2010. International Atomic Energy Agency.
- 12 Wahlström, Rutger & Grünthal, Gottfried. 2001. Probabilistic Seismic Hazard Assessment (Horizontal PGA) for Fennoscandia Using the Logic Tree Approach for Regionalization and Nonregionalization Models. Seismological Research Letters, volume 72. 1.1.2001.
- 13 Ohje YVL B.7. Varautuminen sisäisiin ja ulkoisiin uhkiin ydinlaitoksessa. 2019. Säteilyturvakeskus. <http://www.finlex.fi/data/normit/41406-YVL_B.7.pdf>. 15.12.2019
- 14 Davis, Christopher. 2015. Two Methods for Evaluating Seismic Safety. Verkkoaineisto. Stanford University. <<http://large.stanford.edu/courses/2015/ph241/davis-c2/>>. Luettu 26.11.2021
- 15 Office Hours. 2017. CEEN 545 – Lecture 8 (part 1) – Seismic Hazard Analysis. 8.3.2017. Youtube video. <<https://www.youtube.com/watch?v=4fk5zwAMR7c>>. Katsottu 17.9.2021.
- 16 Chapter B-2 Seismic Hazard Analysis. 2019. Verkkoaineisto. Bureau of Reclamation. <<https://www.usbr.gov/ssle/damsafety/risk/BestPractices/Chapters/B2-SeismicHazardAnalysis.pdf>>. Luettu 27.9.2021.
- 17 Leppänen, Timo. 2021. Erityisasiantuntija, Laitossuunnittelu ja rakentaminen, Engineering & Projects, Fortum, Espoo. Sanallinen tiedoksi anto. 10.9.2021.

- 18 Catalog of earthquakes in Northern Europe (FENCAT) 1375-. Institute of Seismology, University of Helsinki. Verkkoaineisto. <https://www.seismo.helsinki.fi/bulletin/list/catalog/Scandia_updated.html>. Päivitetty 28.2.2020. Luettu 18.10.2021

- 19 Korja, A. (Ed.); Kosonen, E. M. (Ed.); Hellqvist, N. M., Koskinen, P. H., Mänty-niemi, P. B., Uski, M. R., Valtonen, O. S., Airo, M-L., Huotari-Halkosaari, T., Nironen, M., Sutinen, R., Grigull, S., Stephens, M., Karin, H., & Lund, B. 2015. SEISMOTECTONIC FRAMEWORK AND SEISMIC SOURCE AREA MODELS IN FENNOSCANDIA, NORTHERN EUROPE. Report S; Vol. 63. Institute of Seismology, University of Helsinki. <http://www.seismo.helsinki.fi/pdf/Seismotectonic_S63_Korja_Kosonen.pdf>.

- 20 Catalog format. Institute of Seismology, University of Helsinki. Verkkoaineisto. <https://www.seismo.helsinki.fi/bulletin/list/catalog_format> Luettu 18.10.2021.

- 21 Mizrahi, Leila, Nandan, Shyam & Wiemer, Stefan. The Effect of Declustering on the Size Distribution of Mainshocks. 2021. Seismological Research Letters 2021; 92 (4): 2333–2342. <<https://doi.org/10.1785/0220200231>>.

- 22 Vänskä, Päivi & Raudasmaa, Pekka. 2005. Helsingin Keskustan Kallioruhjeet. Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto. Geoteknisen osaston julkaisu 89/2007.

- 23 Probabilistic Seismic Hazard Analysis – Draft Report. 2021. Slate Geotechnical Consultants. Julkaisematon.

- 24 Tang Janika. 2019. Sensitivity analysis of the probabilistic seismic hazard assessment on the Hanhikivi site. Diplomityö. Aalto University, Master's Programme in Engineering Physics. <<http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201910275952>>.

- 25 Youngs, R., Graehl, N., McGuire, R., & Toro, G. 2015. Central and Eastern United States Seismic Source Characterization for Nuclear Facilities: Maximum Magnitude Distribution Evaluation. Electric Power Research Institute.
- 26 Kijko Andrej. 2004. Estimation of the maximum Earthquake Magnitude, m_{max} . Pure and Applied Geophysics 161,1655-1681. <<https://doi.org/10.1007/s00024-004-2531-4>>.
- 27 Kijko Andrej & Singh Mayshree. 2011. Statistical Tool for Maximum Possible Earthquake Magnitude Estimation. Acta Geophys. 59, 674–700 (2011). <<https://doi.org/10.2478/s11600-011-0012-6>>.
- 28 Vuorinen, T. A. T., Tiira, T., Uski, M. R., & Lund, B. 2018. Updated Fennoscandian GMPE. Report; No. T-97. Institute of Seismology, University of Helsinki.
- 29 Decision Tree. Verkkoaineisto. <<https://www.smartdraw.com/decision-tree/>> Luettu 19.11.2021
- 30 Malm, Marianne & Kaisko, Outi. 2017. Re-evaluation of seismic hazard spectra in Olkiluoto and Loviisa. ÅF Consult. Julkaisematon.
- 31 A Performance-Based Approach to Define the Site-Specific Earthquake Ground Motion. 2007. Regulatory Guide 1.208. U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- 32 Gangsig Shin & Ohseop Song. 2016. A Time Domain Method to Generate Artificial Time History from a Given Reference Response Spectrum. Nuclear Engineering and Technology, Volume 48, issue 3. S. 831-839. <<https://doi.org/10.1016/j.net.2016.01.023>>.
- 33 Halme, E-M & Leppänen T. 2018. Loviisa 1 and 2, Artificial acceleration time histories corresponding YVL B.7 ground response spectrum. 11.6.2018. Fortum. Julkaisematon.

- 34 Design of Nuclear Power Plants against Seismic Events; Part 1: Principles. KTA 2201.1. 2011. KTA-Geschaeftssetelle.
- 35 Varpasuo, Pentti. 1999. The development of the floor response spectra using large 3D model. Nuclear Engineering and Design, Volume 192, Issues 2-3. S. 229-241. <[https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(99\)00131-4](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(99)00131-4)>.
- 36 Koskinen, Joonas. 2021. Loviisan ydinvoimalaitoksen rakennuksille tulevat kuormat. Espoo: Fortum, Engineering & Projects, Nuclear Engineering. Julkaisematon.
- 37 Latvala, Arto. 2021. CAD-mallinnusraportti: 1A Apurakennus_220_Betoni-rakenteet. Espoo: Fortum. Julkaisematon.
- 38 Akin, J.E. 2009. Finite Element Analysis Concepts via Solidworks. Houston, Texas: Rice University.
- 39 Earthquake Hazards 201 - Technical Q&A. 2019. <<https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/science/earthquake-hazards-201-technical-qa>> Luettu 21.12.21
- 40 Interim spent fuel storage building KPA2 Structural calculations for seismic resistance of the building. 2020. AFRY. Julkaisematon.
- 41 Malhotra, Praveen K. 2021. Seismic Analysis of Structures and Equipment. Springer, Cham. <<https://doi.org/10.1007/978-3-030-57858-9>>.
- 42 SFS-EN 1990. 2006. Eurokoodi. Rakenteiden Suunnitteluperusteet. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.
- 43 SFS-EN 1991-1-7. 2014. Eurokoodi 1. Rakenteiden kuormat. Osa 1-7: Yleiset kuormat. Onnettomuuskuormat. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.

- 44 SFS-EN 1992-1-1. 2015. Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.
- 45 SFS-EN 1998 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.
- 46 Autodesk Building Solutions. 2012. Simplified Seismic Analysis In Robot Structural Analysis Professional. 19.9.2012. Youtube video. <https://www.youtube.com/watch?v=4ejxTX2_5Og>. Katsottu 19.12.2021.
- 47 Maraveas, Chrysanthos. 2019. Assessment and Restoration of an Earthquake-Damaged Historical Masonry Building. *Frontiers in Built Environment* 20.9.2019. <<https://doi.org/10.3389/fbuil.2019.00112>>.
- 48 Ohje YVL B.3, Ydinvoimalaitoksen deterministiset turvallisuusanalyysit. 2019. Säteilyturvakeskus. <https://www.finlex.fi/data/normit/41402/YVL_B.3.pdf>. 16.9.2019.
- 49 SFS-EN 13480. 2021. Metalliset teollisuusputkistot. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.
- 50 ASME Boiler and Pressure Vessel Code. 2020. The American Society of Mechanical Engineers.
- 51 Seismic Design Criteria for Structures, Systems and Components in Nuclear Facilities. 2005. ASCE/SEI 43-05. American Society of Civil Engineering.
- 52 Ohje YVL E.4. Ydinvoimalaitoksen painelaitteiden lujuusanalyysit. 2020. Säteilyturvakeskus. <https://www.finlex.fi/data/normit/41430/YVL_E.4.pdf>. 17.3.2020.

- 53 IEEE/IEC 60980-344-2020 - IEEE/IEC International Standard - Nuclear facilities - Equipment important to safety - Seismic qualification. 2020. Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- 54 Ohje YVL 2.6 Maanjärityksen huomioon ottaminen ydinvoimalaitoksissa. 2001. Säteilyturvakeskus. <https://ohjeisto.stuk.fi/YVLOld/YVL2.6fi_2001-12-19.pdf>. 19.12.2001.
- 55 Earthquake requirements and seismic capabilities for Eaton's electrical distribution and control equipment. 2009. Eaton Corporation. Cleveland, Ohio: United States.
- 56 Combining Modal Responses and Spatial Components in Seismic Response Analysis. 2012. Regulatory Guide 1.92 Revision 3. Nuclear Regulatory Commission.
- 57 Luca, Flavia & Verderame, Gerardo. 2013. The accuracy of CQC and Response Spectrum Analysis in the case of impulsive earthquakes. Safety, Reliability, Risk and Life-Cycle Performance of Structures and Infrastructures - Proceedings of the 11th International Conference on Structural Safety and Reliability. S. 741-748.
- 58 Sang-Moon, Lee & Woo-Young, Jung. 2020. Evaluation of anchorage performance of the switchboard cabinet under seismic loading condition. Advances in Mechanical Engineering. <<https://doi.org/10.1177%2F1687814020926309>>.
- 59 Sung Gook, Cho & Salman Kashif. 2021. Seismic demand estimation of electrical cabinet in nuclear power plant considering equipment-anchor-interaction. Nuclear Engineering and Technology. <<https://doi.org/10.1016/j.net.2021.10.021>>. 16.8.2021.