

# LAITTEIDEN MAANJÄRISTYSKUORMAT JA SEISMISEN ANALYYSIN MENETELMÄT

Eero Torkkeli

Rakenteiden Mekaniikka Vol. 12  
No. 1 1979 s. 12...22

**YHTEENVETO:** Artikkelissa käsitellään maanjäristysalueille tarkoitettujen koneiden ja laitteiden seismisiä kuormituksia ja suunnittelumenetelmiä. Rakennussuunnittelussa tehtävien ratkaisujen vaikutuksesta laitekuormiin esitetään eräitä näkökohtia. Laskentamenetelmistä käsitellään yksityiskohtaisemmin harmonista dynaamista analyysiä. Lopuksi esitellään eräs sovellutusesimerkki.

## JOHDANTO

Seisminen suunnittelu voidaan yleensä jakaa kahteen eri osa-alueeseen, toisaalta laitos- ja rakennussuunnitteluun ja toisaalta laitesuunnitteluun, jotka usein tapahtuvat eri organisaatioissa. Laitesuunnittelun osuus on erikoisen korostunut ydinvoimaloissa, missä turvallisuuden kannalta tärkeiden laitteiden on kyettävä säilyttämään toimintakykynsä myös maanjäristyksen satuessa. Tässä esityksessä seismistä suunnittelua on käsitelty juuri laitesuunnittelijan näkökulmasta taustana eräät ydinvoimalatekniikasta saadut kokemukset. Erikoisesti on pyritty tuomaan esille niitä seikkoja, jotka liittyvät rakennus- ja laitesuunnittelun väliseen raja-alueeseen. Varsinaista laitteiden suunnittelua ei ole käsitelty.

## KUORMITUKSET

Maanjäristyksessä laitetta kuormittaa sen tukipisteiden liike kaikkiin kolmeen suuntaan; eri tuet voivat lisäksi liikkua eri tavoin. Vaakasuuntainen kuormitus on tavallisesti pystysuuntaista suurempi ja myös vaarallisempi, koska rakenteet on jo mitoitettu pystykuormiin nähden tietyllä varmuudella.

Joissakin yksinkertaisissa laitesuunnittelun tapauksissa kuormitustiedoksi riittää laitteeseen kohdistuva suurin kiihtyvyys, jonka aiheuttama hitausvoima otetaan suunnittelussa huomioon. Kaikkein vaativimmissa tapauksissa esimerkiksi epälineaarista dynaamista analyysia tehtäessä tarvitaan odotettavissa oleva kiinnityspisteiden liike, tavallisimmin kiihtyvyyden aikafunktion muodossa (kuva 1).

Ydinvoimalaitostekniikassa ja lisääntyvässä määrin myös muissa sovelluksissa on tullut tavaksi kuvata seismiset kuormitukset vastespektrin avulla, jonka etuna on määrittelyn yksikäsitteisyys ja yksinkertaisen graafisen esityksen mahdollisuus. Spektrien käyttäminen jättää myös tarpeellista valinnanvaraa analysoitavan suhteen.

Siirtymän vastespektri  $S_D(\omega, \zeta)$  on käyräparvi, joka ilmoittaa alustan liikkeestä johtuvan suhteellisen siirtymän suurimman amplitudin yhden vapausasteen värähtelijälle (kuva 2), jonka ominaistaajuus  $\omega$  ja suhteellinen vaimenuskerroin  $\zeta$  tunnetaan.[1].

$$m \ddot{x}(t) + c \dot{x}(t) + k x(t) = -m \ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

eli, kun merkitään  $\omega = \sqrt{k/m}$  ja  $\zeta = c/2\omega m$

$$\ddot{x}(t) + 2\zeta\omega\dot{x}(t) + \omega^2 x(t) = -\ddot{u}_g(t), \quad (1')$$

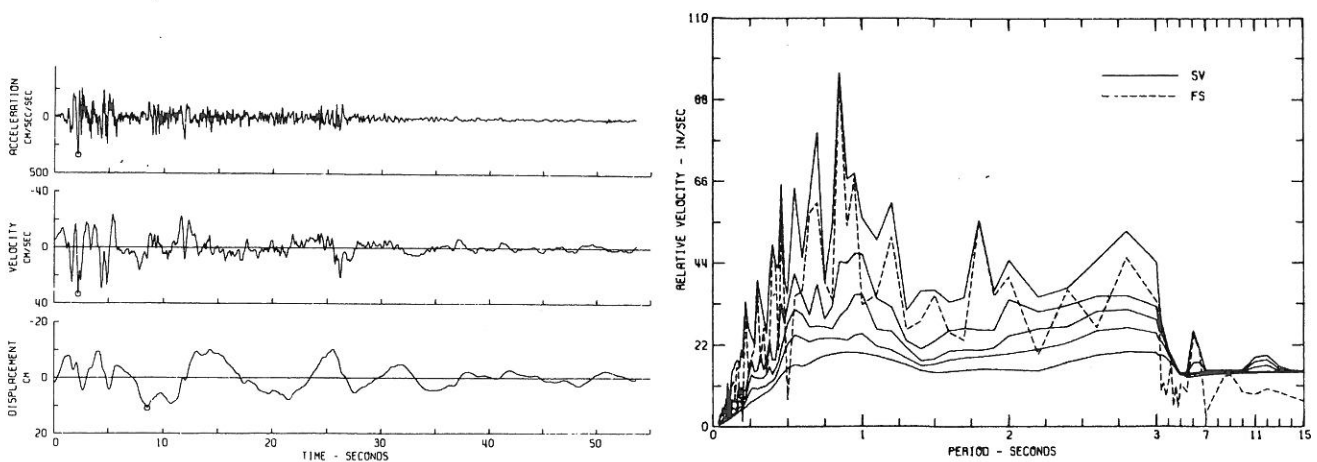
Kyseessä on liikeyhtälön (1) ratkaisun  $x(t)$  maksimiarvo tarkasteltavalla aikavälillä parametrien  $\omega$  ja  $\zeta$  funktiona

$$S_D(\omega, \zeta) = \max_t |x(t)|. \quad (2)$$

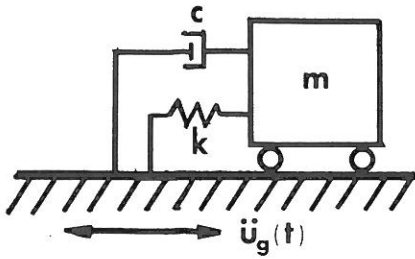
Spektri voidaan muodostaa tunnetusta alustan liikkeen aikafunktiosta  $\ddot{u}_g(t)$  integroimalla numeerisesti ns. Duhamel'in integraali muuttujien  $\omega$  ja  $\zeta$  eri arvoilla. Nopeuden ja kiihtyvyyden vastespektrit  $S_V$  ja  $S_a$  määritellään seuraavasti

$$S_V(\omega, \zeta) = \omega S_D(\omega, \zeta) \quad (3)$$

$$S_a(\omega, \zeta) = \omega^2 S_D(\omega, \zeta). \quad (4)$$

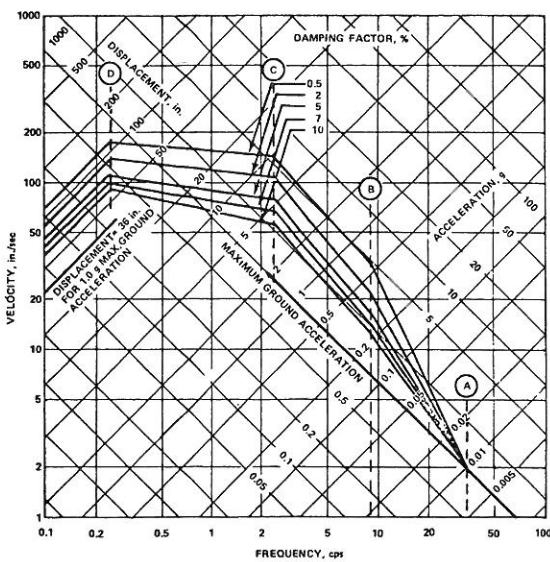


Kuva 1. Maan liikkeen aikafunktiot ja vastaava nopeusspektri [1]

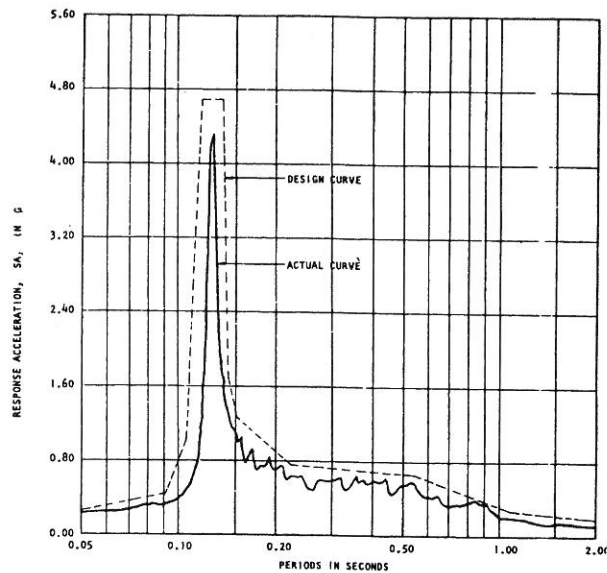


Kuva 2. Yhden vapausasteen harmoninen värähtelijä

Yhteen maaperän kiihtyvyyssaikafunktioon perustuvan "todellisen" spektrin arvo vaihtelee jyrkästi taajuuden suhteen etenkin pienillä vaimennuskertoimen arvoilla (kuva 1). Tästä johtuvien epävarmuustekijöiden välttämiseksi suunnittelutarkoituksiin käytetään joko useampaan aikafunktioon perustuvia tai muuten taositettuja ns. suunnitteluspektrejä (kuva 3). Niitä on kahta eri tyyppiä: maaperäspektrejä (kuva 3a) ja lattiaspektrejä (kuva 3b).

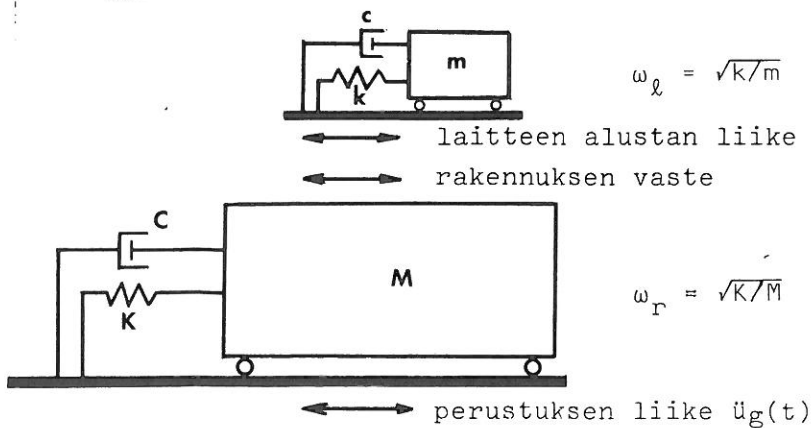


(a)



(b)

Kuva 3. Maaperäspektri (a) ja lattiaspektri (b) [2]



Kuva 4. Rakennus-laite kytkentä

Maaperäspektrit, jotka kuvaavat maan liikettä, ovat muodoltaan laakeita, taa-juuden suhteen leveäkaistaisia. Niitä voidaan käyttää laitteen kuormituksena, kun se on perustettu suoraan maan pinnalle tai rakennukseen, joka on niin jäykkä, ettei se vahvasta maanjäristysliikettä. Jos maaperä on pehmeä, saate- taan joutua ottamaan huomioon myös maaperän ja laitteen vuorovaikutus. Laitte sijaitsee "maajousien ja -vaimentimien" päällä. Maa voidaan dynaamisessa ana- lyysissä kuvata jousina tai elementteinä. Usein tehdään vain lineaarinen ana- lyysi, vaikka tilanne on epälineaarinen. Yksinkertaisessa laskennassa normikuormia käytettäessä vuorovaikutus otetaan huomioon kertoimien avulla.

Rakennuksen tai muun tukirakenteen varassa olevan laitteen kohdalla on pe- riaatteessa kyse kuvan 4 mukaisesta tilanteesta. Kun rakennus on joustava, se vahvistaa ja suodattaa kokemaansa herätettä värähtelyominaisuuksiensa mu- kaan. Myös rakennuksen ja maaperän välinen mahdollinen vuorovaikutus muuntaa maanjäristysliikettä. Yleensä rakennusta ja kaikkia laitteita ei sisällytetä samaan laskentamalliin, vaan laitteet kuvataan rakennuksen yhteydessä hyvin yksinkertaisesti ja analysoidaan tarkemmin erikseen.

Rakennuksen dynaamisen analyysin tuloksena saadaan myös kunkin laitteen kiinnityskohdan liike, joka voidaan muuntaa spektrimuotoon (lattiaspektrit) tai korvausvoimakertoimiksi. Laitteen seismisten kuormitusten määrittäminen tapahtuu siten rakennuksen suunnittelun osana. Tämän vuoksi rakennuksen las- kentatapaa valittaessa on otettava huomioon myös mahdollinen erillisten lai- teanalyysien tarvitsemien lähtötietojen tuottaminen.

Joustavan rakennuksen lattiaspektreihin tulee korostunut huippuarvo ra- kennuksen ominaistaaajuuden kohdalle värähtelyjen vahvistumisen johdosta. Jos laitteen ominaistaaajuus on lähellä rakennuksen ominaistaaajuutta, joudutaan käyttämään spektrin huippuarvoa ja laitteen kuormitus nousee tämän vuoksi helposti erittäin suureksi. Jos laitekuprat otetaan rakennusteknisistä nor- meista, on sovellettava huomattavasti suprempia korvausvoimakertoimia, kuin mitä itse rakennuksen suunnittelussa käytetään [6].

Seismisen kuormituksen tasoa voidaan alentaa esimerkiksi keventämällä lai- tetta, sijoittamalla painopiste edullisempaan kohtaan, virittämällä ominaistaa- juus pois resonanssialueelta sekä lisäämällä vaimennusta. Joskus laite voi- daan myös eristää maanjäristysliikkeestä jousien tai kitkapintojen avulla.

Laitteisiin kohdistuviin maanjäristyskuormiin voidaan edelleen vaikuttaa laitoksen yleissuunnittelulla ja rakennesuunnittelulla.

Rakennuksen muoto ja laitteiden sijoittelu rakennuksessa vaikuttavat oleel- lisesti laitekuormien suuruuteen. Korkeassa rakennuksessa etenkin vaakasuun- tainen kuormitus kasvaa ylöspäin mentäessä. Vaakakuormitukseen vaikuttaa myös etäisyys vääntökeskiöstä, jos rakenne on altis vääntövärähtelyille.

Rakennusmateriaalin valinta ja osien liitostapa vaikuttavat laitekuormien suuruuteen. Hitsatun teräsrakenteen lattiaspektreistä tulee kapea- ja kor-

keahuippuisia, koska vaimennuskerroin on hyvin pieni. Kuvassa 3b on esitetty tyypillinen ydinvoimalaitoksen terässuojakuoren lattiaspektri henkilösulun kiinnityskohtaa varten. Teräsbetonirakenteen tai pulttatun teräsrakenteen lattiaspektrit ovat huomattavasti matalahuippuisempia, koska vaimennuskerroin on ainakin kaksinkertainen hitsattuun rakenteeseen verrattuna (esim. kuva 6).

Jos rakennuksen seismiseen analyysiin jää epävarmuustekijöitä, kuten maaperän ominaisuudet tai liikaa yksinkertaistetut laskentamallit, saatujen lattiaspektrien luotettavuus ei ole riittävä. Tällaisissa tapauksissa tehdään usein parametritarkasteluja lähtötietojen sekä mallien suhteen ja lopullisena lattiaspektrinä käytetään usean eri analyysin tulosten verhokäyrää. Jos tulokset eri oletuksilla poikkeavat paljon toisistaan, lattiaspektristä tulee hyvin laajakaistainen ja korkea, jolloin laitesuunnittelussa resonanssin välttäminen vaikeutuu tai käy mahdottomaksi. Tämä taas aiheuttaa ongelmia laitesuunnittelussa ja laitekustannusten kasvua, joka voi olla moninkertainen verrattuna kuormitusten määrittämisessä saavutettuun säästöön.

Kun pitkä laite on tuettu eri kohtiin rakennusta, laitteen kannalta on eduksi, jos eri tukipisteet liikkuvat samassa vaiheessa ja samalla amplitudilla. Myös seismisten saumojen suunnittelussa tulisi ottaa huomioon niiden laitteille asettamat lisävaatimukset.

## LASKENTAMENETELMÄT

Laitteen maanjäristyskestävyys voidaan selvittää joko testaamalla, laskennallisilla menetelmin tai käyttämällä molempia yhdessä. Raskaiden, passiivisten laitteiden suunnittelussa sovelletaan melkein yksinomaan laskennallisia menetelmiä. Esimerkiksi paineastiat, pumpput, putkistot, säiliöt, konerungot, nosturit ja muuntajat ovat näiden tyypillisiä sovellutuskohteita. Laskemisen etuna testaamiseen verrattuna on yleensä nopeus, helppo toistettavuus, edullinen hinta ja se, että laite voi olla vasta suunnitteluvaiheessa. Tässä esityksessä käsitellään ainoastaan laskennallisia menetelmiä ja erikoisesti dynaamisen analyysin tarjoamia mahdollisuuksia.

### Staattinen analyysi

Vaikka maanjäristys onkin dynaaminen kuormitustapaus, rakenteiden seismisessä suunnittelussa käytetään etenkin talonrakennustekniikassa [6] myös staattista analyysiä.

Laitesuunnittelussa staattinen analyysi tarkoittaa yleensä sitä, että kuormitukseksi asetetaan tasaisen kiihtyvyyden aiheuttamat hitausvoimat. Kuormituksen määrittämisongelma pelkistyy tällöin oikean kiihtyvyyden valintaan. Joitakin rakennuksiin sijoitettavia laitteita varten on jo uusimmissa rakennusteknisissä normeissa annettu valmiiksi kiihtyvyyden arvoja.

Staattista laskentaa voidaan joskus soveltaa myös dynaamisen analyysin

asemasta, vaikka kuormitukset onkin määriteltä vastespektriin avulla. Esimerkiksi ydinvoimalaitostekniikassa tämä on hyväksyttyä, kun laite on niin jäykkä, etteivät värähtelyt vahvistu tai kun käytetään kiihtyvyyssarvoa, jossa on jo otettu huomioon vahvistumisenkin mahdollisuus. Jälkimmäisessä tapauksessa joudutaan helposti laitteiden ylirajoitukseen.

## Dynaaminen analyysi

Ensimmäinen vaihe dynaamisessa analyysissä on rakenteen kuvaaminen jousien, massojen ja vaimentimien muodostamalla laskentamallilla. Mallin todenmukaisuus vaikuttaa ratkaisevasti tulosten tarkkuuteen. Erikoisen tärkeää on valita massapisteen sijoitus siten, että hitausvoimat tulevat oikein kuvattua. Menetelmästä (FEM, differenssi, analyttinen...) riippumatta monen vapausasteen värähtelijälle saadaan seuraavaa muotoa oleva liikeyhtälöryhmä [7]

$$[M] \{\ddot{u}(t)\} + [C] \{\dot{u}(t)\} + [K] \{u(t)\} = \{r(t)\}, \quad (5)$$

missä

- [M] on massamatriisi; usein lävistäjämatriisi
- [C] vaimennusmatriisi; usein oletetaan, että  $[C] = \alpha[M] + \beta[K]$
- [K] jäykkyysmatriisi
- $\{u(t)\}$  siirtymävektori; laskentamallin solmupisteiden suhteelliset siirtymät ja kiertymät alustaan nähden
- $\{\dot{u}(t)\}$  nopeusvektori
- $\{\ddot{u}(t)\}$  kiihtyvyyvektori
- $\{r(t)\}$  kuormavektori

Seismisessä analyysissä rakenteen kuormituksena on tavallisesti kaikkien tukipisteiden identtinen liike ajan funktiona. Kuormavektorin muodostamisessa tarvitaan liikkeen kiihtyvyyden  $\ddot{u}_g(t)$  (kuva 1) komponentit koordinaattiakselien x, y ja z suuntaan. Näiden avulla voidaan merkitä

$$\{r(t)\} = -[M](\ddot{u}_{gx}(t)\{l_x\} + \ddot{u}_{gy}(t)\{l_y\} + \ddot{u}_{gz}(t)\{l_z\}). \quad (6)$$

Vektori  $\{l_x\}$  sisältää alustan liikkeen  $u_{gx} = 1$  aiheuttamat rakenteen absoluuttiset siirtymät.

## Aikaintegrointi alkuperäisessä koordinaatistossa

Vasteen aikakehitys  $\{u(t)\}$  voidaan integroida numeerisesti tietokoneella suoraan liikeyhtälöryhmästä (5). Näin voidaan ratkaista myös materiaalista ja geometrialtaan epälineaariset tapaukset. Jos vapausasteita on runsaasti, eikä tarkasteltava aikaväli ole aivan lyhyt, tietokoneaikaa kuluu runsaasti. Taloudelliset näkökohdat rajoittavatkin yleensä menetelmän käytön vain tapauksiin, joissa esiintyy epälineaarisuuksia tai epätavallista vaimen-

nusta. Lineaaristen rakenteiden kohdalla kannattaa useimmiten soveltaa seuraavaksi esiteltäviä harmonisen analyysin menetelmiä.

#### Aikaintegrointi normaalikoordinaatistossa

Lineaarisen laskentamallin yleisestä ominaisarvotehtävästä

$$[K]\{\phi_i\} = \omega_i^2[M]\{\phi_i\} \quad (7)$$

voidaan ratkaista iteroimalla vaimentamattoman vapaan värähtelyn ominaiskulumataajuudet  $\omega_i$  ja ominaisvektorit  $\{\phi_i\}$ . Ominaisvektorit ortonormalisoidaan massamatriisin  $[M]$  suhteen ja vaimennusmatriisi  $[C]$  oletetaan ortogonaaliseksi ominaisvektoreita vastaan, eli asetetaan ehdot

$$\begin{aligned} \{\phi_i\}^T[M]\{\phi_j\} &= \begin{cases} 0 & \text{kun } i \neq j \\ 1 & \text{kun } i = j \end{cases} \\ \{\phi_i\}^T[C]\{\phi_j\} &= \begin{cases} 0 & \text{kun } i \neq j \\ 2\omega_i\zeta_i & \text{kun } i = j \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

Tavallisesti ei kannata ratkaista kaikkia värähtelymuotoja, vaan alimmat (1...p) riittävät. Kuinka monta muotoa kulloinkin tarvitaan, joudutaan päättämään tapauskohtaisesti. On kiinnitettävä huomiota siihen, että rakenteen pääsuuntien ja tärkeimpien rakenneosien kannalta oleelliset muodot tulevat laskentaan mukaan. Myös kuormituksen vaikutussuunta ja -paikka sekä taajuus sisältö vaikuttavat siihen, mitkä värähtelymuodot ovat tulosten kannalta merkittäviä.

Kun liikeyhtälöryhmän (5) ratkaisua haetaan ratkaistuista ominaismuodoista normaalikoordinaatteja  $q_i(t)$  käyttäen muodostetun lausekkeen

$$\{u(t)\} \approx q_1(t)\{\phi_1\} + q_2(t)\{\phi_2\} + \dots + q_p(t)\{\phi_p\} \quad (9)$$

avulla, saadaan p erillistä yhden vapausasteen värähtelijän liikeyhtälöä.

$$\ddot{q}_i(t) + 2\omega_i\zeta_i\dot{q}_i(t) + \omega_i^2q_i(t) = \{\phi_i\}^T\{r(t)\} \quad (i=1, \dots, p), \quad (10)$$

missä  $\zeta_i$  on värähtelymuodon  $\{\phi_i\}$  suhteellinen vaimennuskerroin. Normaalkoordinaatit  $q_i(t)$  ratkaistaan numeerisesti integroimalla. Rakenteen siirtymävektorin aikakehitys  $\{u(t)\}$  saadaan sijoittamalla  $q_i(t)$ -arvot lausekkeeseen (9). Voimat, momentit ja jännitykset lasketaan siirtymistä normaaliin tapaan.

#### Vastespektrianalyysi

Maanjäristysanalyysissä eniten sovellettu dynaamisen analyysin laskentamenetelmä on vastespektrianalyysi [1], jonka antamat tulokset ovat usean vapausasteen tapauksessa "todellisen vasteen" likiarvoja. Menetelmän tarkkuus

on kuitenkin tavallisesti aivan riittävä kuormituksen määrittämistarkkuuteen nähden.

Tarkastellaan yhden koordinaattiakselin (esim. x-) suuntaisen herätteen vaikutusta kerrallaan. Määritellään ominaisvärähtelymuodon  $\{\phi_i\}$  osallistumiskerroin x-suuntaan  $\gamma_{ix} = \{\phi_i\}^T [M] \{1_x\}$ . Kun palautetaan mieleen siirtymän vastespektrin  $S_d(\omega, \zeta)$  määritelmä kaavasta (2), saadaan normaalikoordinaatin  $q_i$  ja ominaisvektorin  $\{\phi_i\}$  maksimiampplitudeiksi x-suuntaisen seismisen herätteen  $\ddot{u}_{gx}(t)$  johdosta

$$|q_{ix}|_{\max} = \gamma_{ix} S_{dx}(\omega_i, \zeta_i)$$

ja (11)

$$\{\phi_{ix}\}_{\max} = \gamma_{ix} S_{dx}(\omega_i, \zeta_i) \{\phi_i\} .$$

Kun heräte on satunnaissuure, kahden eri ominaisvärähtelymuodon maksimiampitudien osuminen samaan ajanhetkeen ei ole todennäköistä, jos niiden ominaistaajuuudet poikkeavat riittävästi (esim. >10 %) toisistaan. Tämän vuoksi siirtymille lasketaan todennäköiset maksimi-arvot kaavasta

$$\{u_x\}_{\max} = \sqrt{\{\phi_{1x}^2\}_{\max} + \{\phi_{2x}^2\}_{\max} + \dots + \{\phi_{px}^2\}_{\max}} . \quad (12)$$

Samanlaista menettelyä sovelletaan myös jännityksille. Ensiksi lasketaan kunkin ominaisvektorin maksimia  $\{\phi_{ix}\}_{\max}$  vastaavat jännitykset  $\{\sigma_{ix}\}_{\max}$ , jotka yhdistetään todennäköisiksi maksimijännityksiksi

$$\{\sigma_x\}_{\max} = \sqrt{\sum_{i=1}^p \{\sigma_{ix}^2\}_{\max}} . \quad (13)$$

Koska erisuuntaisten (x-, y- ja z) herätteiden maksimivaikutukset eivät myöskään osu todennäköisesti samaan ajanhetkeen, yhdistetään erikseen lasketut siirtymien maksimiampitudit ( $u_{x \max}$ ,  $u_{y \max}$  ja  $u_{z \max}$ ) samoinkuin vastaavasti jännitykset kaavoilla

$$u_{\max} = \sqrt{u_{x \max}^2 + u_{y \max}^2 + u_{z \max}^2}$$

ja (14)

$$\sigma_{\max} = \sqrt{\sigma_{x \max}^2 + \sigma_{y \max}^2 + \sigma_{z \max}^2} .$$

Huomattava vastespektrianalyysin etu on se, että kuormitustietona tarvitaan vain spektrit. Useinhan alustan liikkeen selville saaminen voi olla hyvin vaivalloista. Tietokoneajoista tulee myös vähemmän tulostusta kuin aikaintegrointisovellutuksista, mikä helpottaa tulosten käsittelytyötä.



## ESIMERKKI FEM-OHJELMAN KÄYTÖSTÄ DYNAAMISEEN ANALYYSIIN

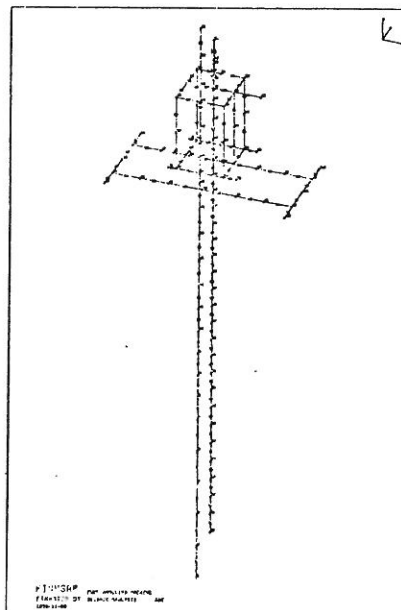
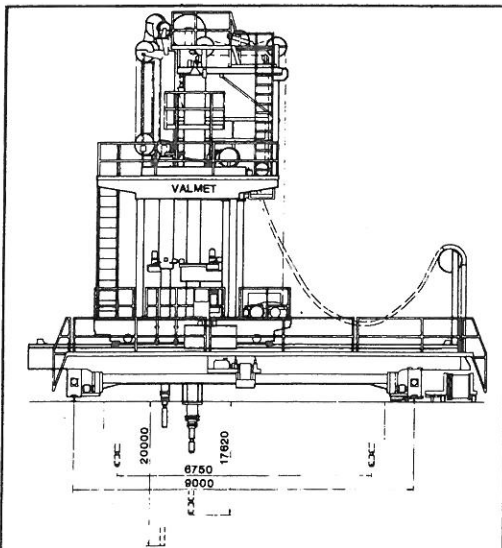
FEM-ohjelmilla suoritetuista kotimaisten ydinteknisten laitteiden seismisistä analyyseistä voidaan mainita mm. suojakuoren henkilösulun, putkiston, nosturin ja polttoaineenvaihtokoneen analyytit. Tässä tarkasteltavaksi esimerkiksi on valittu Valmet Oy:n valmistamalle VVER 440-tyyppisen ydinvoimalan polttoaineenvaihtokoneelle suoritettu maanjäristysanalyysi.

Laskennassa on käytetty FINNSAP-elementtimenetelmäohjelmaa [8] rakenteen jäykkyys- ja massamatriisien muodostamiseen sekä dynaamiseen analyysiin. Laskentamallissa (kuva 5) on kuvattu koneen runkorakenne ja mastot palkkielementteinä. Lisäksi on otettu huomioon koneen varustelun massa sekä mastoja ympäröivä allasvesi. Laskentamallin kokoa luonnehtivat seuraavat tiedot:

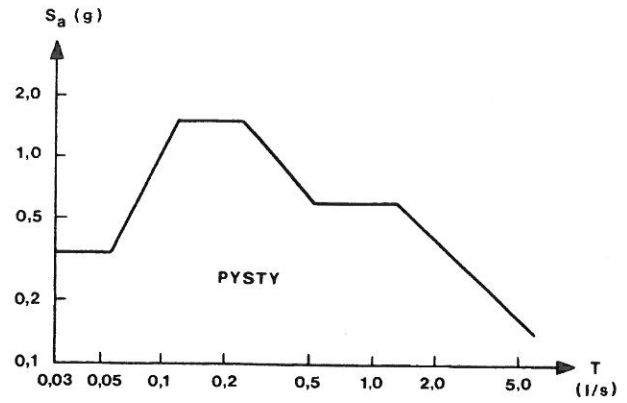
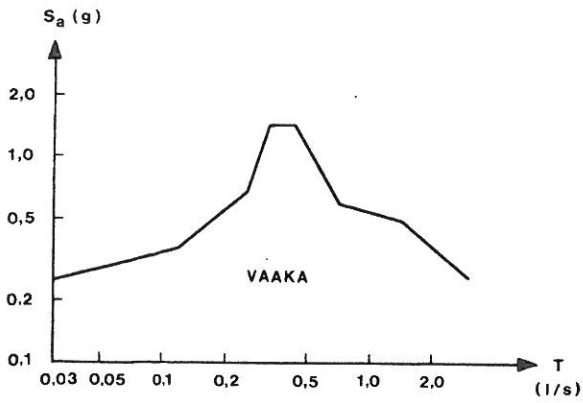
- elementtejä	119
- solmupisteitä	102
- vapausasteita	583
- jäykkymatriisin puolinauhaleveys	190
- ratkaistuja ominaistajuuksia	35

Analyysimenetelmäksi valittiin vastespektrianalyysi, koska kuormitukset oli ilmoitettu spektrien (kuva 6) avulla. Ensin ratkaistiin ominaisvärähtelymuodot ja sen jälkeen laskettiin maksimisiirtymät ja -jännitykset kaavojen (11)...(14) mukaan. Tässä tapauksessa dynaaminen analyysi on käytännössä lähes ainoa mahdollinen, koska rakenteen alimmat ominaistajuudet ovat hyvin matalia ( $\approx 1$  Hz). Kuvassa 7 on esitetty rakenteen ominaisvärähdysmuotoja.

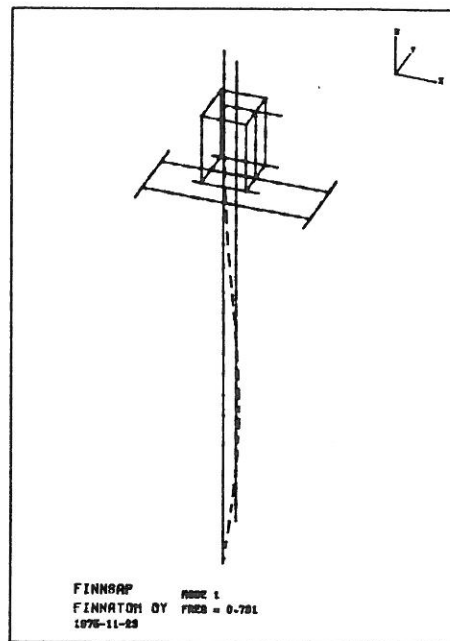
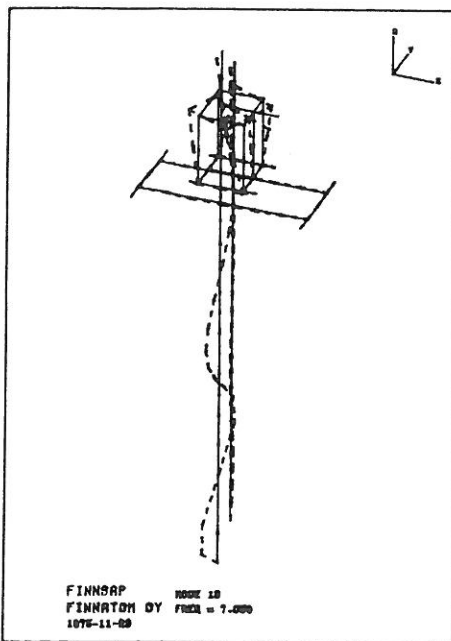
Rakenteen eri osille (silta, vaunu, mastot) on tehty myös erilliset yksinkertaiset elementtimallit, jotka on varmennettu vertaamalla tuloksia täydellisellä mallilla laskettuihin. Näin ei tarvitse aina kuormituksen muuttuessa suorittaa kokonaismallin tietokoneajoja uudestaan.



Kuva 5. Polttoaineenvaihtokone ja laskentamalli



Kuva 6. Esimerkkitapauksen vastespektri



Kuva 7. Kaksi ominaisvärähtelymuotoa

#### KIRJALLISUUTTA

- [1] Applied Mechanics in Earthquake Engineering. Edited by W.D. Iwan, The American Society of Mechanical Engineering AMD-Vol. 8, New York 1974, 259 s.
- [2] Proceedings of the Speciality Conference on Code Requirements for Nuclear Containments, The American Society of Civil Engineers 1974, 100 s.
- [3] Seismic Response Analysis of Nuclear Power Plant Systems. 2nd International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology Vol. K, Berlin Sept. 1973.

- [4] Seismic Response Analysis of Nuclear Power Plant Systems. 3 rd International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology Vol. K, London Sept. 1975.
- [5] Seismic Response Analysis of Nuclear Power Plant Systems. 4th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology Vol. K, San Francisco Aug. 1977.
- [6] Dowrick, D.J., Earthquake Resistant Design. John Wiley & Sons, 1977. 374 s.
- [7] Clough, R.W., Penzien, J., Dynamics of Structures. McGraw-Hill, 1975. 634 s.
- [8] FINNSAP ohjelmapaketti, käyttäjän käsikirja. Oy Finnatom Ab, 1977.

*Eero Torkkeli, dipl.ins., Oy Finnatom Ab*