

## VÄESTÖNSUOJAN TERÄSBETONIRAKENTEIDEN MITOITUS TÄRÄHDYKSELLE

Juhani Olin, Asko Sarja ja  
Jukka Jokela

Rakenteiden Mekaniikka Vol. 13  
No. 1 1980 s. 1-9

**YHTEENVETO:** Artikkelissa käsitellään väestönsuojien teräsbetonirakenteiden mitoitusta tärähdyskuormille. Kimmoteoreettista, yhden vapausasteen värähtelijämalliin perustuvaa mitoitusmenetelmää on kehitetty siten, että plastisoitumisen vaikutus tulee likimäärin huomioon otetuksi. Tätä varten on tietokonelaskelmien avulla laadittu mitoitusspektrit, joiden avulla saadaan staattinen korvauskuorma. Staattinen korvauskuorma määritetään taivutusmomentille ja leikkausvoimalle erikseen.

### JOHDANTO

Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen betoni- ja silikaattitekniikan laboratoriossa vaomistui viime vuoden loppupuolella tutkimus, jonka tarkoituksena oli kehittää väestön- ja laitesuojien suunnittelijoiden käyttöön yhtenäiset mitoitusmenetelmät räjähdysten aiheuttamaa tärähtelyä ja paineiskua varten. Tutkimuksessa tehtiin kirjallisuusselvitys ja tietokonelaskelmia.

Tutkimuksen tuloksena tehdyssä julkaisussa /1/ esitetään tärähtelyn aiheuttaman kuormituksen käsinlaskumenetelmä, jonka kimmoteoreettinen osa perustuu pääosiltaan lähteeseen /2/. Plastisoitumisen vaikutuksen huomioonottamista varten on kehitetty tietokonelaskemien avulla uudet mitoitusspektrit.

Julkaisun toisessa osassa esitellään teräsbetonirakenteiden paineiskumitoitusmenetelmä. Tässä esityksessä käsitellään tärähtelymitoituksen pääperiaatteita sekä sen yhteydessä käytettävien mitoitusspektrien laatimista.

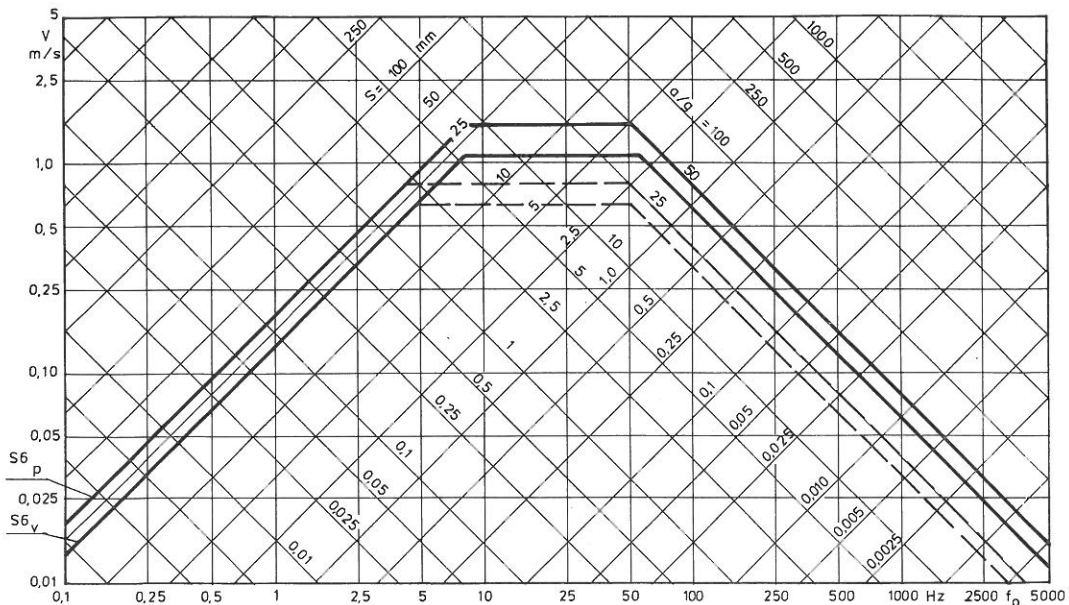
Tärähtelyvaikutus muutetaan yleensä staattiseksi mitoitukskuormaksi. Tavallisimmin tämä suoritetaan käyttämällä vakiosuuruisia muunnoskertoimia tai sysäysspektriä. Vakiomuunnoskertoimia käytettäessä ei rakennetyypin ja rakenteen jäykkyyden vaikutusta saada esille. Sysäysspektristä, joka kuvaa yksivapausasteisen värähtelijän ominaisliikesuureita, saadaan rakenteen kiihtyvyyden ominaistajuuden funktiona. Ominaistajuus puolestaan riippuu rakenteen jäykkyydestä. Tällöin on ratkaisevaa, miten rakenteen jäykkyys laskeaan ja minkälaista spektriä käytetään.

Kuormituksen luonteesta johtuen on luonnollista, että mitoitus suoritetaan murtotilan mukaan. Tällöin teräsbetonirakenne on halkeillessa tilassa ja osittain plastisoitunut, joten sen jäykkyys ja ominaistajuus poikkeavat

oleellisesti lineaarisen kimmoteorian perusteella lasketuista arvoista. Kimmoteorian mukaiset tärähtelylaskelmat johtavat tästä syystä ylimitoitukseen. Murtotilamitoituksella saadaan myös rakenteen kapasiteetti tarkemmin lasketuksi kuin kimmoteorian mukaisella jännitystarkastelulla.

## KUORMITUKSEN LUONNE JA SUURUUS

Väestönsuojaa ympäröivä maaperä joutuu siihen kohdistuvan räjähdysvaikutuksen tai paineiskun johdosta voimakkaasti vaimenevaan heilahdusliikkeeseen. Ilmiö on siten luonteeltaan nopeasti ohimenevä tärähdys, joka siirtyy rakenteisiin maahan tai kallioon liittyvien tukien välityksellä. Suojan rakenteiden muodo ja ominaisvärähdystaajuus rakenteiden eri kohdissa vaikuttavat suuresti niiden kestäkykyyn. Erityisen vaarallisia ovat rakenteiden kiinnityskohtien ympärille syntyvät suuret leikkausjännitykset. Suojan suunnittelussa on otettava huomioon, että tärähdyskuormitukset vaikuttavat erityisesti sellaisten rakennusosien mitoittamiseen, joita muut kuormitukset eivät rasita lainkaan tai vain vähäisessä määrin.



Kuva 1. Tärähdyn liikesuureita kuvaava sysäysspektri, S6-luokka. /3/ ehyt viiva: laitteiden kiinnityskohdassa esiintyvä tärähdys, katkoviiva: maaperän tärähdys,  $S6_p$  = pystykomponentti,  $S6_v$  = vaakakomponentti.

Kuormituksen suuruus riippuu räjähteen koosta, laadusta ja etäisyydestä. Suojauksessa pyritään rakennuskustannusten ja suojaustason väliseen optimiin. Suunnittelun perusteena oleva maaperän tärähtely saatiin tässä tutkimuksessa

sisäasiainministeriön ohjeissa /3/ olevista säsäyssipektreistä, joista on esimerkkinä kuvassa 1 oleva S6-luokan spektri.

#### TÄRÄHTELYMITOITUKSEN PERIAATTEET

Kimoteoreettinen menetelmä perustuu rakenneosan tarkasteluun yhden massapisteen värähtelijänä. Massapisteen kiinnitysjäykkyys lasketaan rakenneosan kimmoisena jäykkyytenä. Tätä jäykkyyttä käyttämällä lasketaan värähtelijän ominaistääjuus. Massapisteen kiihtyvyyss saadaan kiinnityspisteen värähtelyspektristä ominaistääjuuden funktiona. Massapiste vastaa rakenneosan painopistettä. Staattinen korvauskuorma lasketaan käyttämällä rakenneosan keskimääräistä kiihtyvyyttä, joka yleensä on pienempi kuin painopisteen kiihtyvyyss.

Teräsbetonirakenteen jäykkyys muuttuu oleellisesti rakenteen halkeilun johdosta. Tämä otetaan huomioon ominaistääjuutta laskettaessa käyttämällä rakenteen halkeamattoman ja haljenneen tilan jäykkyyksien keskiarvoa.

Esimerkiksi ristiin raudoitetun vapaasti tuetun laatan tapauksessa laskelmat ovat seuraavat:

Poikkileikkauksen jäyhyysmomentti lasketaan yhtälöstä

$$I = \frac{I_b + I_r}{2}, \quad (1)$$

jossa  $I_b$  on halkeamattoman poikkileikkauksen jäyhyysmomentti ja  $I_r$  on haljenneen poikkileikkauksen jäyhyysmomentti.

Vapaasti tuetun laatan kimmainen jäykkyys lasketaan kaavalla

$$K = \left(77 + \frac{180}{\alpha^3}\right) \frac{E_c \cdot I}{L^4}, \quad (2)$$

jossa  $L$  on laatan lyhyempi sivumitta ja  $\alpha$  on laatan pitemmän ja lyhyemmän sivumitan suhde.

Ominaisvärähdysaika lasketaan yhtälöllä

$$T = 5,5 \cdot \sqrt{\frac{w}{Kg}}, \quad (3)$$

jossa  $w$  on laatan omapaino ja hyötykuorma pinta-alayksikköä kohti ja  $g$  maan vetovoiman kiihtyvyyss.

Laatta mitoitetaan murtotilan perusteella tasaiselle kuormalle

$$p = (1 \pm 0,5)w, \quad (4)$$

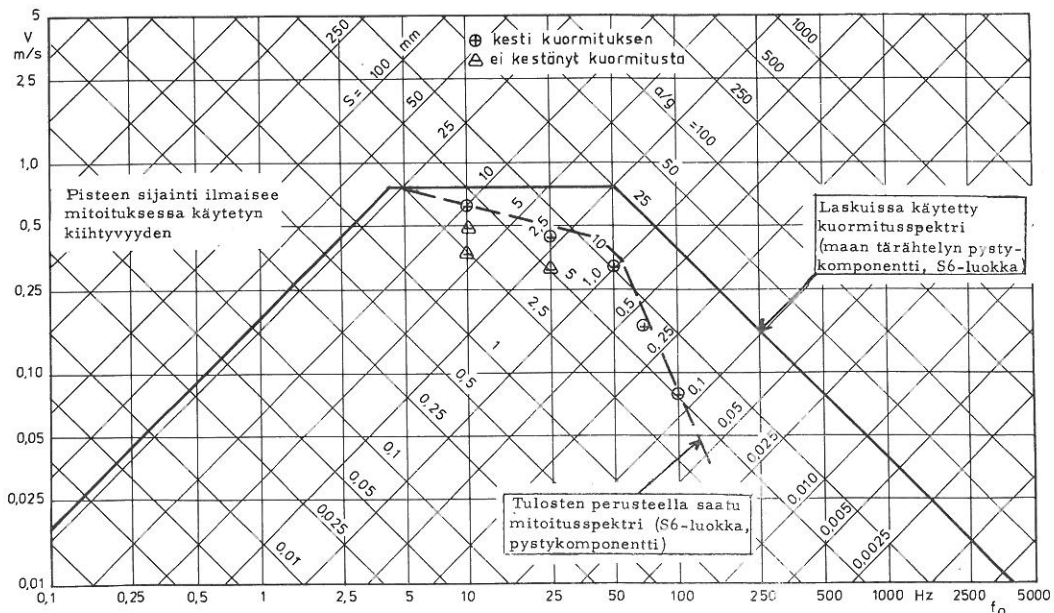
jossa  $a$  on laatan painopisteen kiihtyvyyden suhde maan vetovoiman kiihtyvyyteen, ja se saadaan mitoitusspektristä ominaistääjuuden ( $f = \frac{1}{T}$ ) funktiona.

Kimmoisessa tapauksessa mitoitusspektri olisi sama kuin tukien tärähtelyä kuvaava spektri. Tutkimuksessa plastisoitumisen vaikutus otettiin likimääräisesti huomioon laatimalla muunnetut mitoitusspektrit. Niiden avulla mitoitettu rakenne kestää lähtökohtana olevan sisäasiainministeriön ohjeiden mukaisen tukien tärähtelyn, edellyttäen että pysyviä muodonmuutoksia, toisinsanoen plastisoitumista, sallitaan.

Rakenteen sitkeä toiminta on varmistettava estämällä leikkausmurto. Sen vuoksi laadittiin erilliset mitoitusspektrit leikkaukselle ja taivutukselle.

### MITOITUSSPEKTRIEN LAATIMINEN

Muunnetut spektrit laadittiin mitoittamalla erilaisia laattoja kimmoteoreettisella menetelmällä ja tarkistamalla tietokonelaskennan avulla, kestikö laatta lähtökohtana olevan tärähtelykuormituksen. Laskuesimerkeissä laattojen mittasuhteita, raudoitusta, tuentaa ja hyötykuormaa vaihdeltiin, joten laatoille saatiin erilaisia ominaistajuuksia. Kuvassa 2 on esimerkkejä laskentojen tuloksista. Pisteiden sijainti ilmaisee kiihtyvyyden, jolle laatta on mitoitettu. Ympyrällä merkityt tapaukset kestivät kuormituksen osittain plastisoituen ja kolmiolla merkityt tapaukset eivät kestäneet kuormitusta. Kun tuloksia oli riittävästi, voitiin muunnettu mitoitusspektri piirtää niiden pisteiden kautta, jotka kestivät kuormituksen (katkoviiva kuvassa 2).



Kuva 2. Esimerkkejä tietokonelaskelmien tuloksista.

Tietokonelaskelmissa käytettiin elementtimenetelmään ja kimmoplastiseen materiaalmalliin perustuvaa ohjelmaa, joka on kehitetty Helsingin teknillisen korkeakoulun rakennetekniikan laitoksella.

Laskelmissa laatan reunoja kuormitettiin tukien sinimuotoisella tärähtelyllä

$$\ddot{u} = a \sin 2\pi f t, \quad (5)$$

jossa  $f$  on laatan ominaistajuus

$a$  on kiihtyvyys

$t$  on aika

Teräsbetoni kuvattiin kimmoplastisena materiaalina, jolle määritettiin redusoitu kimmokerroin  $E_r$  ja redusoitu myötöraja  $\sigma_{yR}$  siten, että  $E_r$  vastaa poikkileikkauksen jäykkyyttä:

$$E_r \frac{bh^3}{12} = E_c \frac{I_b + I_r}{2}, \quad (6)$$

$\sigma_{yR}$  vastaa laatan momenttikapasiteettia:

$$\sigma_{yR} = \frac{M_u}{W_{pl}}. \quad (7)$$

Kaavoissa  $M_u$  on laatan momenttikapasiteetti,

$W_{pl}$  on plastinen taivutusvastus,

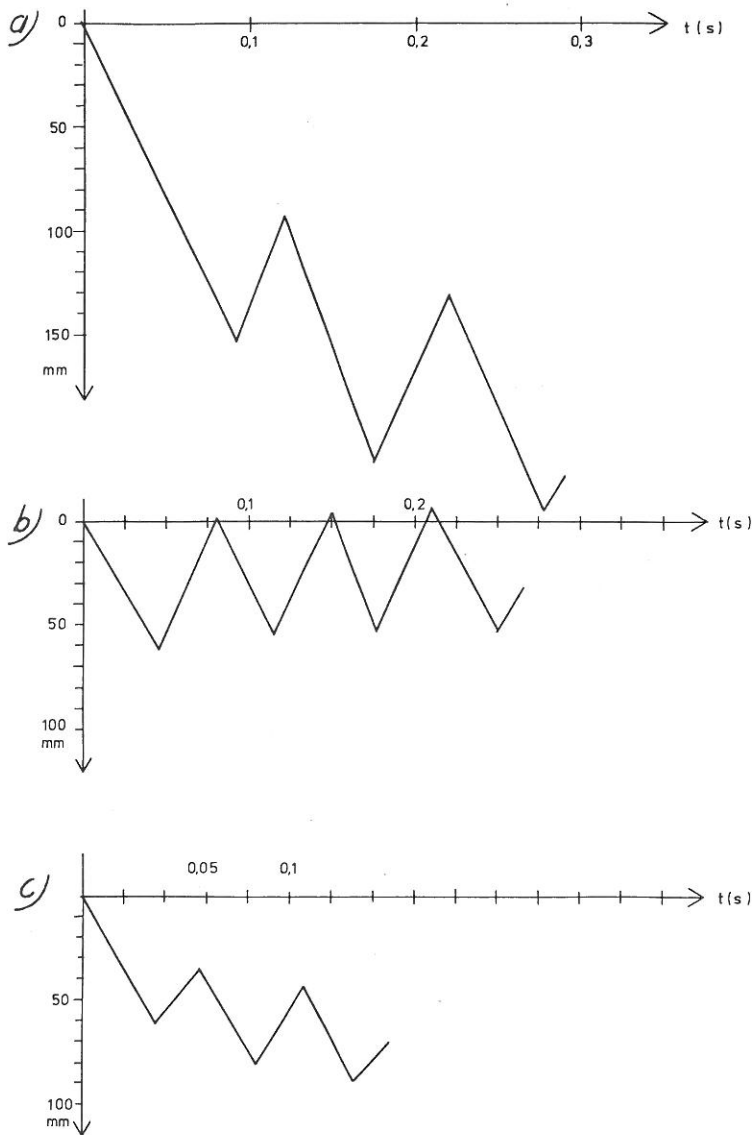
$E_c$  on betonin kimmokerroin,

$I_b, I_r$  on halkeamattoman ja haljenneen poikkileikkauksen jäyhyysmomentit.

Laatan katsottiin kestäneen kuormituksen, mikäli kolmen tärähdysjakson jälkeen pystyvä taipuma oli alle 1 % laatan lyhyemmästä jännemitasta. Esimerkkejä laatan keskipisteen taipumasta ensimmäisten tärähdysjaksojen aikana on esitetty kuvassa 3.

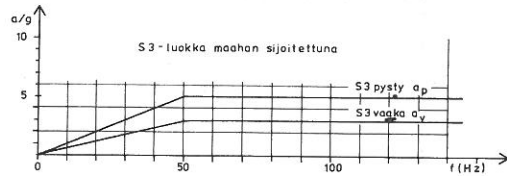
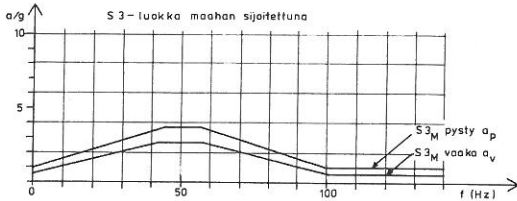
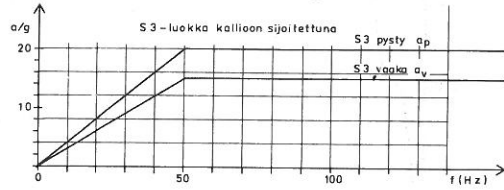
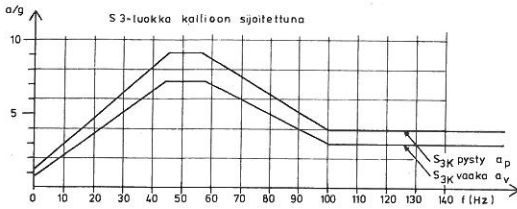
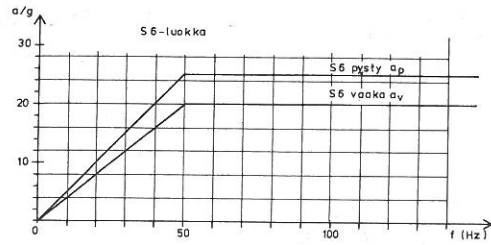
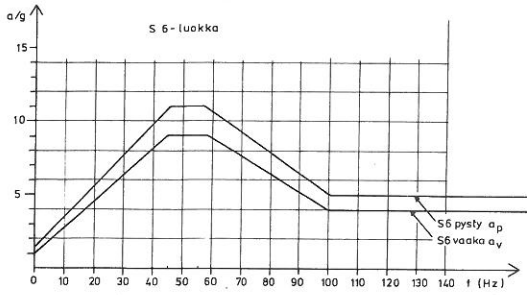
Laskelmien perusteella saatiin mitoitusspektrit taivutusmomentille (kuva 4). Spektrin muodosta ilmenee, että kuormituksena käytetyn tärähtelyn vaikutus on epäedullisin laatoissa, joiden ominaistajuus on suunnilleen 50 Hz. Ominaistaajuuden ollessa yli 50 Hz ei kuormituskiihtyvyys enää kasva, ja koska siirtymän amplitudi samalla pienenee, muuttuu kuormitus vähemmän vaaralliseksi. Ominaistaajuuden ollessa pienempi kuin 50 Hz kasvaa siirtymäamplitudi, mutta samalla kiihtyvyys pienenee, joten kuormituskin on pienempi.

Edellä olevan perusteella on taivutskestävyuden kannalta edullista käyttää joko ohuita, suhteellisen taipuisia, runsaasti raudoitettuja laattoja, joiden ominaistaajuus on alhainen tai paksuja, jäykkiä laattoja, joiden ominaistaajuus on korkea. Kuitenkin laatan jäykkyyden kasvaessa leikkausvoiman maksimi-arvo kasvaa, mikä on otettava huomioon leikkautumislaskelmissa.



Kuva 3. Esimerkkejä laatan keskipisteen taipumasta tietokonelaskelmien perusteella.

- a) mitat: 250 · 7000 · 10000, ominaistaajuus:  $f = 10$  Hz, tuenta: vapaasti tuettu, kuormitus:  $\ddot{u} = a \sin 2\pi f t$ ,  $a = 10$  g. Pysyvä muodonmuutos kolmen tärähdyksen jälkeen:  $> 200$  mm = 3 % lyhyemmästä jännemitasta; ei kestänyt kuormitusta.
- b) mitat: 250 · 5800 · 8300, ominaistaajuus:  $f = 15$  Hz, kuormitus:  $\ddot{u} = a \sin 2\pi f t$ ,  $a = 12$  g. Pysyvä muodonmuutos kolmen tärähdyksen jälkeen:  $\sim 30$  mm = 0,5 % lyhyemmästä jännemitasta; kesti kuormituksen.
- c) mitat: 250 · 4500 · 9000, ominaistaajuus:  $f = 21$  Hz, kuormitus:  $\ddot{u} = a \sin 2\pi f t$ ,  $a = 22$  g. Pysyvä muodonmuutos kolmen tärähdyksen jälkeen:  $\sim 60$  mm = 1,3 % lyhyemmästä jännemitasta; ei kestänyt kuormitusta.



Kuva 4. Mitoitusspektrit taivutusmomentille.

Kuva 5. Mitoitusspektrit leikkausvoimalle.

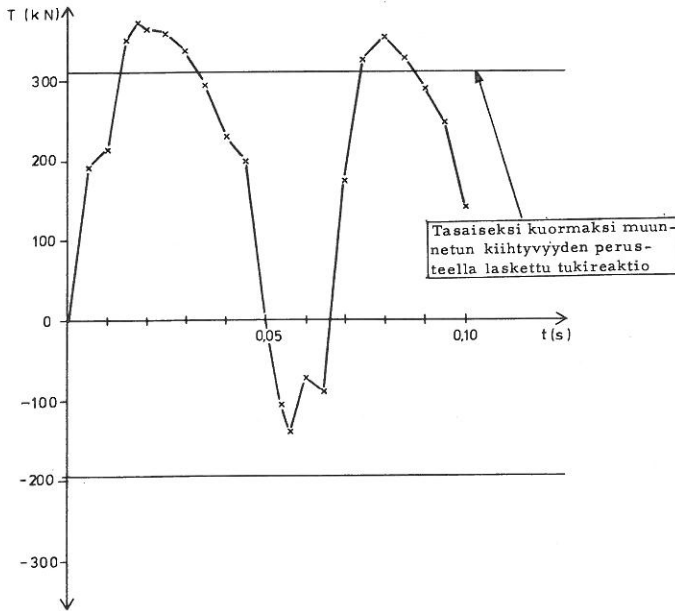
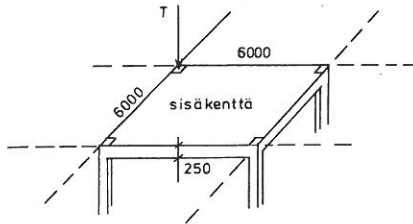
## LAATAN LEIKKAUTUMINEN

Kuvan 4 spektrien määrittämisen lähtökohdaksi on rakenteen sitkeä käyttäytyminen, jolloin kuormitus taivutuksessa voi ylittää mitoituskuorman. Kyseisten spektrien avulla laskettu mitoituskuorma on siis pienempi kuin todellinen kuormitus.

Tietokonekalkulaatioiden avulla selvitetään leikkausjännityksen suuruutta laatan reunalla, ja todettiin, että se vastaa suunnilleen leikkausjännitystä, joka saadaan jakamalla todellinen kuormituskiikkyvyys tasaiseksi kuormaksi laatan alueelle. Näin ollen mitoituskuorma leikkausvoimaa laskettaessa tulisi määrittää tukien todellista värähtelyä kuvaavista spektreistä eikä taivutusmomentin yhteydessä käytetyistä redusoiduista spektreistä. Leikkausvoiman mitoituspektrit on esitetty kuvassa 5.

Pilarilaatan tukireaktio ja pilarin normaalivoima saadaan myös kuvan 5 spektrien perusteella. Kuvassa 6 on esimerkki pilarilaatan tietokonekalkulaation tuloksesta. Tukireaktion maksimiarvo on varsin lähellä tasaiseksi kuormaksi muunnetun kuormituskiikkyvyyden perusteella laskettua tukireaktiota.

kuormitus:  
 $\ddot{u} = a \sin 2 \pi f t$   
 $a = 9 g$   
 $f = 18 \text{ Hz}$



Kuva 6. Pilarilaatan tukireaktio tietokonelaskelmien perusteella.

## LOPPUPÄÄTELMÄT

Tutkimuksessa on todettu, että väestönsuojan teräsbetonirakenteiden tärähtelymitoituksessa voidaan betonin halkeilun ja plastisoitumisen johdosta käyttää pienempää mitoituskiihtyvyyttä kuin maaperän tai tukien tärähtelyä kuvaava kiihtyvyys. Edellytyksenä on, että rakenne käyttäytyy sitkeästi, eikä leikkausmurtoa tapahdu. Käytännössä menetellään siten, että kimmoteoreettisen laskentamenetelmän yhteydessä käytetään kahta mitoituspektriä, joiden avulla staattinen korvauskuorma määritetään erikseen taivutusmomentille ja leikkausvoimalle.

## KIRJALLISUUTTA

- [1] Olin, J., Sarja, A. & Jokela, J., Väestön- ja laitesuojien tärähdys- ja paineiskumitoitus. Espoo, 1979. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Betoni- ja silikaattitekniiikan laboratorio, Tiedonanto 56. 37 s.



- [2] Design of structures to resist nuclear weapons effects. ASCE (American Society of Civil Engineers). Manual of engineering practice 42. New York 1961. 150 s.
- [3] S3- ja S6-luokan väestönsuojien teknilliset määräykset. Sisäasiainministeriö, pelastusosasto. Helsinki 1977. 54 s.

*Juhani Olin, dipl.ins., Asko Sarja, tekn.tri., Jukka Jokela, tekn.lis.,  
Valtion teknillinen tutkimuskeskus, betoni- ja silikaattitekniikan labora-  
torio*