

# KPM-Engineering

FMC GROUP

## Teräsrakenteiden maanjäristysmitoitus

Teräsrakenteiden T&K-päivät  
Helsinki 28.–29.5.2013

Jussi Jalkanen, Jyri Tuori ja Erkki Hömmö

---

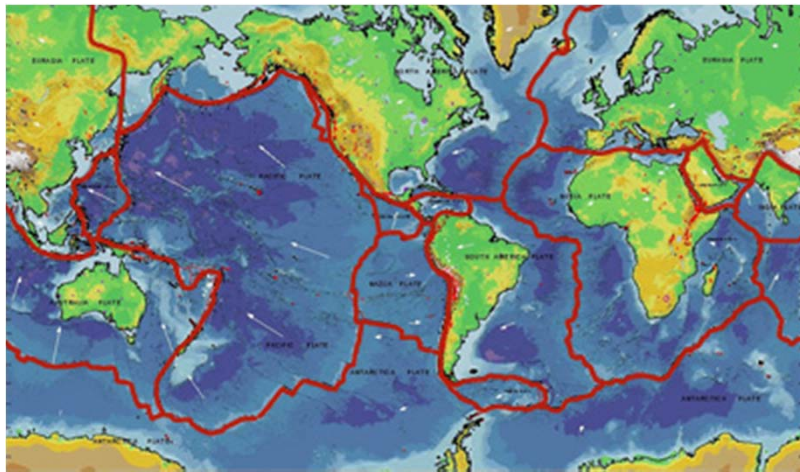
# Sisältö

1. Maanjäristyksistä
2. Seismisten kuormien suuruus ja kiihtyvyysspektri
3. Seismiset analyysimenetelmät
4. Teräsrakenteiden maanjäristysmitoitus
5. Maanjäristysmitoituksen kompastuskiviä

# Maanjärityksistä

## Kuinka maanjäritykset syntyvät?

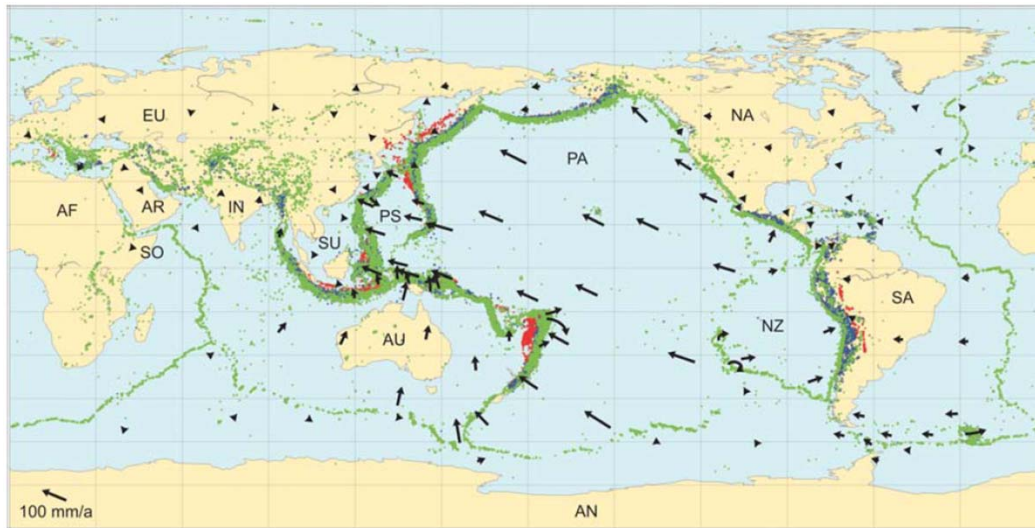
- Ohuet mannerlaatat pyrkivät liikkumaan toisiinsa nähden maan plastisen sisäosan päällä.



- Kitka estää liikkeen, jolloin jännitykset laattojen välillä kasvavat.
- Kun kitka ei pysty enää estämään liikettä syntyy maanjäritys.

## Missä maanjärityksiä tapahtuu?

- Valtaosa maanjärityksistä sattuu mannerlaattojen reuna-alueilla.



(Korja, Heikkinen ja Karkkulainen, Miksi maapallolla tärisee?, Dimensio 4/2005)

- Tyynten valtameren reuna-alueilla vapautuu 70 - 90 % maapallon seismisestä energiasta.
- Tuhoisia järityksiä sattuu myös mannerlaattojen sisäosien heikkouskohdissa (esim. Kiina 2008, 1976, 1920 jne.).

## Kuinka usein maanjärityksiä tapahtuu?

- Maanjärityksen tapahtumista on mahdotonta ennustaa tarkasti.
- Tilastollisesti voidaan yrittää arvioida maanjärityksen todennäköisyyttä tulevaisuudessa.
- Isoja maanjärityksiä sattuu harvemmin ja pienempiä jatkuvasti.

Magnitudi	Vuotuinen esiintymistiheys
8,0 tai suurempi (erittäin voimakas)	1
7 - 7,9 (hyvin voimakas)	18
6 - 6,9 (voimakas)	120
5 - 5,9 (keskisuuri)	800
4 - 4,9 (lievä)	~ 6 200
3 - 3,9 (pieni)	~ 49 000
2 - 3 (hyvin pieni)	~ 360 000
1 -2 (erittäin pieni)	~ 3 000 000

- Ison maanjärityksen jälkeen esiintyy usein sarja pienempiä jälkijärityksiä.

---

## Miten maanjäristyksen suuruutta mitataan?

- Suuruutta (tai mahdollista voimakkuutta) voidaan kuvata *magnitudilla*, *intensiteetillä* ja kallioperän *maksimi vaakakihtyvyydellä*.

### Magnitudi

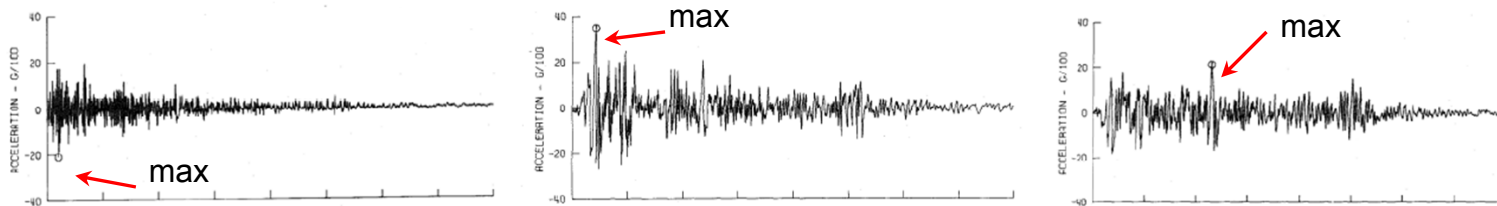
- Magnitudi kuvaa maanjäristyksen voimakkuutta (maan liikkeen suuruutta) järjestyslähteessä.
- Magnitudeilla mitattuna järistyksen suuruus on 1 – 10.
- Magnitudiasteikot ovat logaritmisia.
  - ⇒ Magnitudin kasvaessa yhdellä on maan liike kymmenkertainen ja vapautuva energiamäärä kasvaa yli 30-kertaiseksi.
- Magnitudiarvo mitataan seismografisilla laitteilla (objektiivinen).

## Intensiteetti

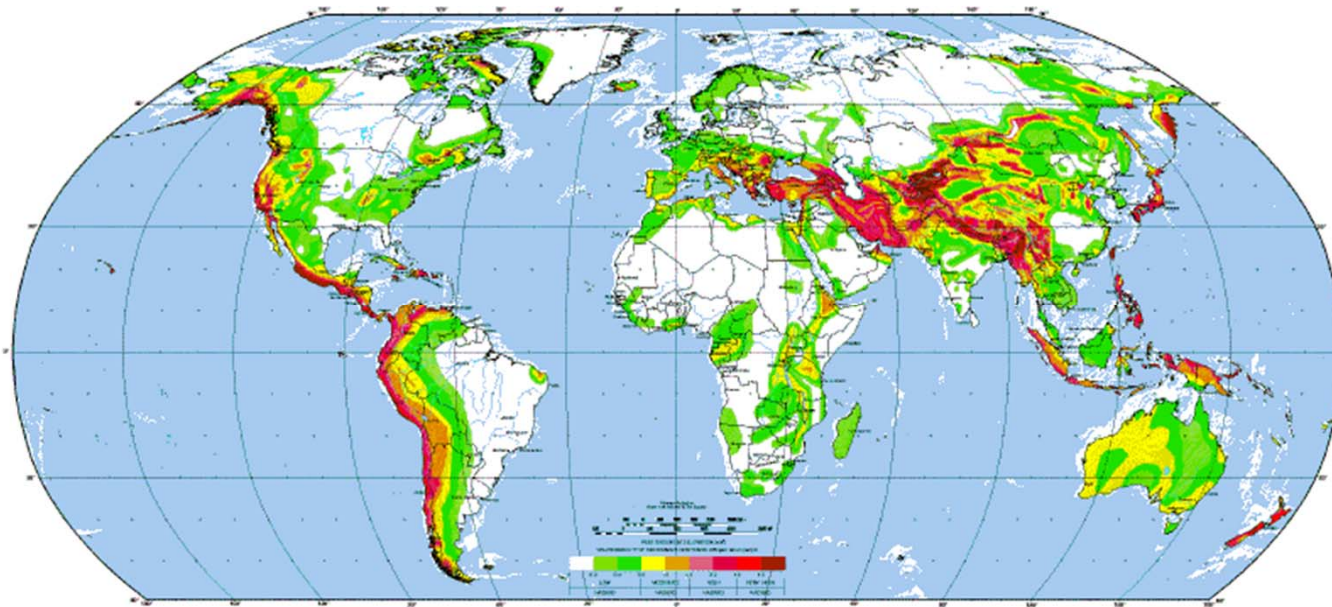
- Intensiteetti kuvaa maanjäristyksen vaikutusten (tuhojen) voimakkuutta tietyssä paikassa.
- Perustuu ihmisten tekemiin havaintoihin (subjektiivinen).
- Etäisyys maanjäristyskohdasta tarkkailupisteeseen ja maaperä vaikuttavat vaikuttaa intensiteettiin.
- Asteikoita on käytössä useita erilaisia.

## Kallioperän maksimi vaakakiihtyvyys

- Rakennesuunnittelun kannalta tärkein maanjäristyksen suuruutta kuvaava parametri on kallioperän kiihtyvyys ( $m/s^2$ ).
- Maanjäristyksessä maaperän kiihtyvyys on erilainen eri suuntiin.



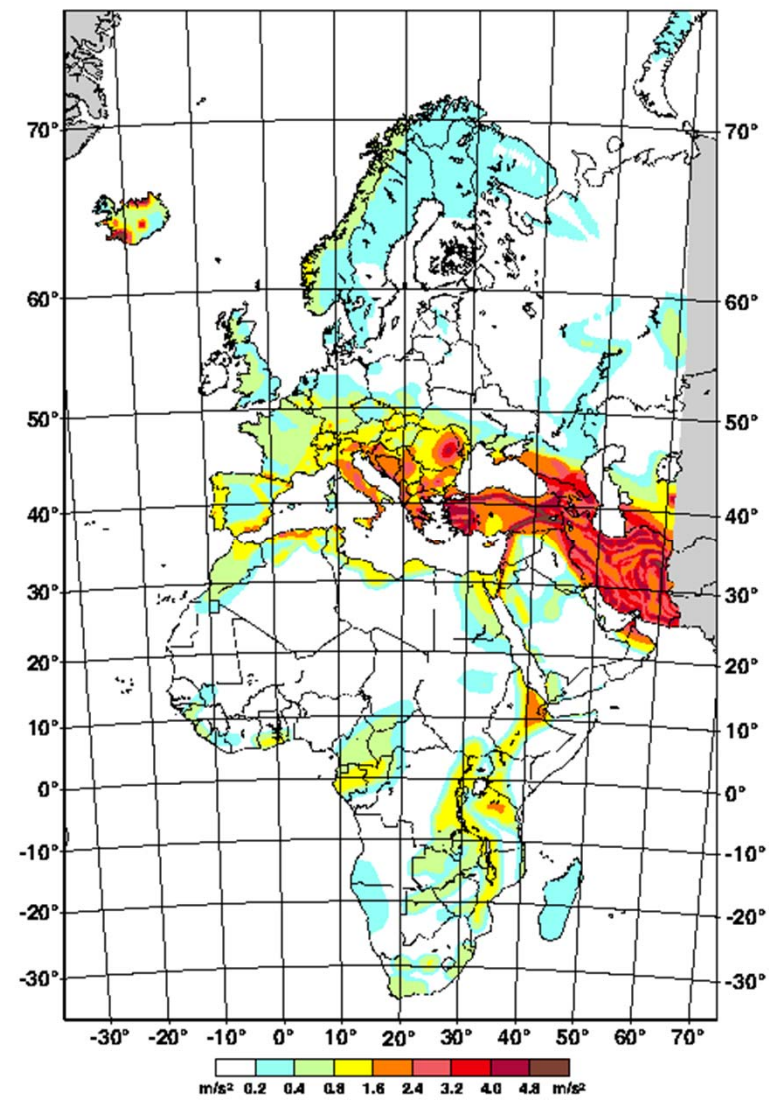
- Rakennusten kannalta vaakasuunta on merkittävämpi kuin pystysuunta.
- Etäisyys maanjäristyskeskuksesta, järistyksen magnitudi, syvyys ja kesto sekä maanperän laatu vaikuttavat maan kiihtyvyyteen.
- Maanjäristysmitoituksessa käytetään vaakasuuntaisen kiihtyvyyden maksimiarvoa *peak ground acceleration*, PGA.
- PGA-arvoja maailmanlaajuisesti <http://www.seismo.ethz.ch/static/GSHAP/>





- PGA-arvoja Euroopassa,  
Afrikassa ja Lähi-Idässä.

<http://www.seismo.ethz.ch/static/GSHAP/>



---

# Seismisten kuormien suuruus ja kiihtyvyysspektri

## Seismisten kuormien suuruus

- Maanjäristyskuormat riippuvat:
  - Rakennuspaikan seismisestä aktiivisuudesta.
  - Maaperän laadusta.
  - Rakennuksen tärkeydestä.
  - Massa- ja jäykkyysominaisuuksista.

## Rakennuspaikan seisminen aktiivisuus

- Rakennuspaikan seismisestä aktiivisuudesta kertoo PGA-arvo.
- PGA-arvo nähdään kunkin maan viranomaisten julkaisemista kartoista.
- Arvot vastaavat tiettyä todennäköisyyttä valitulla toistumisajalla.
- Yleensä käytetään 10 % todennäköisyyttä 50 vuoden aikana.
  - ➡ Annettu kiihtyvyys toteutuu keskimäärin ~475 vuoden välein.

---

- Maksimivaakakiihtyvyyden perusteella voidaan jaotella alueet seismisen aktiivisuuden perusteella.

- $a_g \leq 0,08g$   $\Leftrightarrow$  alhainen seismisyys
- $0,08g < a_g \leq 0,24g$   $\Leftrightarrow$  kohtuullinen seismisyys
- $a_g > 0,24g$   $\Leftrightarrow$  korkea seismisyys

- Jos  $a_g > 0,08g$  tulee huomioida kaikki eurokoodi 8:n määräykset.

## Maaperän laatu

- Maaperän laatu vaikuttaa merkittävästi maanjäristyskuormien suuruuteen.
- Pehmeät maakerrokset kallion päällä ovat tavallisesti epäedullisia, koska ne resonoivat maanjäristyksen taajuusalueella.
- Kallio on paras maaperä (A), koska resonanssia ei synny.

### Eurokoodissa maaperäluokittelu:

Maaperätyyppi	Laatu
A	Rock or other rock-like geological formation, including at most 5 m of weaker material at the surface.
B	Deposits of very dense sand, gravel, or very stiff clay, at least several tens of metres in thickness, characterised by a gradual increase of mechanical properties with depth.
C	Deep deposits of dense or medium-dense sand, gravel or stiff clay with thickness from several tens to many hundreds of metres.
D	Deposits of loose-to-medium cohesionless soil (with or without some soft cohesive layers), or of predominantly soft-to-firm cohesive soil.
E	A soil profile consisting of a surface alluvium layer with $v_s$ values of type C or D and thickness varying between about 5 m and 20 m, underlain by stiffer material with $v_s > 800$ m/s.
S <sub>1</sub>	Deposits consisting, or containing a layer at least 10 m thick, of soft clays/silts with a high plasticity index (PI > 40) and high water content
S <sub>2</sub>	Deposits of liquefiable soils, of sensitive clays, or any other soil profile not included in types A – E or S <sub>1</sub>

## Rakennuksen tärkeys

- Rakennuksen käyttötarkoitus ja vaurion aiheuttamat välilliset riskit (esim. ydinvoimalaitos tai kemiantehdas) vaikuttavat maanjäristyskuormiin.
- Eurokoodissa kategoriat I - IV.

Tärkeysluokka	Rakennus
I	Buildings of minor importance for public safety, e.g. agricultural buildings, etc.
II	Ordinary buildings, not belonging in the other categories.
III	Buildings whose seismic resistance is of importance in view of the consequences associated with a collapse, e.g. schools, assembly halls, cultural institutions etc.
IV	Buildings whose integrity during earthquakes is of vital importance for civil protection, e.g. hospitals, fire stations, power plants, etc.

$$\gamma_I = 0,8$$

$$\gamma_I = 1,0$$

$$\gamma_I = 1,2$$

$$\gamma_I = 1,4$$



kerroin PGA-arvolle

- Rakennuksen tärkeyden määrittelyssä saatetaan tarvita loppuasiakkaan apua.

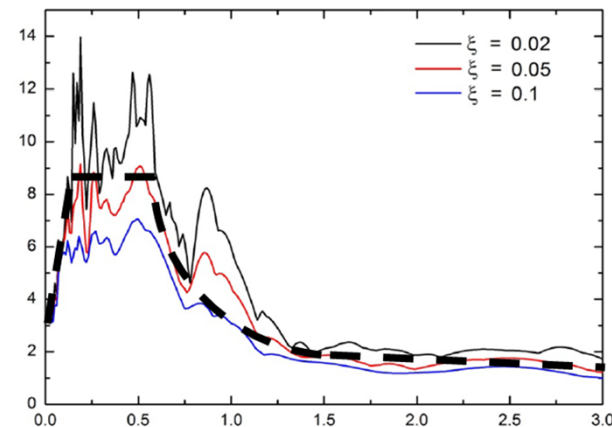
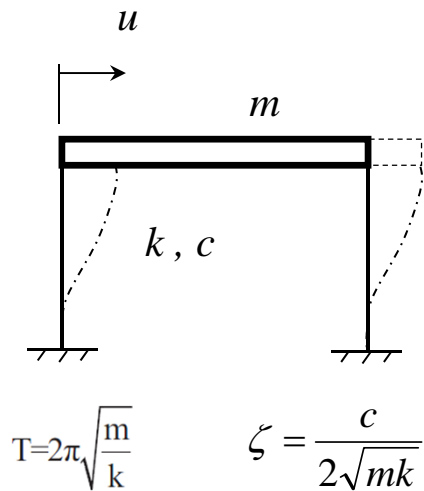
---

## Massa- ja jäykkyysominaisuudet

- Maanjäristyskuormat johtuvat rakenteen kiihtyvästä liikkeestä (hitausvoimia).
- Rakenteen ja sen kannatteleminen kuormien (hyötykuorma, lumi) massa vaikuttaa maanjäristyskuormien suuruuteen.
- Hyötykuormaa ja lunta ei tarvitse ottaa täytenä, vaan laskelmissa voidaan käyttää todennäköisiä arvoja (seisminen massa).
- Hitausvoimat vaikuttavat siellä, missä seisminen massakin sijaitsee.
- Rakenteen värähtelyominaisuudet riippuvat massan lisäksi myös jäykkyydestä.

## Kiihtyvyysspektri

- Maanjäristysmitoituksen perustana on *kiihtyvyysspektri*.
- Spektri esittää yhden vapausasteen värähtelijän vasteen (kiihtyvyys, nopeus, siirtymä) maksimiarvon ominaisvärähdysajan funktiona tietylle herätteelle.

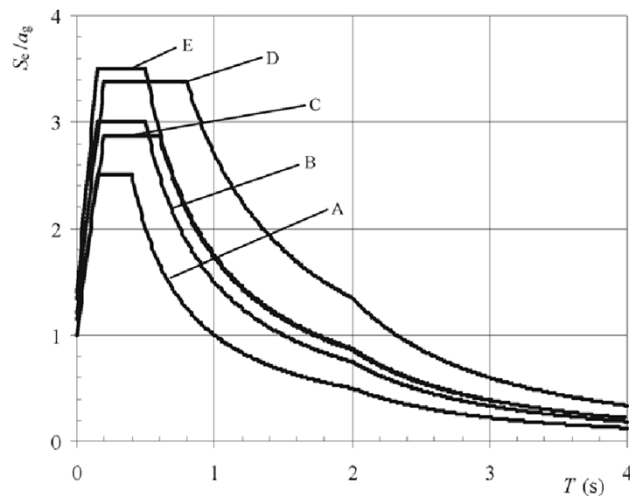


- Kiihtyvyyss-, nopeus- ja siirtymäspektri ovat kytköksissä toisiinsa.

$$S_V = \frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot S_D \quad S_A = \left(\frac{2 \cdot \pi}{T}\right)^2 \cdot S_D$$

- Maanjäristysuunnittelussa käytetään normin määräämää idealisoitua kiihtyvyysspektriä.

### Eurokoodi 8: Elastic (horizontal) response spectrum



$$0 \leq T \leq T_B : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left[ 1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2,5 - 1) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \left[ \frac{T_C}{T} \right]$$

$$T_D \leq T \leq 4s : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \left[ \frac{T_C T_D}{T^2} \right]$$

- $a_g$  on maaperän PGA-arvo (normista)
- $\eta$  huomioi vaimennuksen
- $S$ ,  $T_B$ ,  $T_C$  ja  $T_D$  riippuvat maaperästä

Ground type	$S$	$T_B$ (s)	$T_C$ (s)	$T_D$ (s)
A	1,0	0,15	0,4	2,0
B	1,2	0,15	0,5	2,0
C	1,15	0,20	0,6	2,0
D	1,35	0,20	0,8	2,0
E	1,4	0,15	0,5	2,0



- Huomioimalla käytetyt rakenneratkaisut saadaan suunnitteluspektri.

$$0 \leq T \leq T_B : S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \left[ \frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \cdot \left( \frac{2,5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q}$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_d(T) \begin{cases} = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \left[ \frac{T_C}{T} \right] \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases}$$

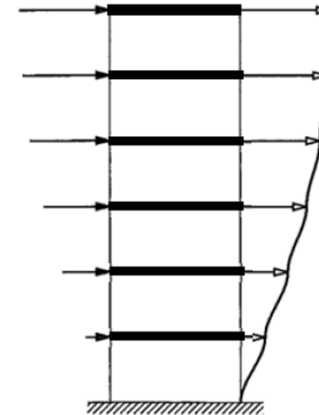
$$T_D \leq T : S_d(T) \begin{cases} = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \left[ \frac{T_C T_D}{T^2} \right] \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases}$$

- Käyttäytymiskerroin  $q$  on tyypillisesti teräsrungoilla luokkaa 2 - 4.
- Käyttäytymiskerroin huomioi rakenteen kyvyn plastisoitua maanjäristyksessä sortumatta.

# Seismiset analyysimenetelmät

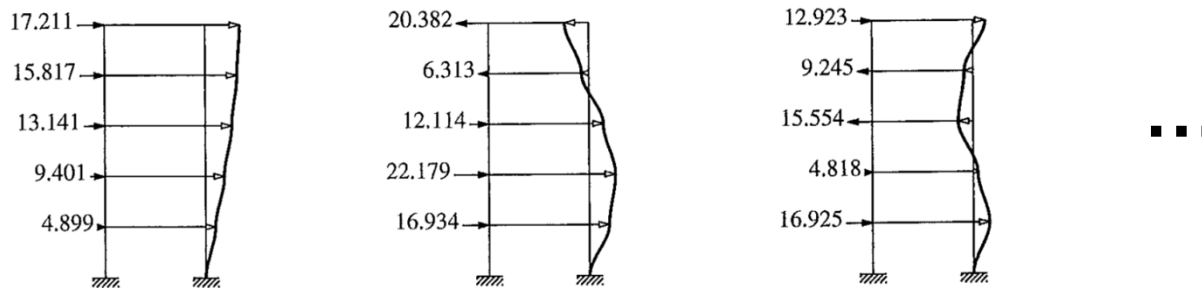
## Korvausvoimamenetelmä

- *Korvausvoimamenetelmä (lateral force method)* on yksikertaisin seisminen analyysimenetelmä.
- Ideana on korvata dynamiikan tehtävä sellaisella staattisella kuormitusjakaumalla, joka antaa saman siirtymämuodon kuin mitä alkuperäisessä dynamiikan tehtävässä maksimissaan olisi saatu.
- Oletuksena on, että rakenteen alin ominaismuoto dominoi.
- Alimman ominaisvärähdysajan  $T$  tai sen approksimaation perusteella saadaan suunnitteluspektristä kiihtyvyys ja sen avulla voidaan edelleen määrittää korvausvoimat.
- Normit rajoittavat korvausvoimamenetelmän käytön yksinkertaisiin tapauksiin (matalat ja symmetriset rakennukset).



## Vastespektrimenetelmä

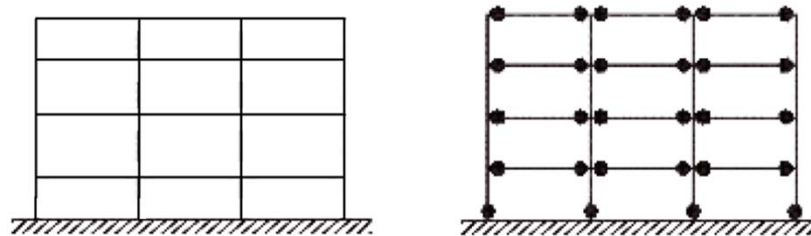
- Vastespektrimenetelmä (*response spectrum method*) on muodostunut nykyään eniten käytetyksi seismiseksi analyysimenetelmäksi.
- Aluksi ratkaistaan rakenteen ominaismuotoja, vastaavia värähdysaikoja sekä kuhunkin muotoon liittyviä osallistumiskertoimia tarvittava määrä.
- Kutakin ominaismuotoa vastaa oma voimajakaumansa.



- Lopullinen rakenteen vaste yhdistellään voimajakaumista.
- Yhdistelymenetelmiä on useita erilaisia, mutta käytetyin on CQC (complete quadratic combination).
- Vastespektrimenetelmä löytyy käytännössä kaikista FEM-ohjelmista.

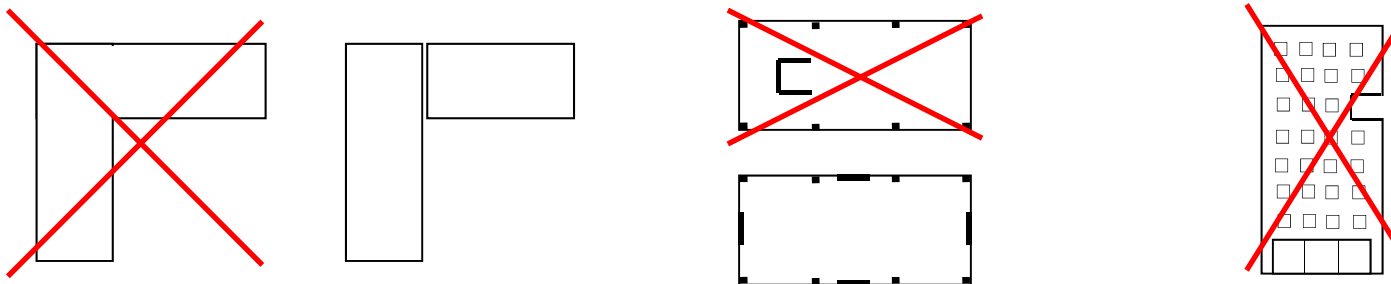
# Teräsrakenteiden maanjäristysmitoitus

- Teräsrakenteet selviävät yleensä maanjäristyksistä kohtuullisen hyvin.
- Teräs on
  - sitkeää
  - pystyy mukautumaan toistuviin plastisiin muodonmuutoksiin
  - kevyttä lujuteensa nähden
- Suunnitteluvaiheessa teräksen sitkeyttä voidaan käyttää hyväksi ja pienentää sen perusteella maanjäristyskuormia (iso käyttäytymiskerroin  $q$ ).
- Teräsrakenteisiin muodostuu maanjäristyksessä paljon plastisia niveliä ja muita pysyviä muodonmuutoksia, jotka syövät järityksen energiaa.



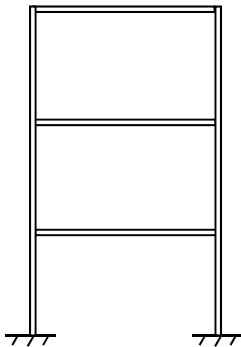
- Rakenteiden maanjäristysmitoituksessa on kolme eri vaihetta:
  - 1) Konseptisuunnittelu
  - 2) Maanjäristyskuormien laskenta
  - 3) Detaljit} = maanjäristyssuunnittelu

- Konseptisuunnittelu tarkoittaa rakennuksen sijoittelua ja muotoilua sekä rakennejärjestelmän valintaa niin, että se on maanjäristyksen kannalta edullinen.
- Konseptivaiheen ohjeet ovat idealtaan yksinkertaisia periaatteita, jotka kuitenkin vähentävät maanjäristyksen aiheuttamia rasituksia merkittävästi.
- Symmetrisyys (massa & jäykkyys) on ehdottomasti tärkein periaate.

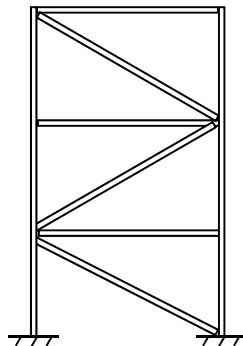


- Maanjäristysnormit antavat materiaali- ja sovelluskohtaisia erityismääräyksiä suunnitteluun.
- Ensisijaisena tarkoituksena varmistua rakenteen sitkeydestä.
- Huonosti toimivat liitokset ja muut yksityiskohdat voivat pilata rakenteen toiminnan maanjäristyksessä.
- Tyypillisiä teräsrakenteiden jäykistysjärjestelmiä:

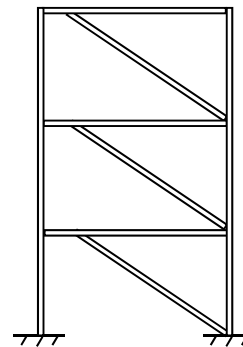
jäykkänurkkainen  
kehä,  $q = 1,5 - 6,5$ .



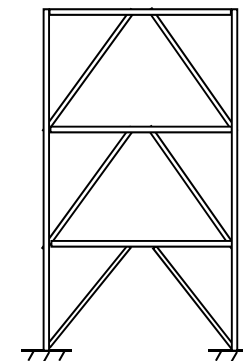
keskeiset vinositeet,  
 $q = 1,5 - 4$ .



epäkeskeiset  
vinositeet,  $q = 1,5 - 6$ .



V-siteet,  $q = 1,5 - 2,5$ .



---

# Maajäritysmitytuksen kompastuskiviä

- Insinööritomistossa suunnittelutyössä vastaan tulleita ongelmia:
  - Epäselvyydet seismisyyden tasosta kohdemaassa.
  - Maaperätiedot puuttuvat ja rakennuksen tärkeyttä ei ole mietitty.
  - Pelkkä maanjärityskuormien laskenta ei riitä, vaan konseptisuunnittelu ja detaljit ovat myös tärkeitä.
  - Maanjärityksen aiheuttamia lisäkustannuksia verrattuna tavalliseen tapaukseen nähden ei voi sanoa tarkasti asiakkaalle, koska seismisyyden tason lisäksi moni muukin asia vaikuttaa kokonaisuuteen.
  - Maanjäritysmitytusta ei voi tehdä paloittain rakennukselle.
  - Normien yhdistely eli normisurffaus. Maanjärityskuormat otetaan kohdemaan normista ja muuten suunnittelu haluttaisiin tehdä jollakin muulla normilla.

- 
- Teräsrakenteiden toimitusraja menee tyypillisesti pohjalevyn alapinnassa ja paikallinen toimija hoitaa betonirakenteiden suunnittelun. Miten varmistutaan kokonaisuuden toimivuudesta?
  - Erilaiset käytännöt maailmalla. Joissakin maissa maanjäristyksiin suhtaudutaan hyvin vakavasti ja toisaalla ne eivät juuri kiinnosta, vaikka seismisyyden taso olisi korkea.
  - Maanjäristysnormit kehittyvät jatkuvasti (eurokoodit ENV vs. EN ja AISC-05 vs. -10) ja niissä on selviä eroja eri maiden välillä.
  - Onko spektrin arvot annettua suoraan muodossa  $m/s^2$  vai suhteessa putoamiskiihtyvyyteen  $g$ ?