



Ajankohtaista rakenteiden mekaniikasta

Uusia muotoja virtuaaliseen työntekoon
Antti H. Niemi, RIL lounastilaisuus, 14.3.2018



Esityksen sisältö

1. **Kantavien rakenteiden suunnittelua koskevia määräyksiä**
2. **Case: Haukilahden vesitorni, Espoo**
3. **Simulaatioiden hallinnasta**
4. **Tutkimusteemojen esittely**
5. **Yhteenveto**



Kantavien rakenteiden suunnittelua koskevia määräyksiä



Hammurabin laki, Babylonia, n. 1760 eaa



Jos rakennusmestari on rakentanut jollekulle talon eikä ole tehnyt työtään vankaksi ja talo, jonka hän on rakentanut, sortuu ja aiheuttaa talon omistajan kuoleman, niin kyseessä oleva rakennusmestari surmattakoon.



Maankäyttö- ja rakennuslaki (958/2012, 117 a §), Suomi, 2018



Rakennushankkeeseen ryhtyvän on huolehdittava, että rakennus suunnitellaan ja rakennetaan siten, että sen rakenteet ovat lujia ja vakaita, soveltuvat rakennuspaikan olosuhteisiin ja kestävät rakennuksen suunnitellun käyttöiän.

*Kantavien rakenteiden suunnittelun ja mitoituksen on perustuttava **rakenteiden mekaniikan** sääntöihin ja yleisesti hyväksytyihin suunnitteluperusteisiin taikka luotettavaan koetuloksiin tai muihin käytettävissä oleviin tietoihin.*

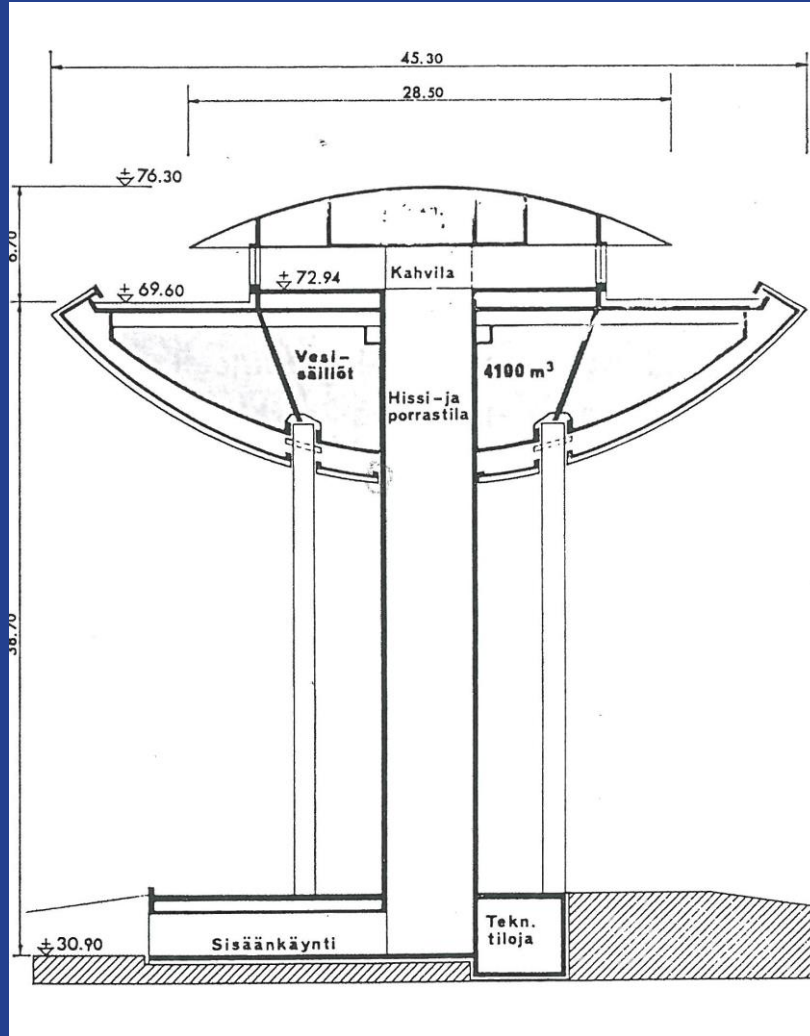
Rakennuksen rakentamisessa on käytettävä rakenteiden lujuuden ja vakauden kannalta soveltuvia rakennustuotteita.



Case: Haukilahden vesitorni



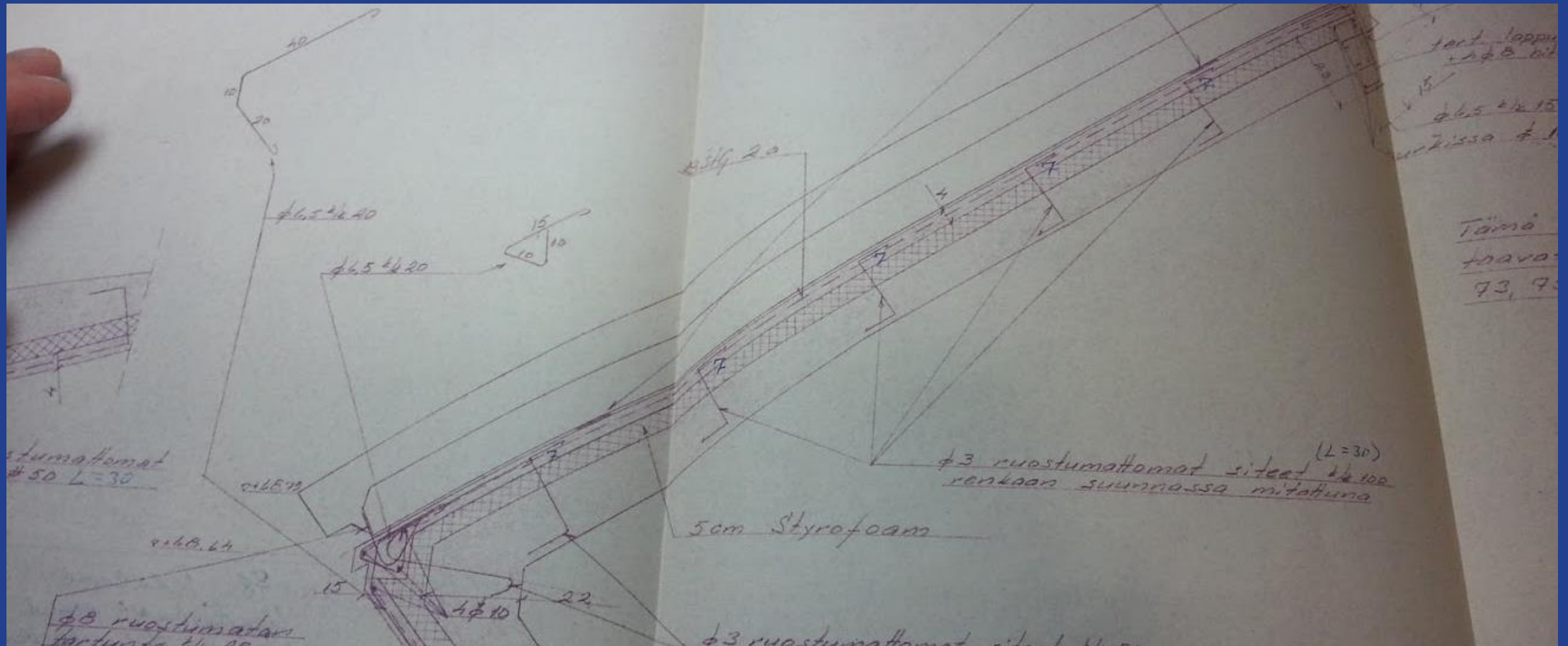
- **Rakennettu 1968 (3 000 000 FIM)**
- **Peruskorjattu 2011-2012 (4 600 000 EUR)**
- **Omistaja: HSY (Kuntayhtymä)**
- **Vesitilavuus: 4100 m³**
- **Korkeus: 46 m**
- **Pallokalottien läpimitta: 40-45 m**



- **Pääsuunnittelijat: arkkitehti Erkko Virkkunen ja diplomi-insinööri Ilmari Hyppänen**
- **Rakennelaskelmat edellyttivät melko vaativaa levy-, laatta- ja kuoriteorian soveltamista**
- **Suomen ensimmäistä ELLIOTT 803-supertietokonetta tarvittiin lineaaristen yhtälöryhmien ratkaisemisessa (yli kymmenen tuntematonta voimasuuretta)**



Esimerkki rakennekuvista





Esimerkki rakennelaskelmista (K. Girkmann: Flächentragwerke, 3rd Edition, Springer, 1954)

Kartio kuori

$$\omega = \frac{s}{a} = \frac{x \cdot \sin \alpha}{\sin \alpha \cdot z \cdot \cos \alpha} = \frac{x}{z} \tan \alpha = \frac{x}{a}$$

$\cot \varphi = -0,375$; $\sin \alpha = 0,930$
juuressa $z = 19$; $x = 0$

| x | z | ω | $r_2 = a$ | h | H ω | $e^{-H\omega}$ | $\sin H\omega$ | $\cos H\omega$ | $-\sin H\omega$ $+\cos H\omega$ | $\cos H\omega$ $-\sin H\omega$ | $H\omega + \frac{z}{H}$ | $\cot(\frac{H\omega}{2} + \frac{z}{4H})$ | $\sin(\frac{H\omega}{2} + \frac{z}{4H})$ |
|-----|------|----------|-----------|------|------------|----------------|----------------|----------------|------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|--|--|
| 0 | 19,0 | 0 | 8,06 | 6,82 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0,785 | 0,707 | 0,707 |
| 0,5 | 19,5 | 0,065 | 8,28 | 6,92 | 0,45 | 0,638 | 0,435 | 0,940 | 1,335 | 0,415 | 1,235 | 0,129 | 0,943 |
| 1,0 | 20,0 | 0,127 | 8,50 | 7,00 | 0,89 | 0,411 | 0,777 | 0,629 | 1,406 | -0,148 | 1,675 | -0,106 | 0,994 |
| 1,5 | 20,5 | 0,185 | 8,70 | 7,10 | 1,31 | 0,270 | 0,926 | 0,258 | 1,224 | -0,788 | 2,095 | -0,502 | 0,865 |
| 2,0 | 21,0 | 0,241 | 8,92 | 7,19 | 1,73 | 0,177 | 0,987 | -0,160 | 0,827 | -1,147 | 2,515 | -0,810 | 0,585 |
| 3,0 | 22,0 | 0,346 | 9,35 | 7,35 | 2,54 | 0,079 | 0,565 | -0,825 | -0,260 | -1,390 | 3,325 | -0,982 | -0,183 |
| 4,0 | 23,0 | 0,440 | 9,78 | 7,52 | 3,31 | 0,036 | -0,169 | -0,986 | -1,155 | -0,817 | 4,095 | -0,577 | -0,816 |
| 5,0 | 24,0 | 0,527 | 10,20 | 7,68 | 4,05 | 0,017 | -0,790 | -0,614 | -1,404 | +0,176 | 4,835 | +0,125 | -0,991 |



Simulaatioiden hallinnasta



Simulaatioiden hallinta

(Simulation governance)

- Tieteelliseen ja teknilliseen laskentaan sisältyy odotus tulosten luotettavuudesta
- Esimerkiksi seuraaviin kysymyksiin on vastattava:

1. Kuinka hyvin valittu matemaattinen malli kuvaa todellisuutta? (Validointi)

2. Onko laskelmien numeerinen tarkkuus riittävä päätöksenteon kannalta? (Verifiointi)

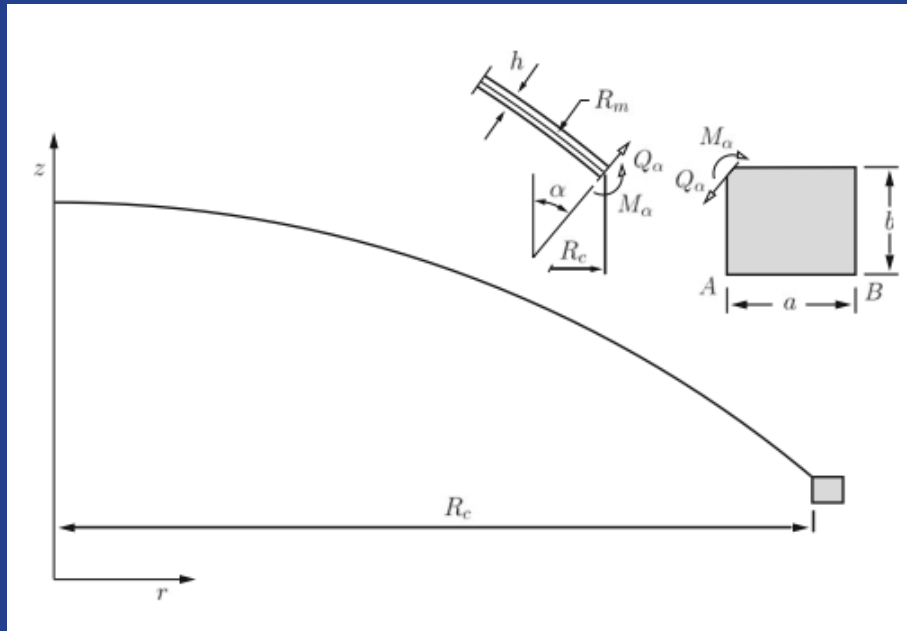
3. Miten huomioidaan mallin parametrien epävarmuus? (Epävarmuuden kvantifiointi)



Ote teoksesta RIL 229-1-2013

Rakennelaskelmien tarkistus on aina suoritettava vähintään likimääräisillä menetelmillä ja/tai vertaamalla muihin vastaaviin rakennuksiin. Tarkistusten määrä on suhteutettava kohteen vaatimustasoon. Toisen suunnittelijan tekemä tarkistus voi olla tarpeen. Tarvittaessa voidaan laskelmille tehdä ulkopuolinen tarkistus (erityismenettely).

Kohteissa on tehtävä rakennemallin tarkkuuden arviointi ja mallin herkkyyys erilaisille virheille on selvitettävä. Mikäli käytetään tavallisesta poikkeavia rakennejärjestelmiä, kasvaa tarkistusten merkitys entisestään.

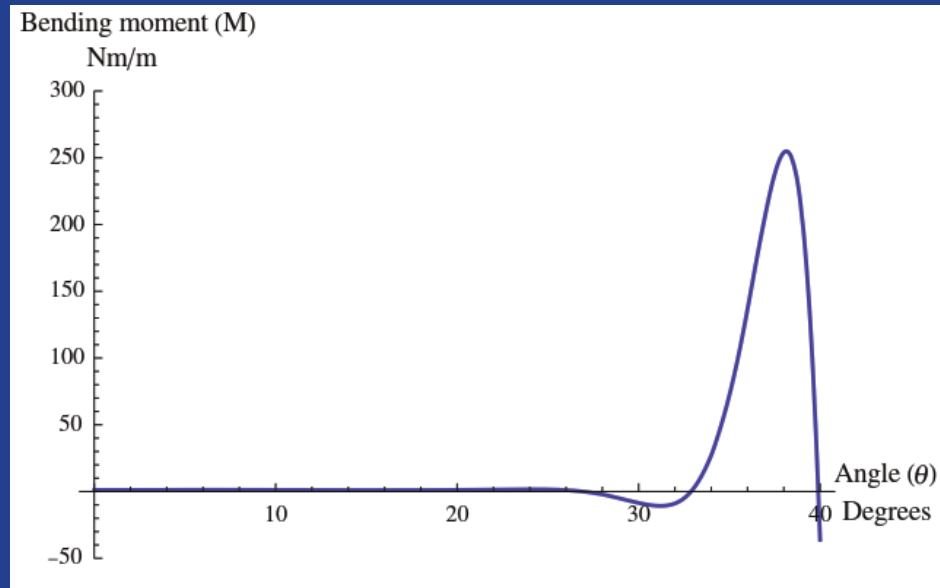


- Girkmannin ongelma on laskennallisen mekaniikan yhteisölle taannoin asetettu verifiointi-haaste (IACM Expressions 2010)
- Määritettävä betonisen pallokuoren omasta painosta aiheutuvat voimasuureet
- Matemaattinen malli: lineaarinen kimmoteoria
- Oppikirjaesimerkki em. Girkmannin teoksesta.



Yhteenvedo annetuista vastauksista

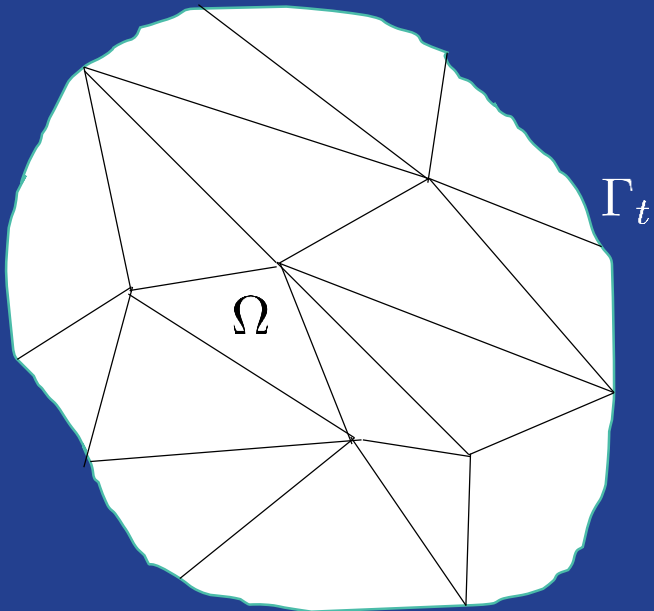
| Method | Q_α (N/m) | M_α (Nm/m) |
|--|------------------|-------------------|
| h-Version axisymmetric solid—4 node elements | 953.7 | -10.57 |
| h-Version axisymmetric solid—8 node elements | 953.7 | -19.67 |
| h-Version axisymmetric shell—solid | 593.8 | -140.12 |
| h-Version axisymmetric shell—solid | - | -78.63 |
| h-Version 3D shell—solid | 1,140.0 | -205.00 |
| h-Version 3D shell—solid | 16,660.0 | 17,976.6 |
| h-Version axisymmetric solid | 963.2 | -33.73 |
| h-Version 3D shell—solid | 1,015.7 | 86.30 |
| h-Version axisymmetric shell—solid | 949.2 | -36.62 |
| h-Version 3D shell—solid | 951.3 | -38.35 |
| h-Version axisymmetric shell—solid | 989.1 | -89.11 |



- Tulokset poikkeavat alle 5% referenssiarvoista vain kahdella vastaajalla yhdestätoista siitä huolimatta että vapausasteita oli käytössä jopa 120 miljoonaa.
- Taivutusmomentin lasketut arvot liitoskohdassa vaihtelivat välillä -205 Nm/m ja 17 977 Nm/m
- Girkmannin ongelman “vaatimustaso” on lähes olematon nykyaikaisen rakenneanalyysin näkökulmasta.



Virtuaalisen työn periaate



- Elementtimenetelmä (FEM) perustuu virtuaalisen työn periaatteeseen

$$\int_{\Omega} \sigma(\mathbf{u}) : \varepsilon(\delta \mathbf{u}) \, dx = \int_{\Omega} \mathbf{f} \cdot \delta \mathbf{u} \, dx + \int_{\Gamma_t} \mathbf{T} \cdot \delta \mathbf{u} \, dS$$

- Menetelmälle on kehitetty tarkat siirtymäkenttää koskevat virhearvot muotoa

$$\frac{|\mathbf{u} - \mathbf{u}_N|}{|\mathbf{u}|} \leq C \left(\frac{h}{L} \right)^p$$

- Voimasuureiden osalta siirtymämenetelmän tarkkuus voi kuitenkin vaihdella hyvinkin paljon ja jossakin tapauksessa vakio C voi olla hyvin iso



Jännitysresultanttien suora numeerinen integrointi (akateeminen *hp-FEM*)

A.H. Niemi et. al. Engineering with Computers (2012) 28:123-134

| DOF | Q (N/m) (shell) | Q (N/m) (ring) | M (Nm/m) (shell) | M (Nm/m) (ring) |
|--------|----------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|
| 338 | 1,014.0 | 746.2 | -32.10 | 15.55 |
| 822 | 1,535.0 | 905.7 | -49.19 | -12.75 |
| 2,170 | 1,281.3 | 981.1 | -45.11 | -36.37 |
| 4,506 | 949.2 | 942.1 | -34.59 | -35.56 |
| 6,884 | 940.6 | 954.1 | -35.61 | -36.67 |
| 12,386 | 938.7 | 943.7 | -36.57 | -36.75 |
| 27,908 | 943.5 | 943.8 | -36.81 | -36.79 |
| 40,558 | 944.2 | 943.6 | -36.80 | -36.79 |



Jännitysresultanttien laskenta virtuaalisen työn periaatteella (*akateeminen hp-FEM*)
A.H. Niemi et. al. Engineering with Computers (2012) 28:123-134

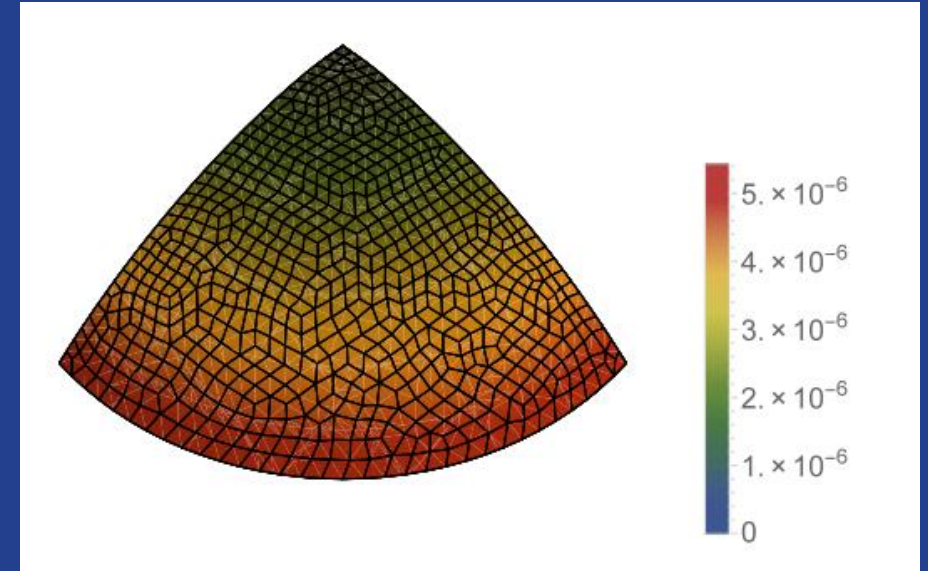
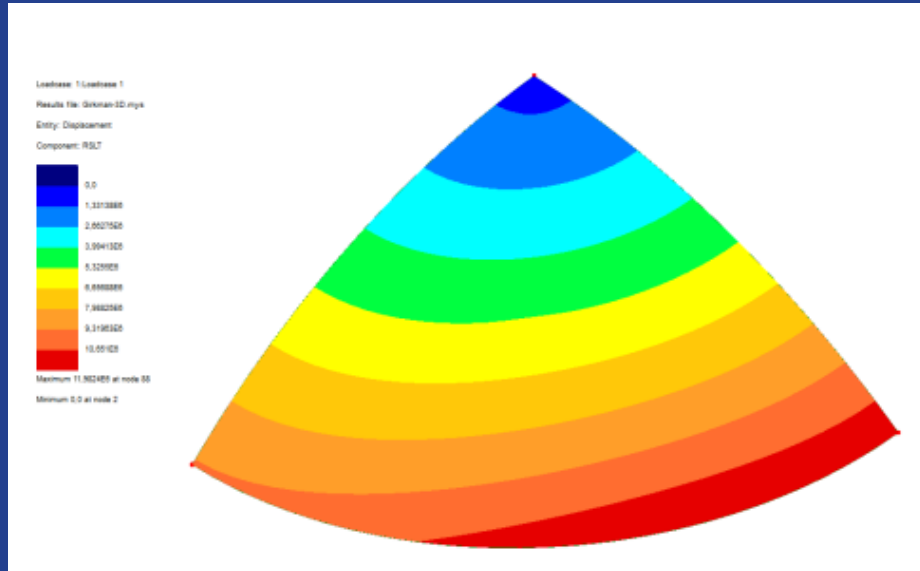
| DOF | Q (N/m) | \mathcal{E}_Q (N/m) | M (Nm/m) | \mathcal{E}_M (Nm/m) |
|--------|-----------|-----------------------|------------|------------------------|
| 338 | 943.91 | 2.03 | -37.421 | 0.714 |
| 822 | 943.73 | 1.26 | -37.097 | 0.444 |
| 2,170 | 943.67 | 0.88 | -36.849 | 0.308 |
| 4,506 | 943.66 | 0.64 | -36.818 | 0.226 |
| 6,884 | 943.65 | 0.45 | -36.795 | 0.159 |
| 12,386 | 943.65 | 0.20 | -36.790 | 0.070 |
| 27,908 | 943.65 | 0.07 | -36.790 | 0.026 |
| 40,558 | 943.65 | 0.04 | -36.790 | 0.014 |



Tutkimusteemojen esittely

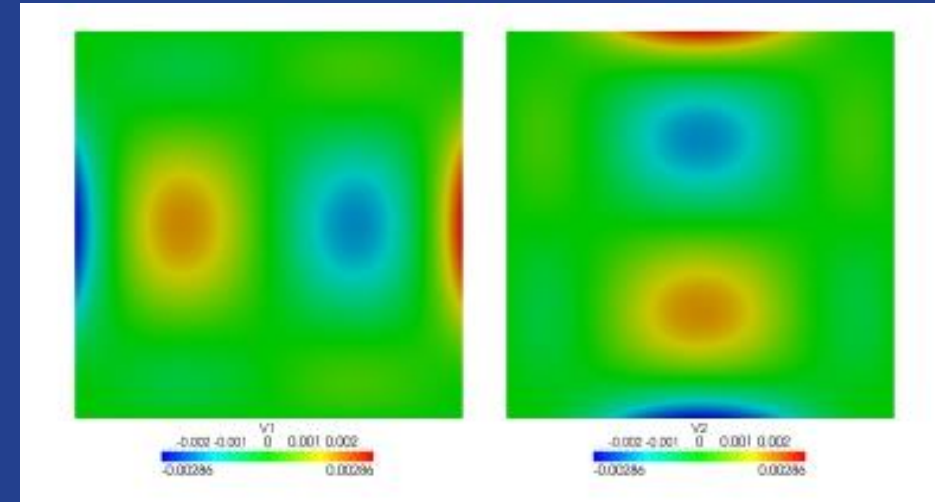
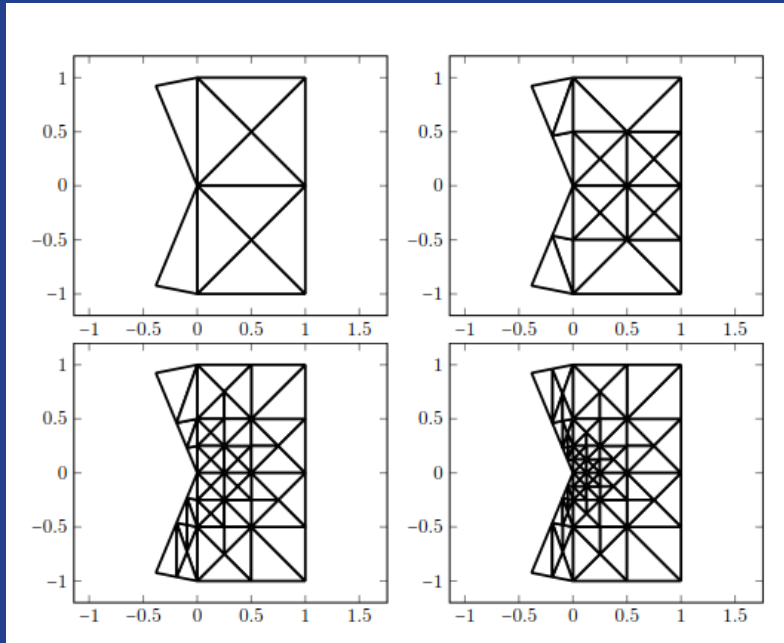


Kuorielementtien kehitys 2005-, Teknillinen korkeakoulu





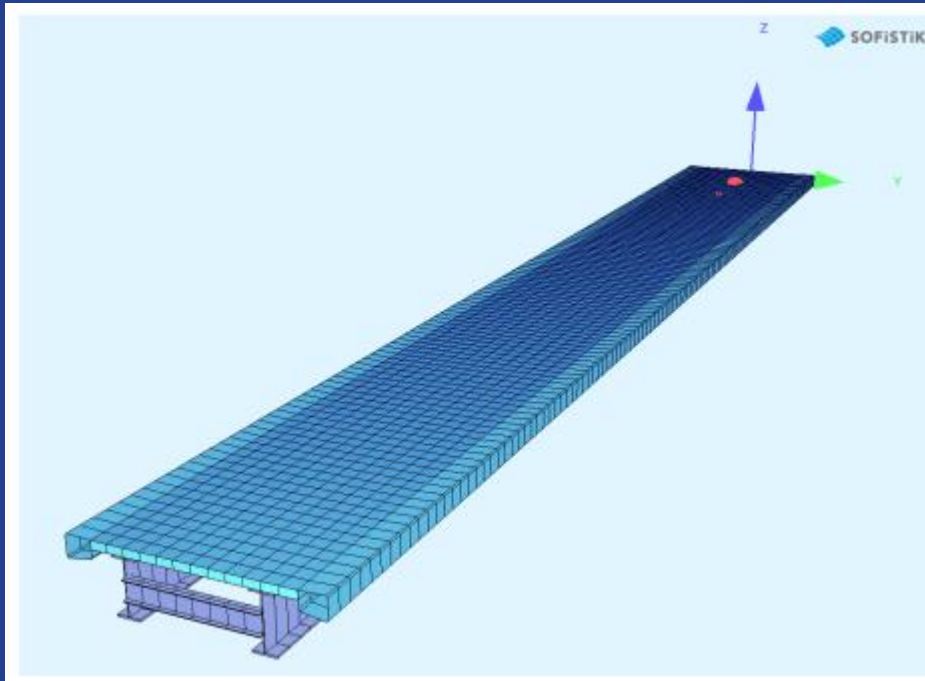
Yleistetyt elementtimenetelmät rakenteiden mekaniikassa 2009-, UT Austin & KAUST



$$\begin{aligned}\kappa^{-1}t^2(\mathbf{V}, \mathbf{q})_K + (w, \nabla \cdot \mathbf{q})_K - \langle w, \mathbf{q} \cdot \mathbf{n} \rangle_{\partial K} + (\psi, \mathbf{q})_K &= 0 \\ (\mathbf{C}^{-1}\mathbf{M}, \boldsymbol{\tau})_K + (\psi, \nabla \cdot \boldsymbol{\tau})_K - \langle \psi, \boldsymbol{\tau} \mathbf{n} \rangle_{\partial K} + (r\mathbf{J}, \boldsymbol{\tau})_K &= 0 \\ (\mathbf{V}, \nabla z)_K - \langle z, \mathbf{V} \cdot \mathbf{n} \rangle_{\partial K} &= (p, z)_K \\ (\mathbf{M}, \nabla \phi)_K - \langle \phi, \mathbf{M} \mathbf{n} \rangle_{\partial K} - (\mathbf{V}, \phi)_K &= 0 \\ (\mathbf{M}, s\mathbf{J})_K &= 0\end{aligned}$$

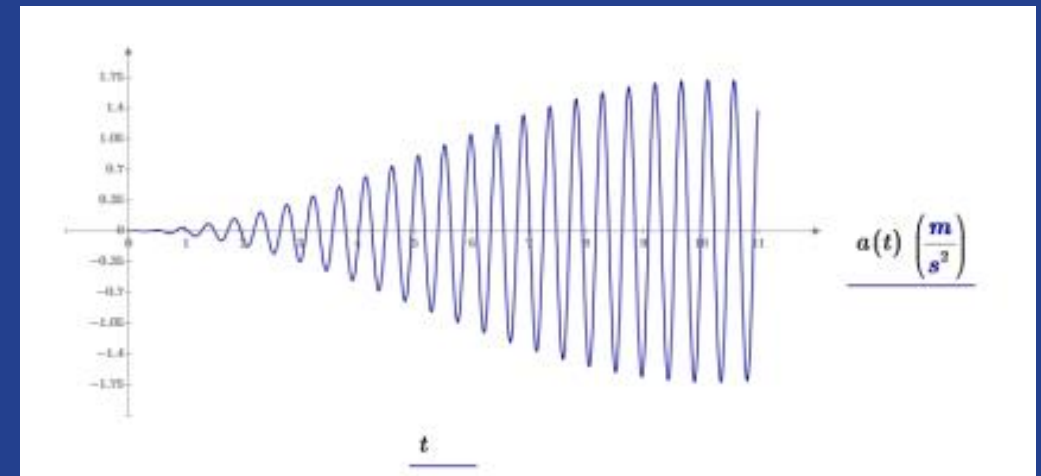


Siltojen analyysi ja rakenteellinen optimointi 2016-, Pontek Oy & Oulu



Kehittyneet rakennusmateriaalit mahdollistavat entistä kevyemmät ja taipuisammat sillat jolloin esim. värähtelyjen hallinta on tärkeää

$$\omega = \sqrt{\frac{\tilde{k}}{\tilde{m}}} = \pi^2 \sqrt{\frac{EI}{ML^3}}$$





Yhteenveto

- Rakenteiden mekaniikalla on oma roolinsa rakennusten turvallisuuden ja laadun varmistamisessa
- Virtuaalisen työn periaate ja sen yleistyksen ovat rakennesimulaatioiden ytimessä
- Kehitystarpeita on mm. voimasuureiden laskennassa ja materiaalimallinnuksessa
- Analyttisiä rakenteiden mekaniikan kaavoja tarvitaan rakenteiden suunnittelussa numeeristen menetelmien rinnalla ja tukena



Viitteitä

A.H. Niemi. Benchmark computations of stresses in a spherical dome with shell finite elements. *SIAM J. SCI. COMPUT.* (2016). 38:B440-B457

A.H. Niemi, J. Bramwell, L. Demkowicz. Discontinuous Petrov-Galerkin methods for thin-body problems in solid mechanics. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 200 (2011), pp. 1291-1300

Niemi, A., Koskela, J., & Fedorik, F. (2017). Evaluation of some harmonic load models for the vibration analysis of footbridges. *Rakenteiden Mekaniikka*, 50(3), 127-130.



Maisterihaku, Oulun yliopisto, Teknillinen tiedekunta

www.oulu.fi/raksa

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan
maisteriohjelma, diplomi-insinööri (2v)

- Opiskelupaikkoja: 25
- Hakuaika:
14.3.2018 klo 08:00 – 28.3.2018 klo 15:00
- Tarvittava pohjakoulutus:
 1. Alempi yliopistotutkinto (Kandidaatin tutkinto)
 2. Ammattikorkeakoulututkinto
 3. Soveltuva ulkomainen koulutus



**OULUN
YLIOPISTO**