

VIHREÄN  
SIIRTYMÄN  
TUOTEKEHITYS

# SIMULOINTI

Jyrki Kullaa



VIHREÄN  
SIIRTYMÄN  
TUOTEKEHITYS



# Sisällys

- Yleistä
- Elementtimenetelmä
- Yleisimmät elementtityypit
- Analyysityyppejä
- Esimerkki
- Yhteenvedo

# Miksi simuloidaan?

- Tehtävä on niin monimutkainen, että yksinkertaista analyyttistä ratkaisua ei löydy
- Numeerisen mallin avulla voidaan arvioida systeemin käyttäytymistä ennen tuotteen tai prototyypin valmistamista
- Mitoituksen perusta
- Säästetään useilta prototyyppikierröksiltä
- Säästetään aikaa, rahaa ja luontoa
- Voidaan tutkia vaihtoehtoisia konstruktioita
- Voidaan tutkia erilaisia skenaarioita
- Prototyypin rakentaminen ei aina ole mahdollista

# Mitä simuloidaan?

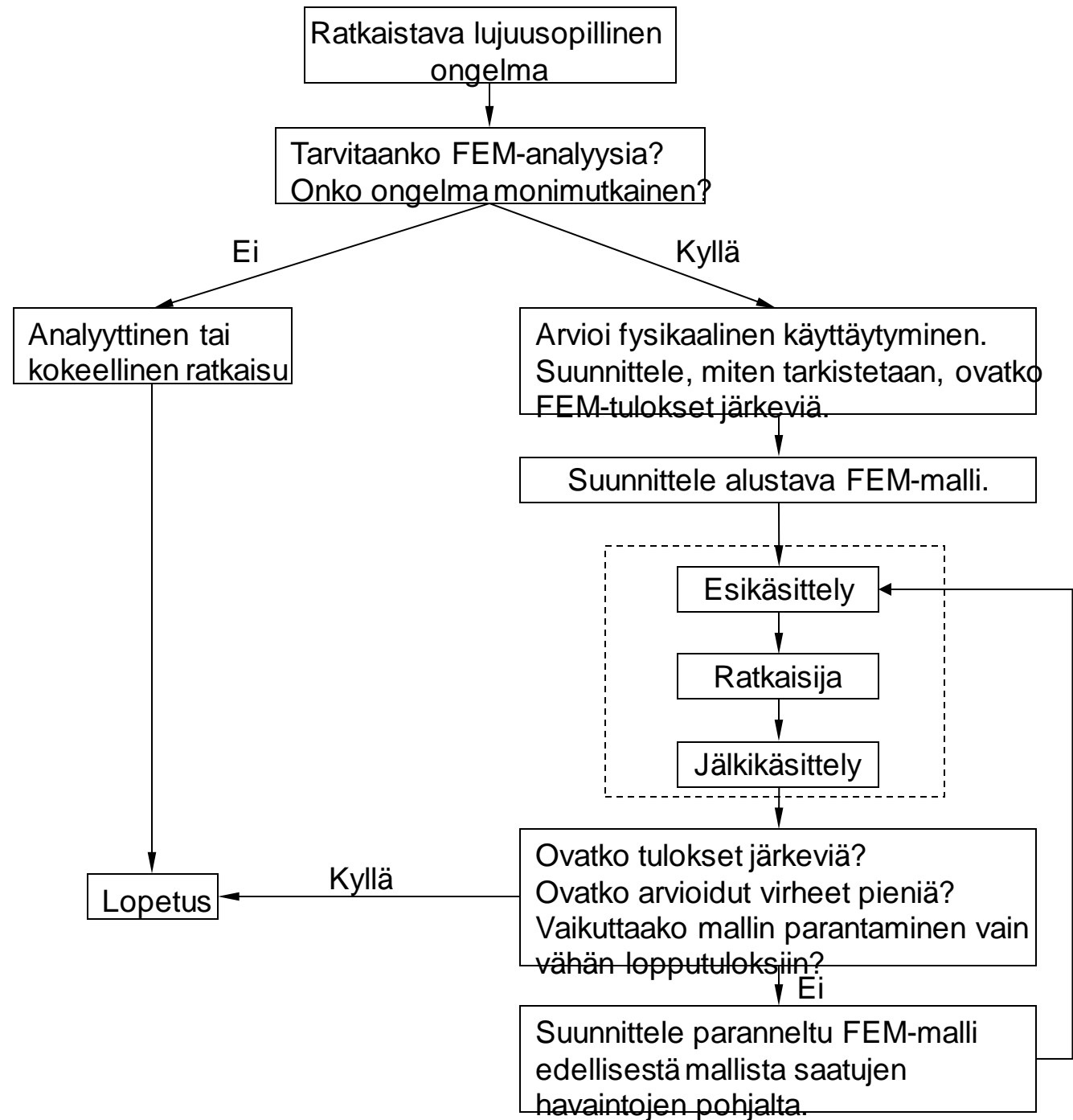
- Fysikaalisia ilmiöitä
  - lujuuslaskenta
  - värähtelyt
  - valmistusprosessit
  - Nesteen ja kaasun virtaus
  - sähkö- ja magneettikentät
  - lämmönsiirto
  - mekanismit
  - prosessit
  - ym.
- Muita, esim. tilastollisten suureiden otoksia

# Elementtimenetelmä (FEM)

- FEM = Finite Element Method
- Alkoi 1950-luvulla lentokoneteollisuudesta (lujuusanalyysi)
- Matemaattiset perusteet 1960-luvulla
- Tietokoneiden kehitys
- Rakenteiden analyysistä yleiseksi menetelmäksi osittaisdifferentiaaliyhtälöiden numeeriseksi ratkaisemiseksi (multiphysics)
- Käytetään edelleen rakenteiden analysoinnissa
- Useita ohjelmistoja saatavilla

# Miksi lujuusoppia pitää osata?

- FEM-ohjelmat ovat kalliita. Laskentaa tehdään edelleen käsin
- Tulosten tulkinta ja oikeellisuuden arviointi mahdollista
- Jos lähtötiedot ovat väärää, tulokset ovat väärää

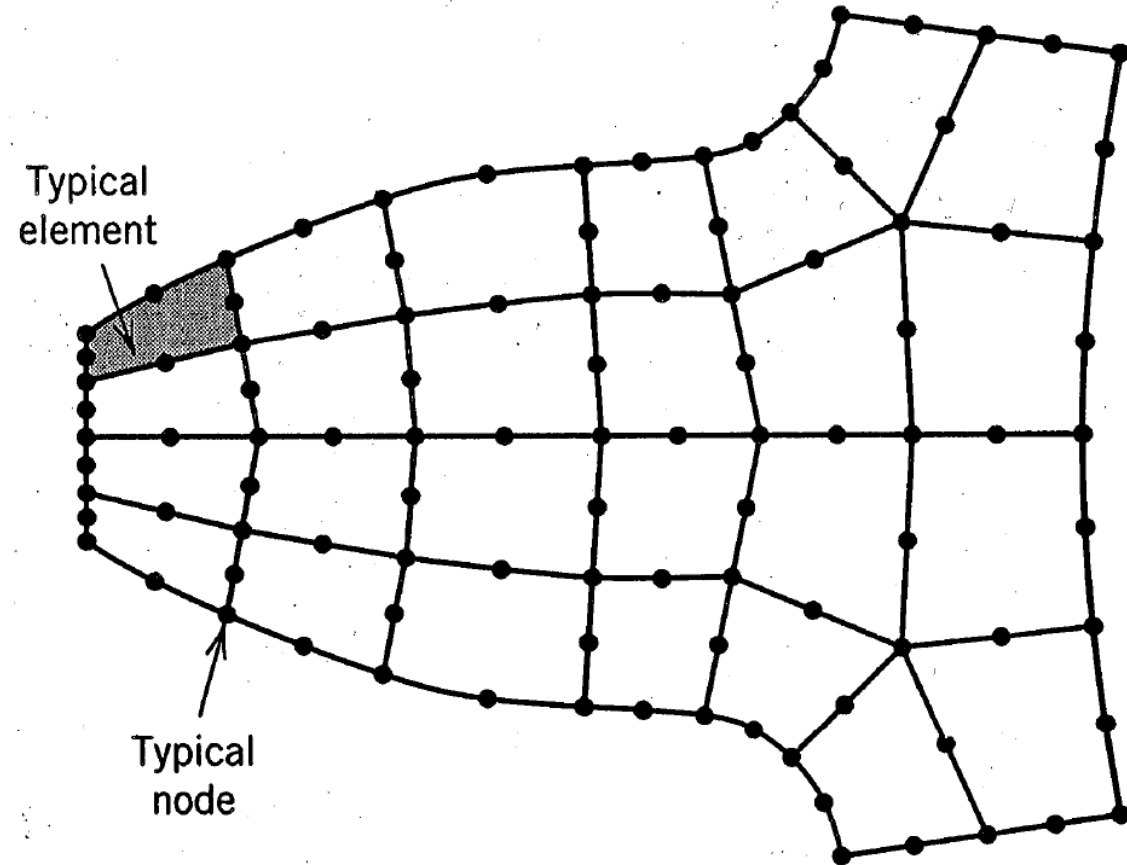


# FEM-analyysin vaiheet

- Esikäsittely (pre-processing)
- Ratkaisija (solver)
- Jälkikäsittely (post-processing)

# Peruskäsitteitä

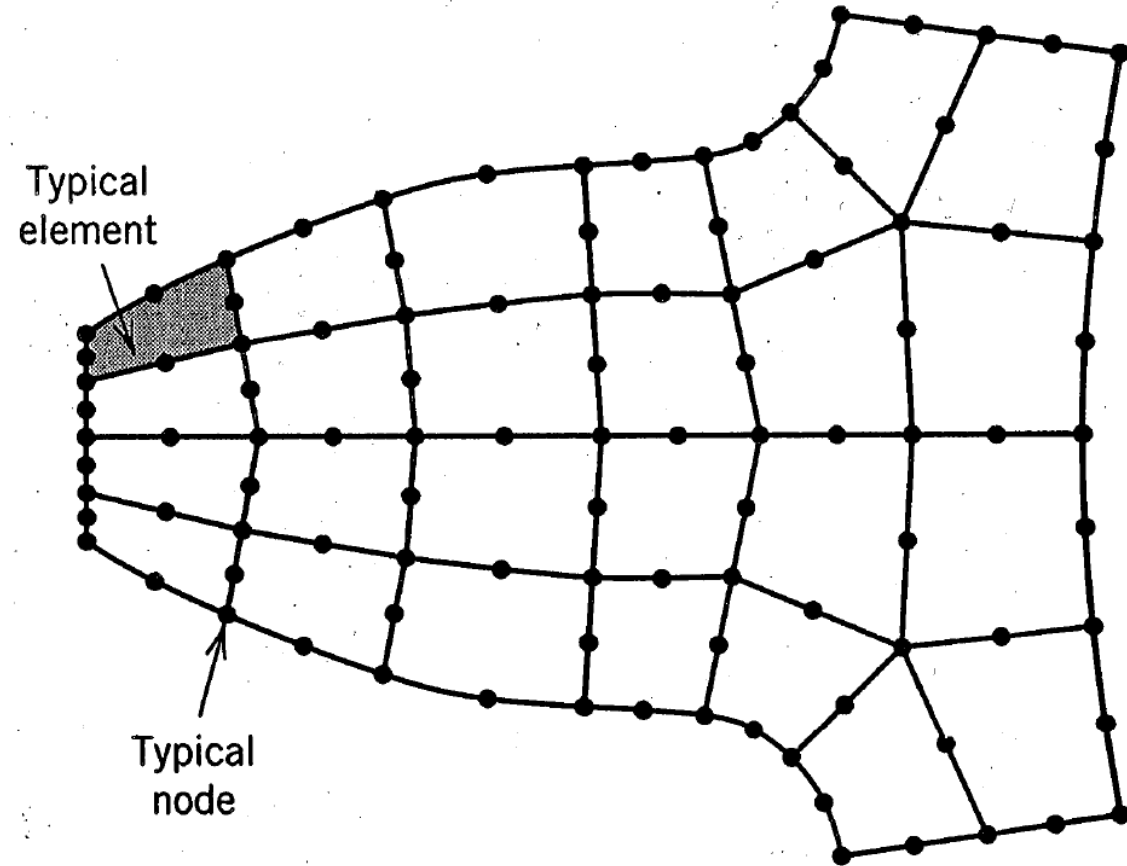
- Elementit (elements)
- Elementtiverkko (mesh)
- Elementit liittyvät toisiinsa solmupisteissä eli solmuissa (nodes)
- Diskretointi = jatkuvan systeemin kuvaaminen äärellisellä määrällä vapausasteita
- Solmupisteiden siirtymät ovat tuntemattomia suureita
- FEM toimii yhtä helposti staattisesti määrätyillä ja määräämättömällä rakenteilla



# Lähtötiedot

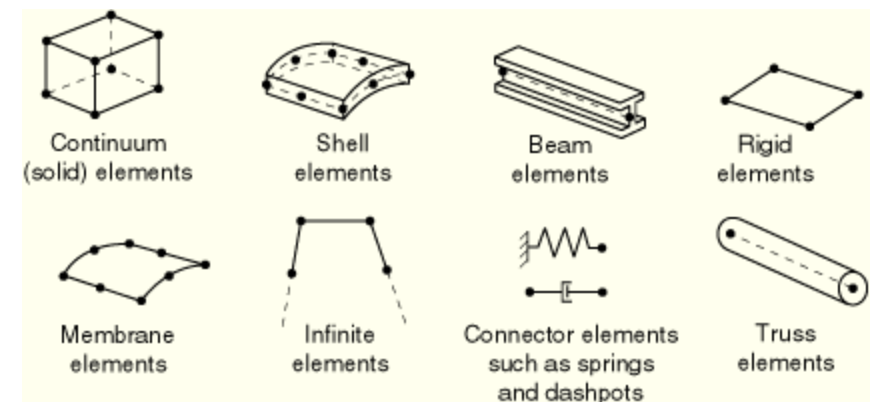
## Lineaarinen staattinen analyysi

- Materiaalitiedot  $E$ ,  $\nu$ , ( $G$ )
- Fysikaaliset tiedot
  - Levyn paksuus
  - Palkin tai sauvan poikkileikkaustiedot
- Kuormitus
- Reunaehdot eli tuennat
- Elementtiverkon tiedot

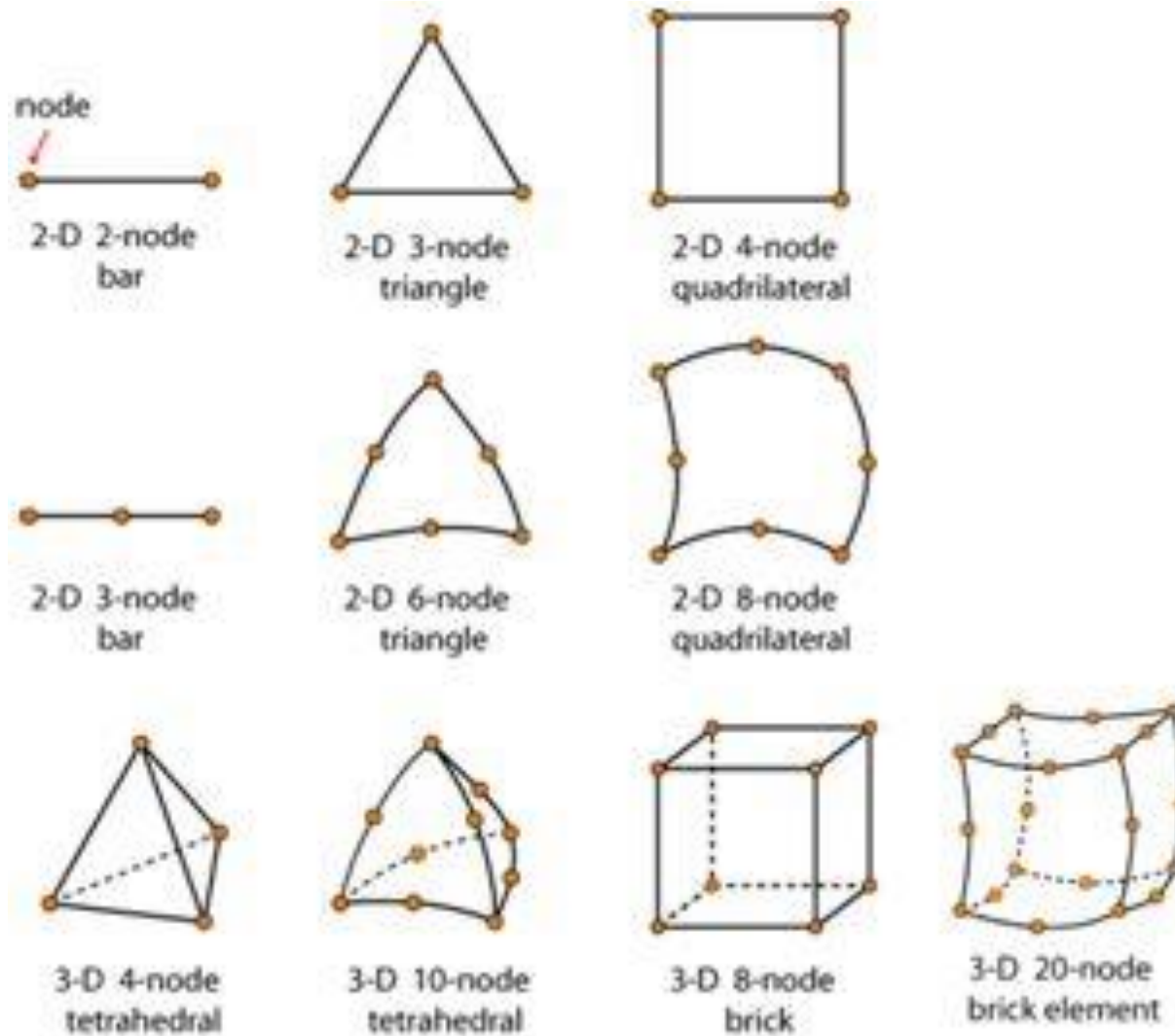


# Elementtityyppejä

- Valittava huolellisesti.
- Pystyykö elementti kuvaamaan tarkasteltavaa ilmiötä?
- Elementtien vapausasteet tunnettava
- Asteluvun eli solmujen lukumäärän voi valita
- Eri elementtityyppien liittäminen
- Esimerkiksi I-palkeista koostuva kehä
  - Tilavuuselementit (100 000 kpl)
  - Palkkielementit (20 kpl)

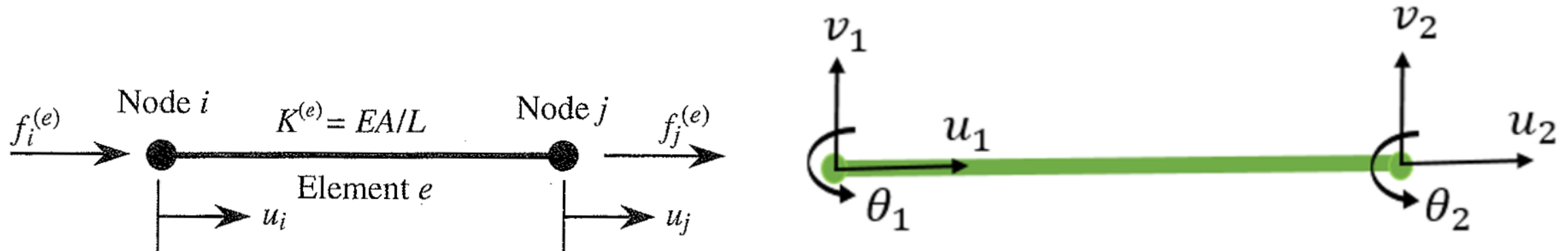


# Elementtityyppejä



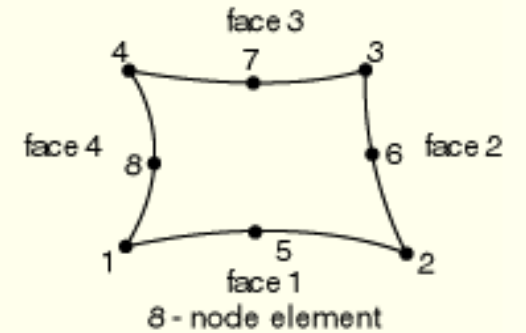
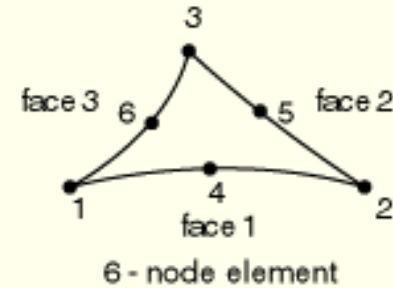
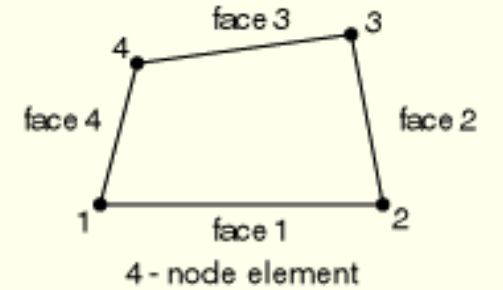
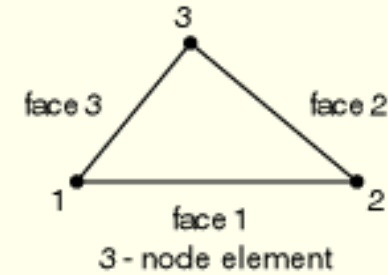
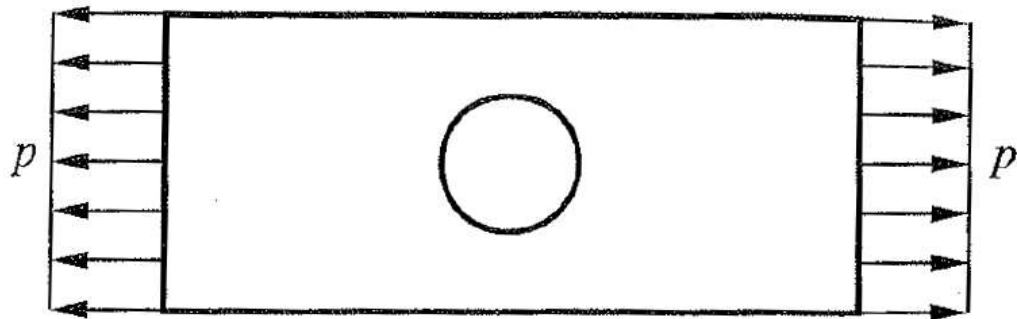
# Sauva- ja palkkielementti

- Sauva kantaa vain sauvan suuntaisia voimia (ristikot)
- Palkki kantaa myös taivutusta (kehärakenteet)
- Viivaelementtejä
- Fysikaaliset parametrit: elementin poikkileikkaustiedot



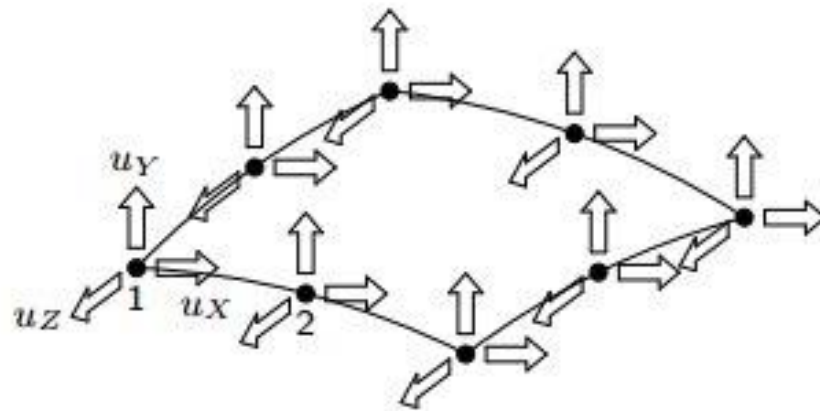
# Tasojännitys- ja tasovenymäelementti

- Vapausasteet: kaksi siirtymää/solmu (siirtymä x- ja y-suunnassa)
- Kuormituksena ei voi antaa momentteja
- Fysikaalinen parametri: elementin paksuus

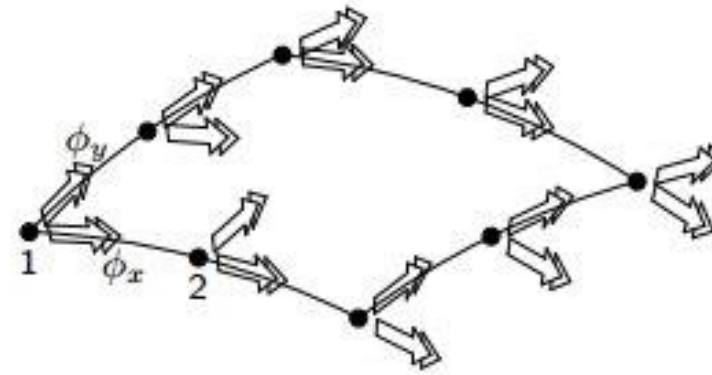


# Kuorielementti

- Käytetään yleisesti ohutlevyrakenteissa
- Tasomaisia, kaarevia tai kaksoiskaarevia
- 5 vapausastetta/solmu
- Fysikaalinen parametri: elementin paksuus



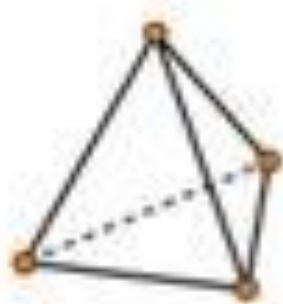
(a) translations



(b) rotations

# Tilavuuselementit

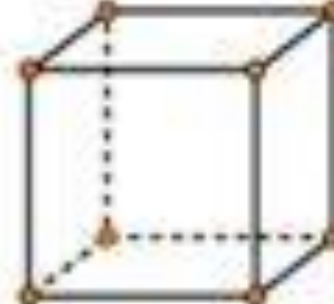
- Vain siirtymävapausasteet
- Ei kiertymävapausasteita (kuormituksenä ei voi antaa momentteja)



3-D 4-node  
tetrahedral



3-D 10-node  
tetrahedral



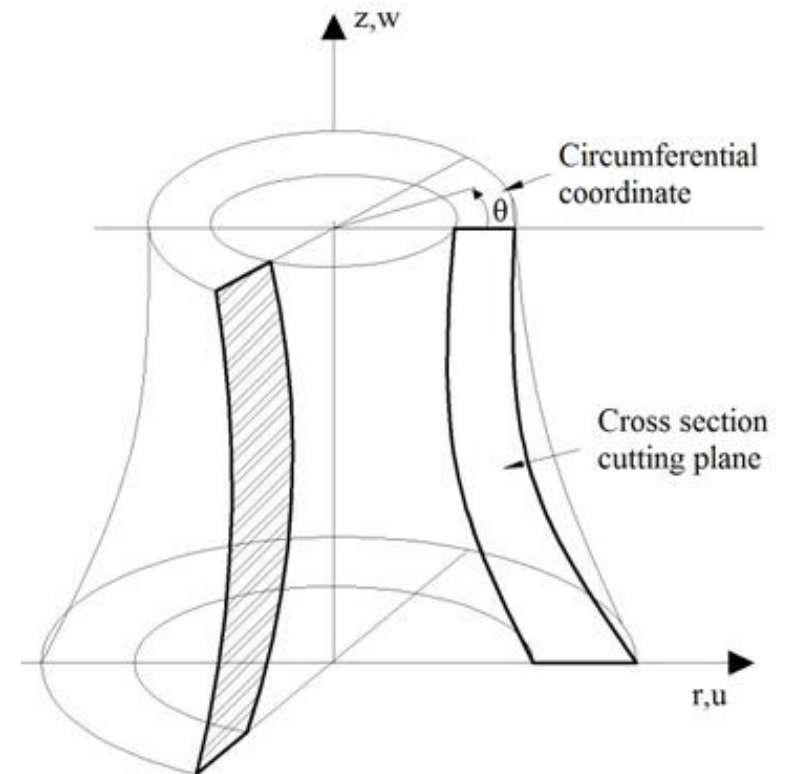
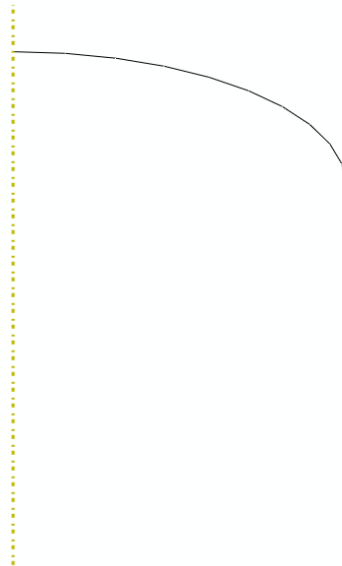
3-D 8-node  
brick



3-D 20-node  
brick element

# Pyörähdyssymmetriset elementit

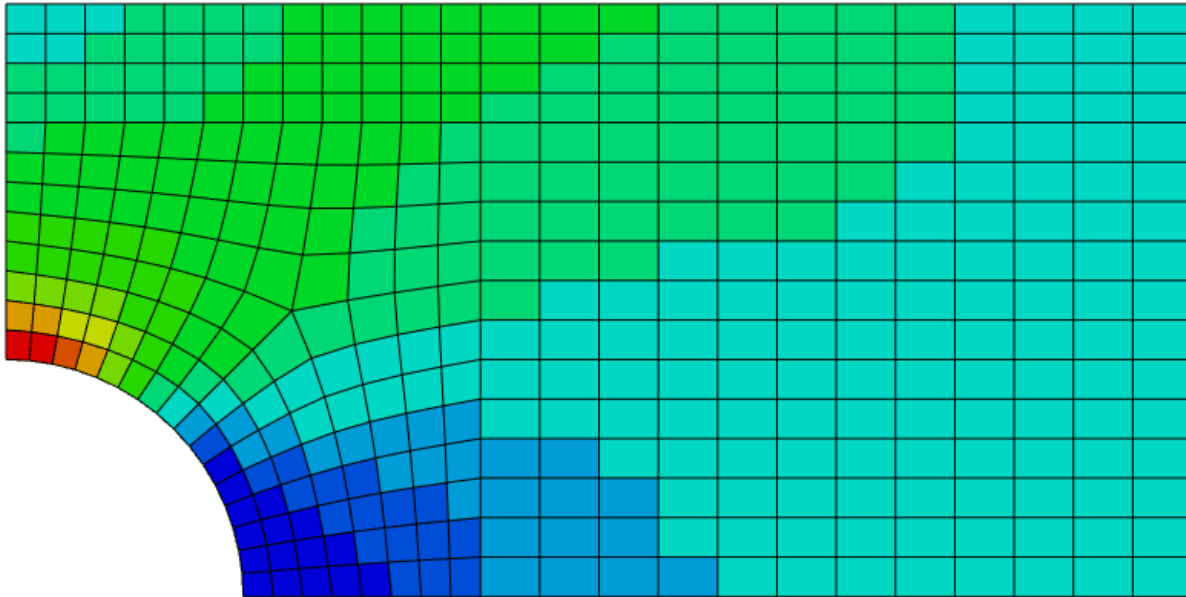
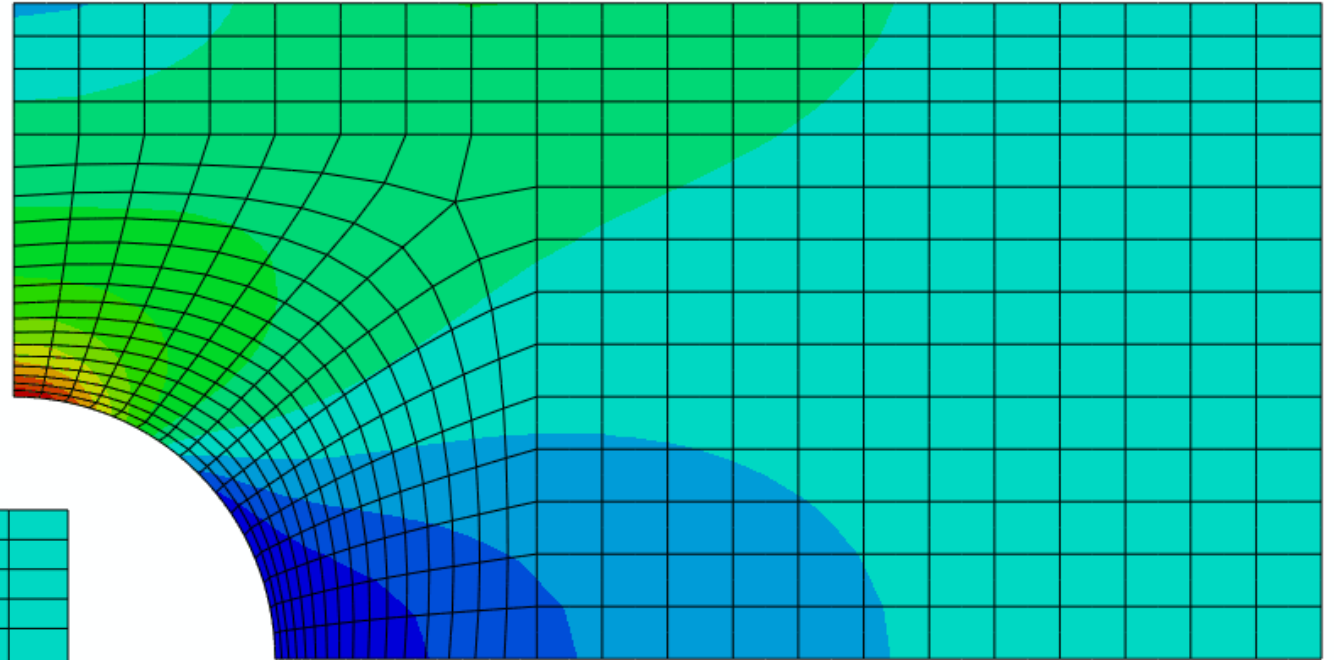
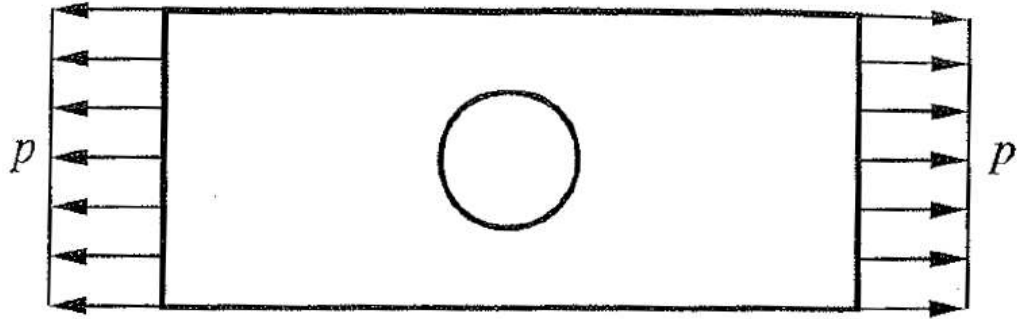
- Käytetään, jos sekä rakenne että kuormitus ovat symmetrisiä pyörähdysakselin suhteen
- Pyörähdyssymmetrinen kuorielementti
- Pyörähdyssymmetrinen tilavuuselementti



# Tarkkuus

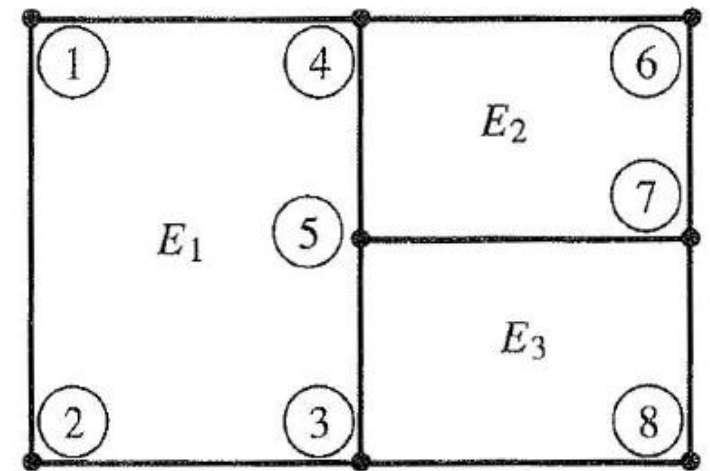
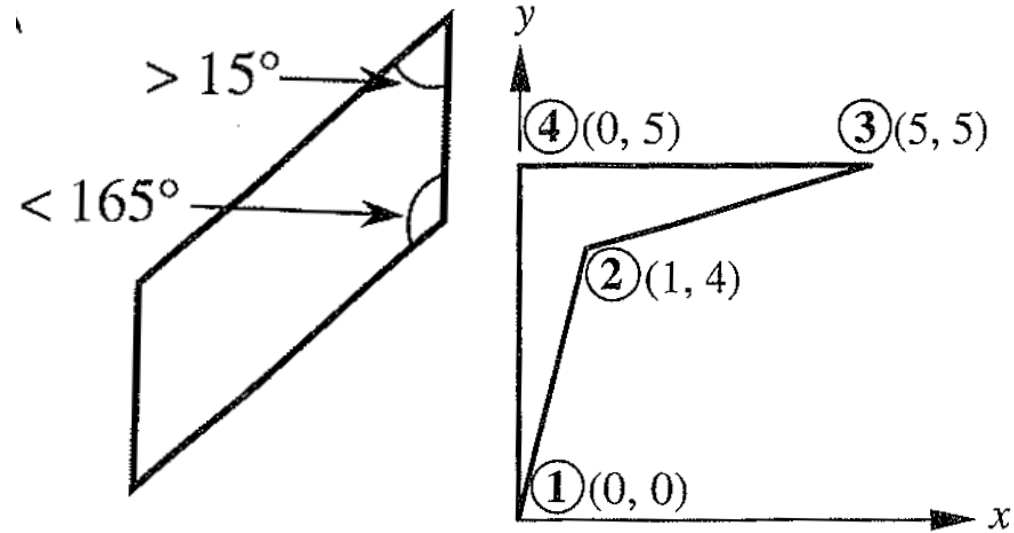
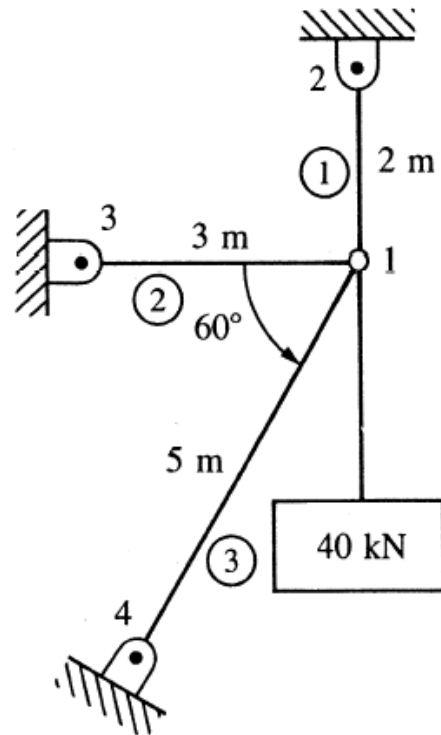
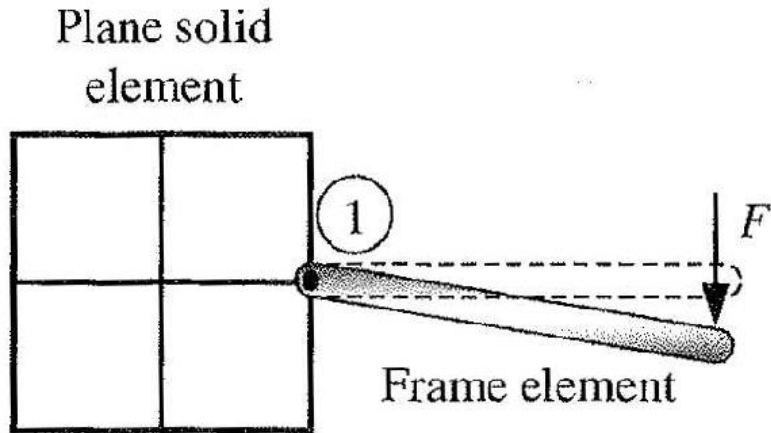
- Elementtiverkkoa tihentämällä tulosten tarkkuus paranee, mutta laskenta-aika pitenee
- Mistä tietää, että verkko on tarpeeksi tiheä?
  - Verkkoa tihennettäessä tulokset eivät muutu
  - Jännitykset ovat jatkuvia elementtien välillä
- Elementin asteluku: paraboliset elementit tarkempia kuin lineaariset
- Elementin muoto
- Siirtymät saadaan tarkempina kuin jännitykset

# Tarkkuus



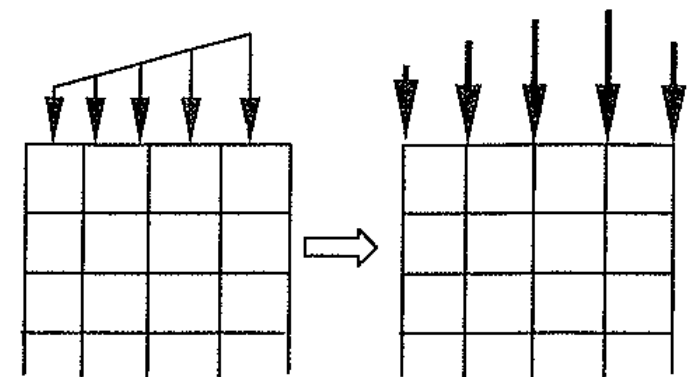
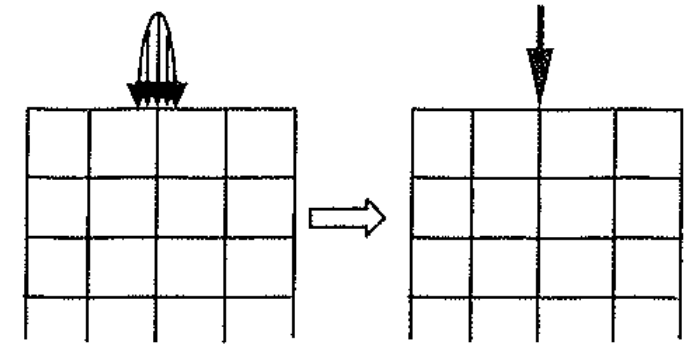
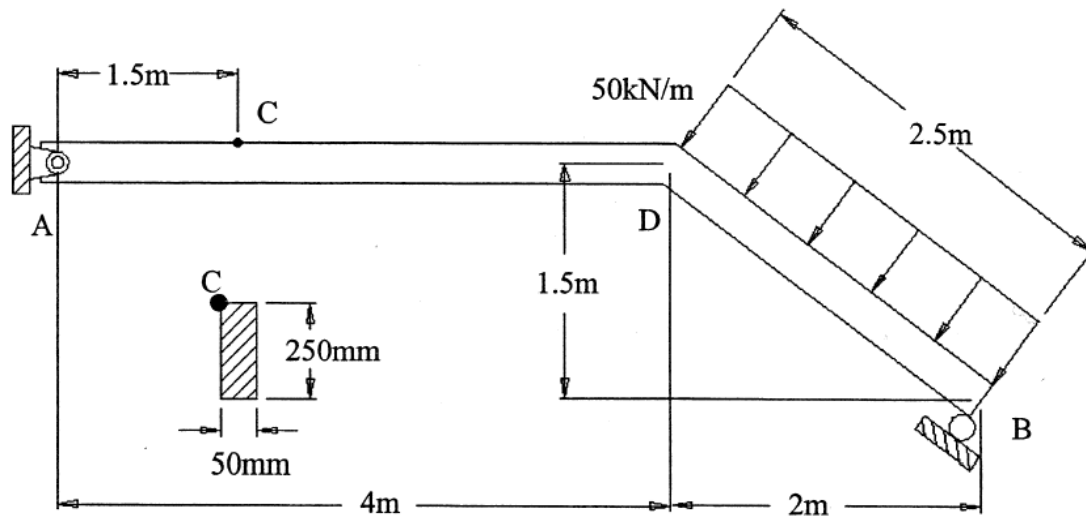
# Huomioita elementeistä

- Muoto (kulmat, sivusuhte) (Shape (angles, aspect ratio))
- Elementtien liittäminen (Connecting elements)



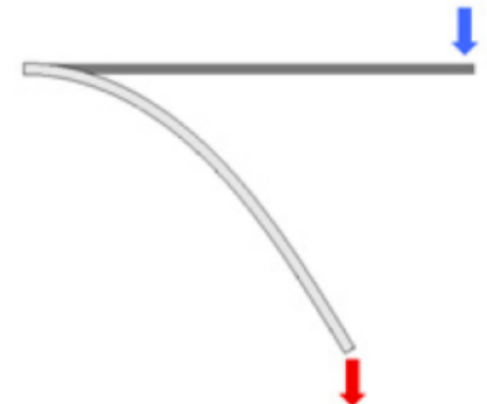
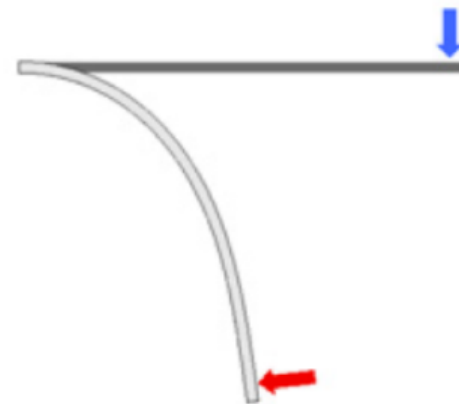
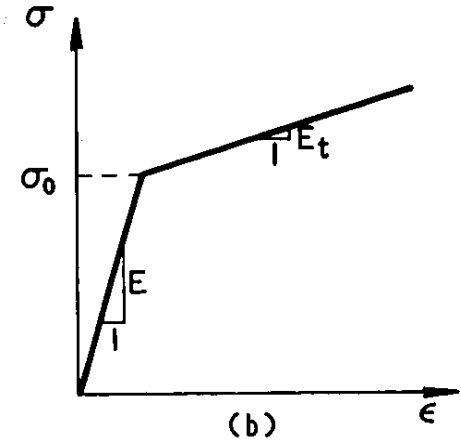
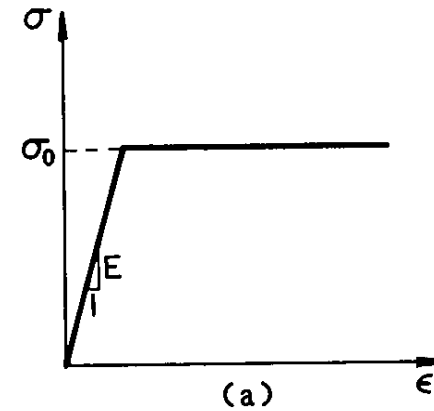
# Staattinen analyysi

- Lujuusopin perustapaus
- Pistevoima aiheuttaa teoriassa äärettömän jännityksen voiman vaikutuspisteeseen
- Voima jakaantuu todellisuudessa äärelliselle alalle.



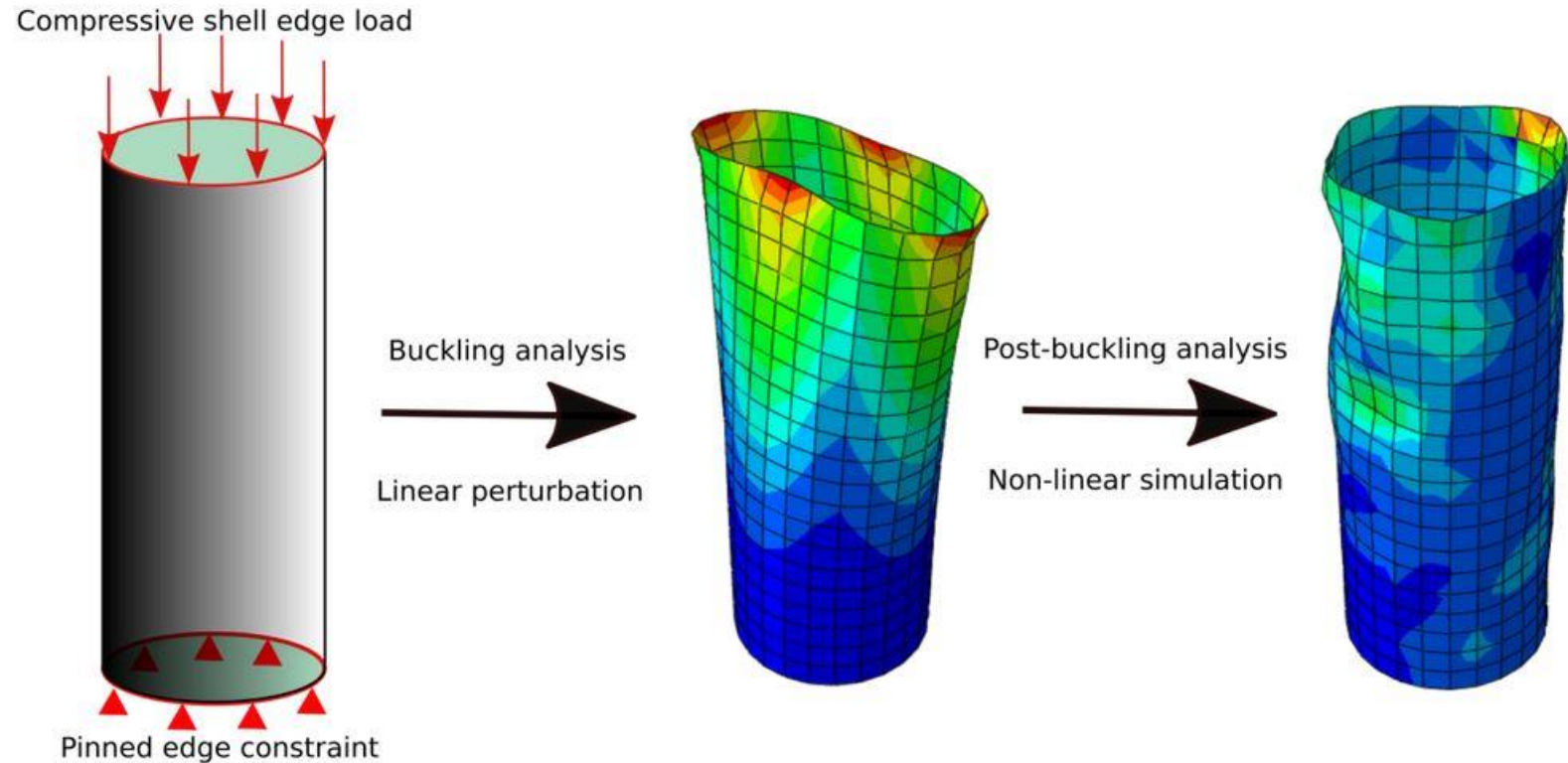
# Epälineaarisuus

- Materiaalinen epälineaarisuus
- Geometrinen epälineaarisuus
  - Suuret siirtymät tai kiertymät
  - Kontakti
- Epälineaariset analyysit ovat huomattavasti haasteellisempia kuin lineaariset analyysit



# Stabiliteettianalyysi

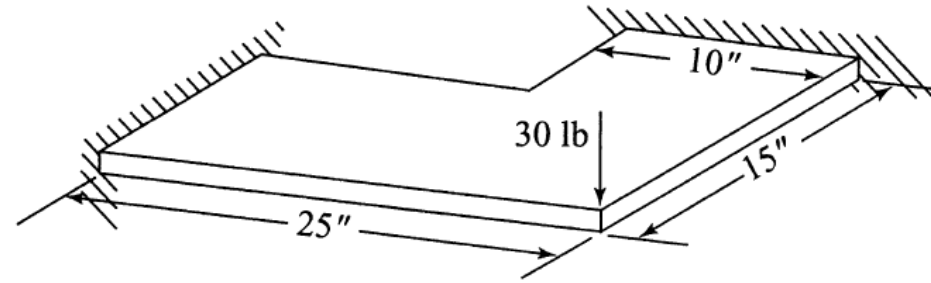
- Stabiilius tarkasteltava erikseen
- Lineaarinen staattinen analyysi ei havaitse nurjahdusta tai lommahdusta



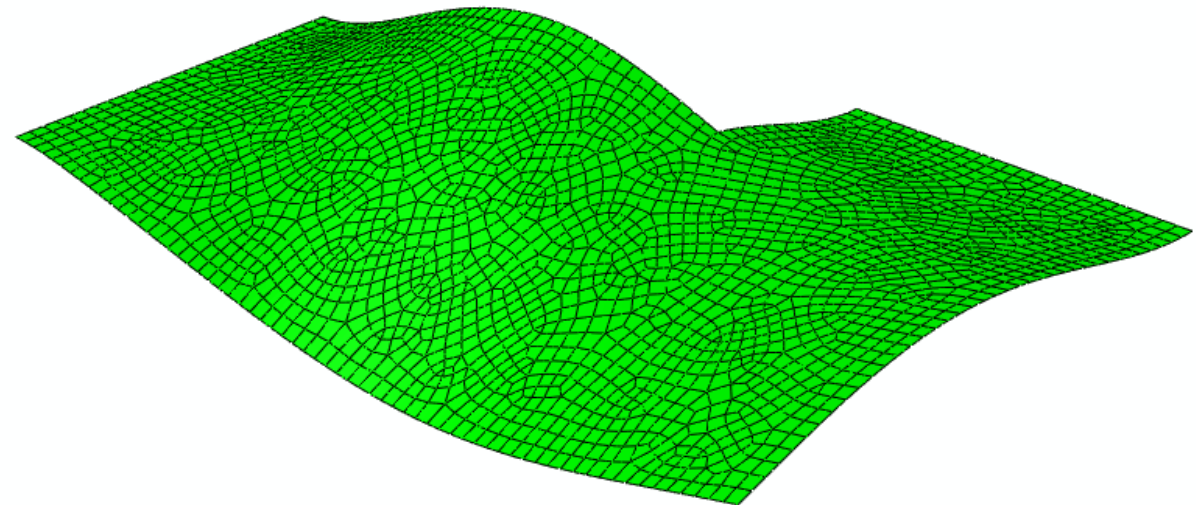
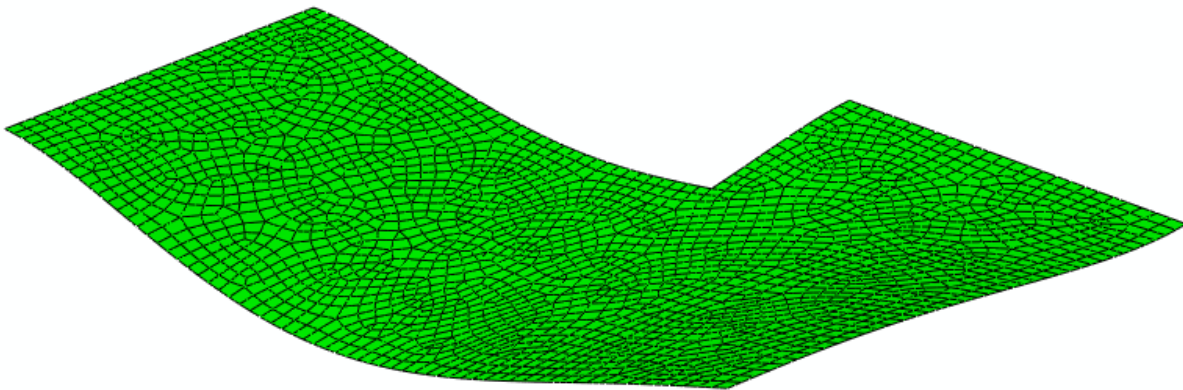
# Dynaamiset analyysit

- Ominaistaajuusanalyysi eli moodianalyysi
  - Transienttianalyysi
  - Taajuusvasteanalyysi
  - Vastespektrianalyysi
  - Satunnaisvärähtelyanalyysi
- 
- Tehtävän luonne määrää analyysityypin
  - Usein moodianalyysi tehdään ensimmäisenä

# Moodianalyysi

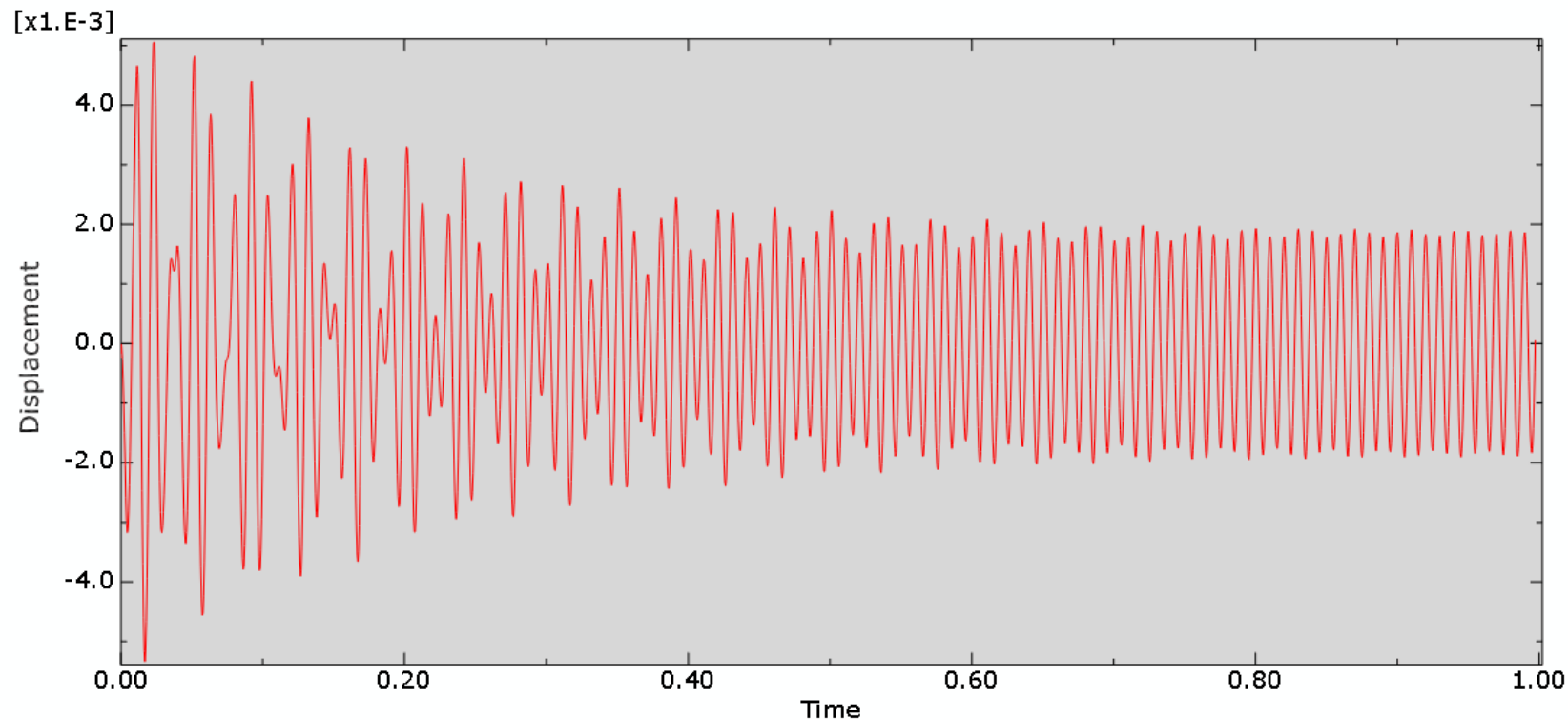


- Lasketaan rakenteen alimmat ominaistaajuudet ja ominaismuodot.
- Lähtötietoihin lisättävä materiaalin tiheys
- Kuormitusta tai vaimennusta ei tarvitse antaa



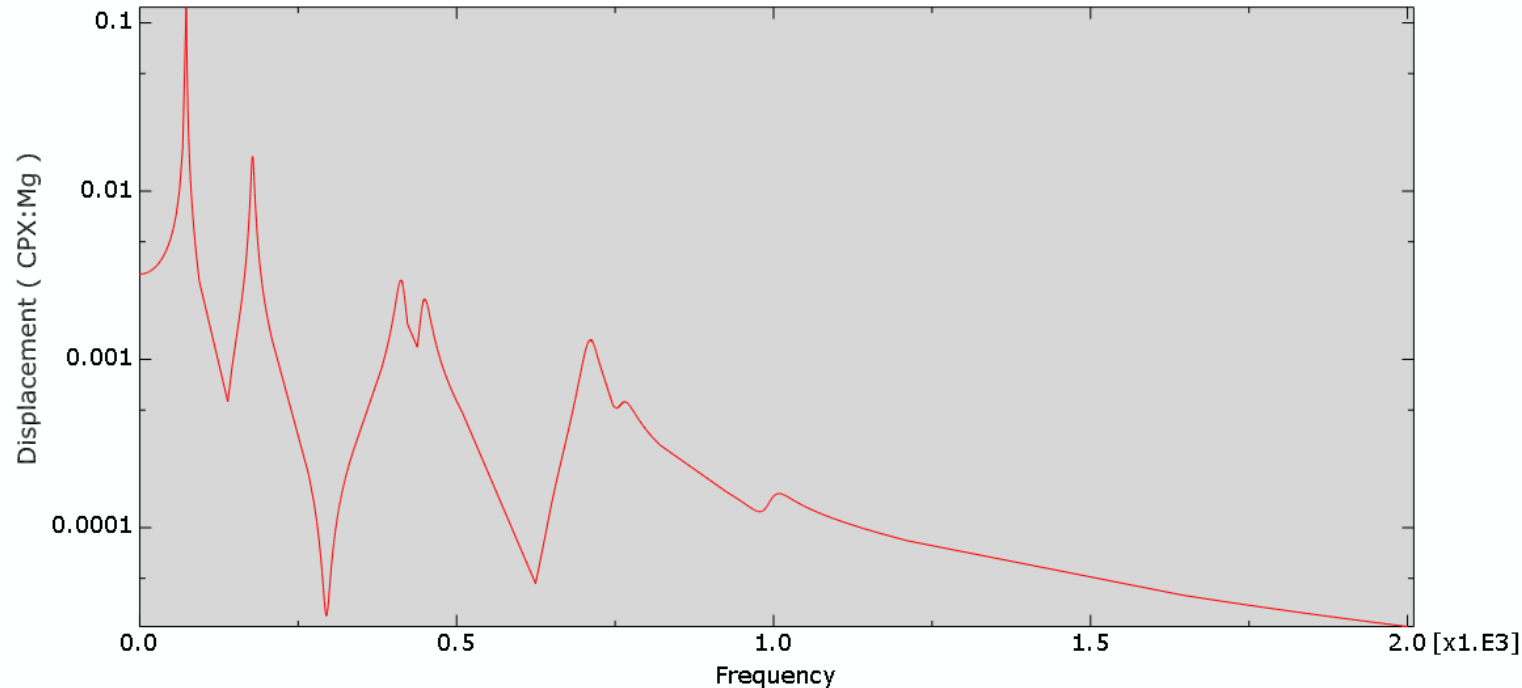
# Transienttiansalyysi

- Kuormitus annetaan ajan funktiona
- Tulokset saadaan myös ajan funktiona



# Taajuusvasteanalyysi

- Kuormituksen amplitudi annetaan taajuuden funktiona
- Tulokset saadaan myös taajuuden funktiona (vakiotilan amplitudi, kun heräte vaikuttaa tarkasteltavalla taajuudella)

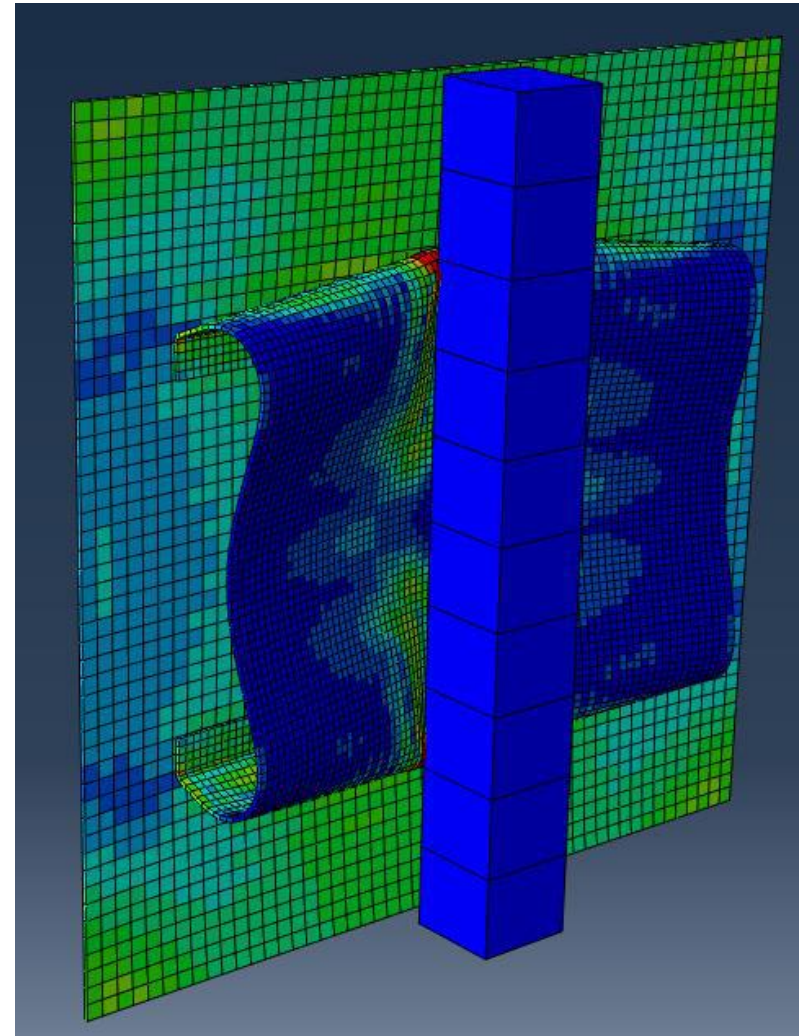
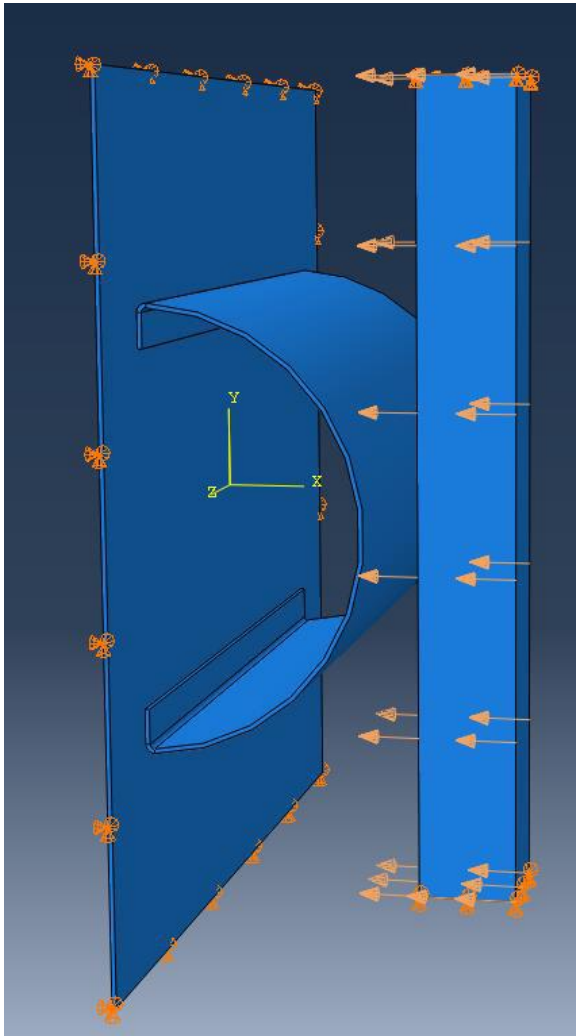


# Kontaktianalyysi

- Lineaarinen analyysi ei huomaa toisistaan irrallisten kappaleiden törmäämistä vaan osat voivat mennä toistensa sisään esteettä.
- On tehtävä epälineaarinen kontaktianalyysi, joka havaitsee koskettavat pinnat analyysin edetessä.

# Kontaktianalyysi

## Törmäyssuojan simulointi

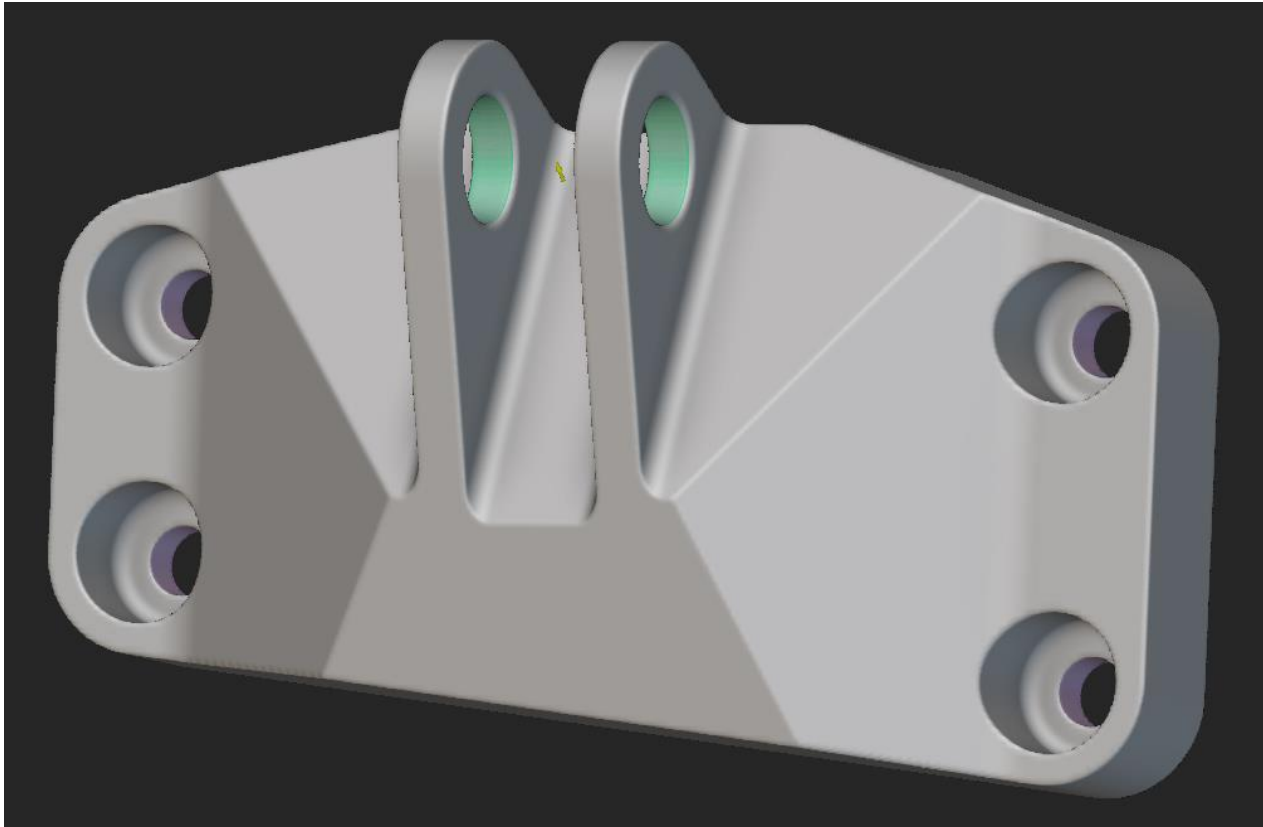


# Optimointi

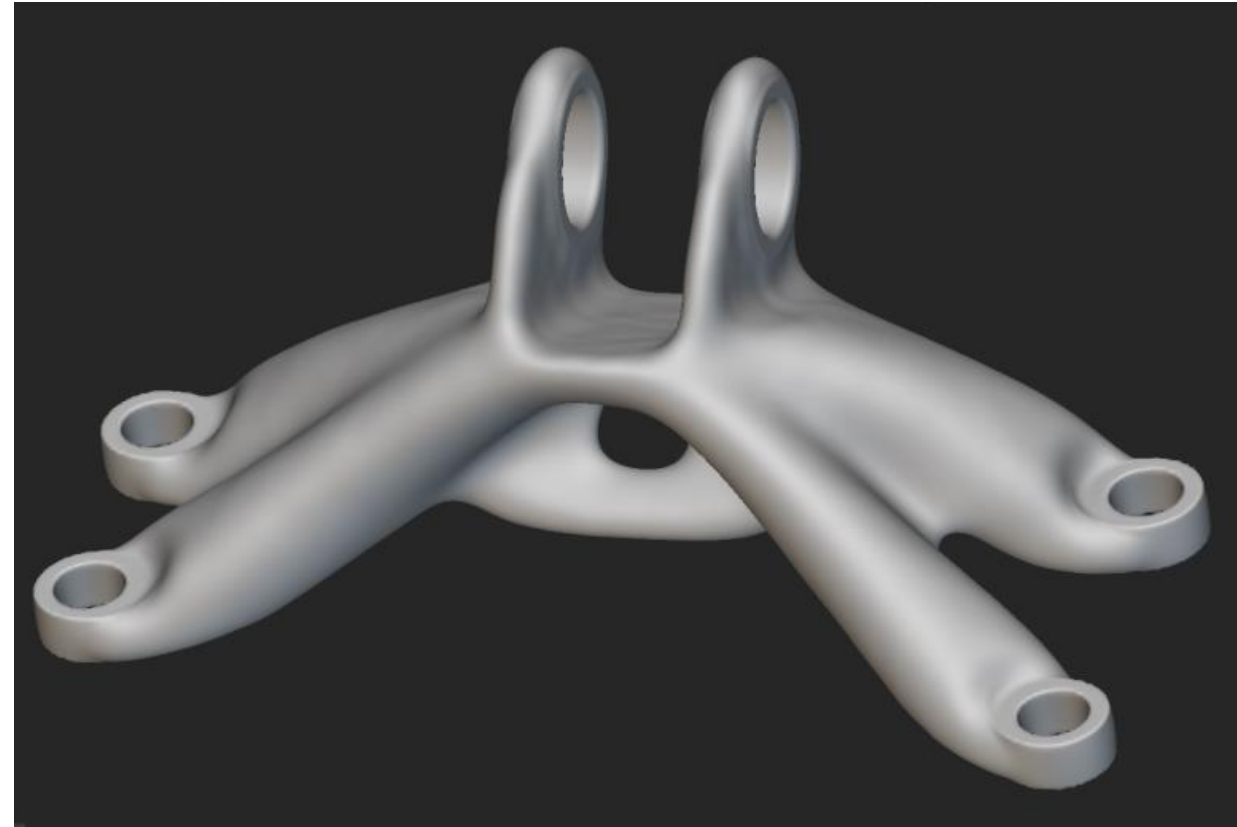
- Tavoitteena löytää paras konstruktio lukuisista vaihtoehdoista
- Tavoitefunktion minimointi tai maksimointi
- Vaiheet:
  - Suunnittelumuuttujien valinta (esim. levyn paksuus)
  - Tavoitefunktion muodostaminen (esim. kokonaismassa, joka riippuu suunnittelumuuttujista)
  - Rajoitteet (esim. levyn paksuus vähintään 1 mm)

# Topologiaoptimointi

- Ennen optimointia

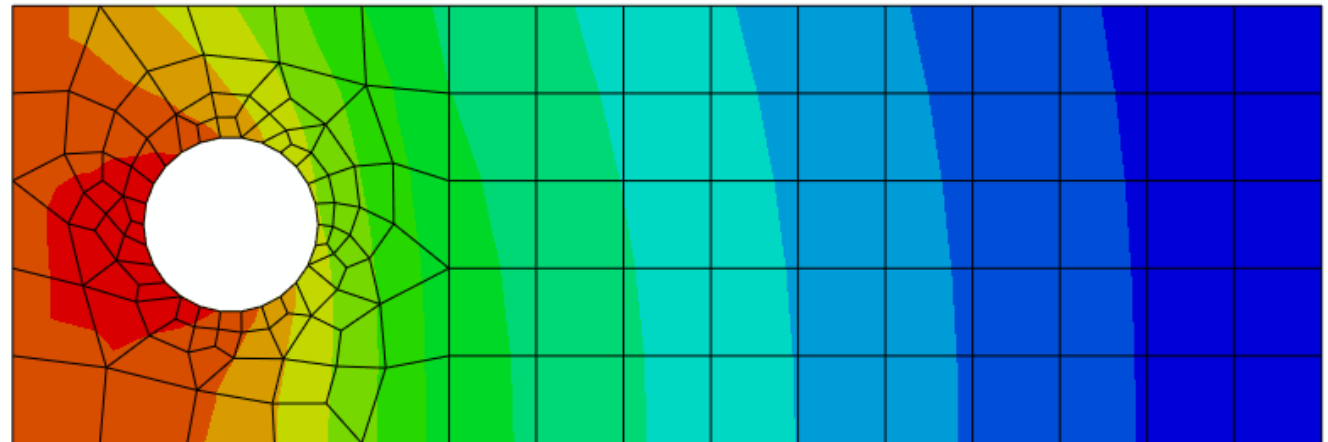
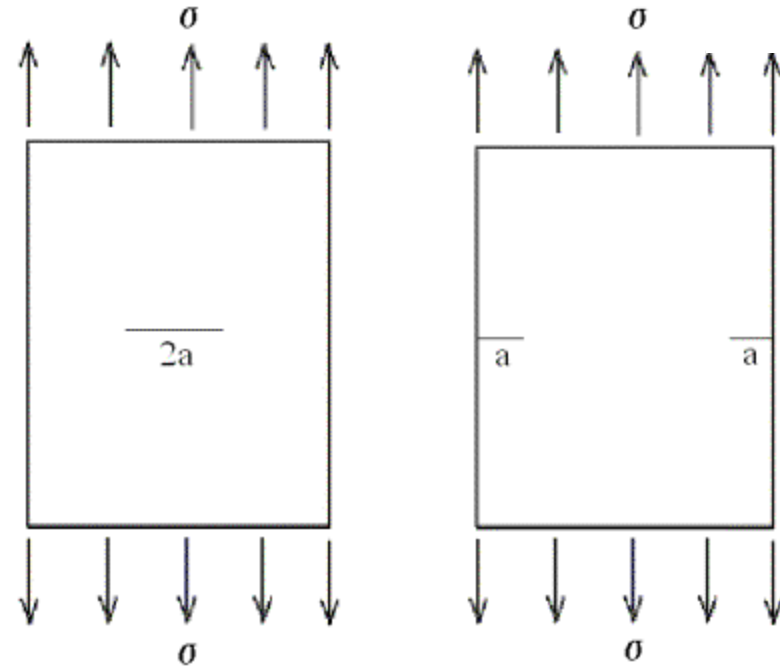
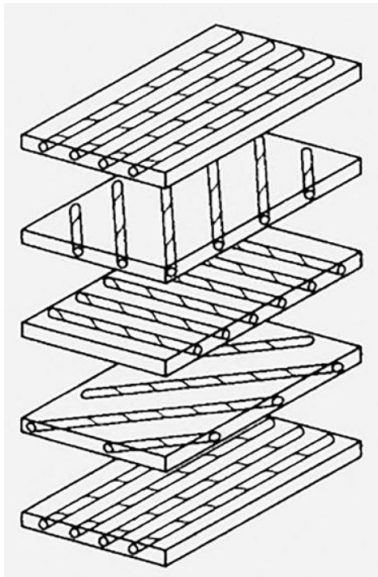


- Optimoinnin jälkeen

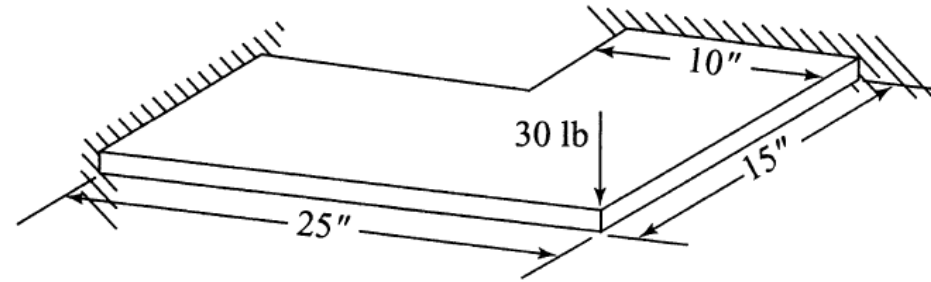


# Muita analyysejä

- Murtumismekaniikka
- Lämmönsiirto
- Lämpöjännitykset
- Komposiittirakenteet, kerroslevyt

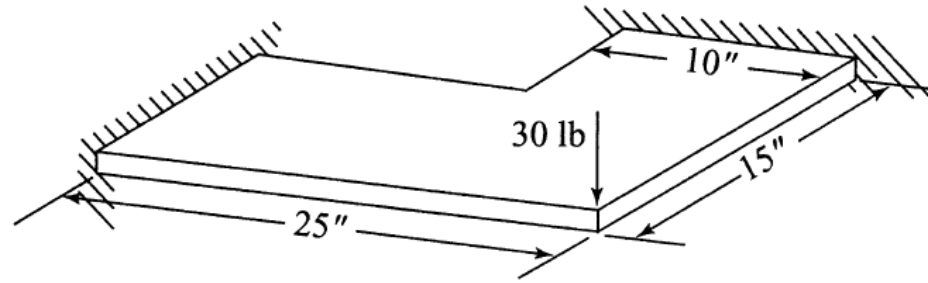


# Esimerkki



- Vasaralla, jonka massa on 0,3 kg, isketään laatan ulkonurkkaan nopeudella 0,8 m/s.
- Rakenne mallinnetaan elementtimenetelmällä staattista analyysia käyttäen.
- Törmäyskohtaan asetetaan arvattu pistevoima 13,6 N (30 lb).
- Tulokset FEM-analyysista:
  - Nurkan taipuma = 82,7 mm
  - Maksimijännitys = 420 MPa
  - Rakenteen kimmoenergia = 0,5625 J.
- Mikä staattisen voiman arvo malliin pitää asettaa 13,6 N:n sijasta?
- Mikä on iskun aiheuttama nurkan maksimitaipuma ja maksimijännitys laatussa? Rakenne oletetaan lineaariseksi.

# Ratkaisu



- Oletetaan, että iskun liike-energia  $E_k$  siirtyy kokonaisuudessaan rakenteen kimmoenergiaksi  $U$ .
- Lineaarisuus tarkoittaa, että jos kuormitus kerrotaan luvulla  $c$ , siirtymät ja jännitykset saadaan myös kertomalla luvulla  $c$ .
- Kimmoenergia pitää kertoa luvulla  $c^2$ , koska se riippuu voimien ja siirtymien tulosta!
- Kerroin  $c$  saadaan siis kaavalla
- Törmäyskohtaan on asetettava pistevoima  $c \cdot 13,6 \text{ N} = 5,62 \text{ N}$ .
- Lineaarisuuden mukaan:
  - Nurkan taipuma =  $c \cdot 82,7 \text{ mm} = 34,2 \text{ mm}$ .
  - Maksimijännitys =  $c \cdot 420 \text{ MPa} = 173,5 \text{ MPa}$ .

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = 0,096 \text{ J}$$

$$c = \sqrt{\frac{E_k}{U}} = \sqrt{\frac{0,096 \text{ J}}{0,5625 \text{ J}}} = 0,413$$

# Yhteenveto

- Simulointi voi säästää huomattavasti aikaa, rahaa ja luontoa
- Elementtimenetelmä on yleisin simulointimenetelmä
- Sen käyttäminen vaatii perehtymistä sekä FEMin teoriaan että mallinnettavan ilmiön fysiikkaan (esim. lujuusoppiin)
- Simuloinnin tulokset eivät välttämättä kuvaa todellisuutta tarkasti vaan malli sisältää usein epätarkkuuksia (reunaehdot, materiaalitiedot, ym.)