



Ruuvien mallintaminen 3D:ssä

METALLIRAKENTAMISEN TUTKIMUSKESKUS/TTY

TUTKIMUSRYHMÄ: Hilikka Ronni, Keijo Fränti ja Henri Perttola,
Ryhmän vetäjänä prof. Markku Heinisuo

Metallirakentamisen tutkimuskeskus
Frami, Kampusranta 9 C
60320 Seinäjoki

E-postit: __. __@tut.fi



Ruuvien/ruuvikiinnitysten ja -liitosten 3D-mallit

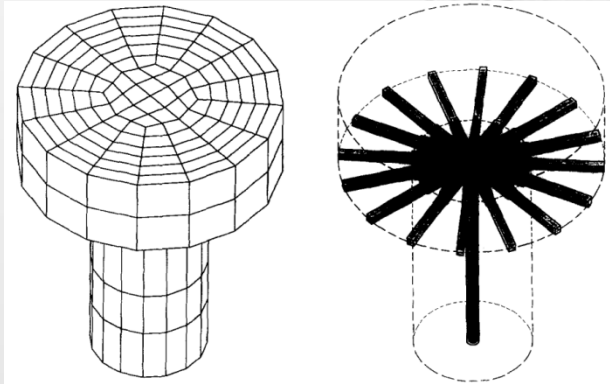
Toteutettavissa käytännössä vain numeerisen analyysin avulla!

- Kokeellinen tutkimus voidaan osittain korvata numeerisella analyysillä. Kokeellinen tutkimus on yleensä paljon kalliimpaa kuin numeerinen 3D-simulointi.
- 3D mallien avulla voidaan tutkia asioita, joiden mittaaminen on hankalaa. Esimerkiksi kontaktien toiminta ruuviliitoksessa, vipuvoiman syntyminen, paikalliset ilmiöt ...
- 3D-mallit soveltuvat erityisen hyvin parametrisiin tarkasteluihin, joissa tutkitaan jonkin tekijän vaikutusta liitoksen tai kiinnityksen toimintaan. Parametreina voivat olla kuormitus, mitat, aineominaisuudet jne.
- Epälineaaristen ilmiöiden realistinen kuvaaminen edellyttää numeerista analyysia! On otettava huomioon esimerkiksi metallien plastinen käyttäytyminen, kontaktiprobleemat, geometrisesti epälineaariset ilmiöt ...

Vaikka insinöörin käyttämät mitoitusmenetelmät perustuvat yleensä yksi tai kaksiulotteisiin malleihin, niin rakenteiden maailma on oikeasti kolmiulotteinen ja sitä on vaikea kuvata ilman 3D-malleja!



Ruuvien 3D-mallit



3D-elementtimenetelmämalli (solid model) tai korvaava malli (spin model), jota voidaan käyttää osana liitoksen 3D-mallia (*Bursi O. S. , Jaspart J. P., Basic issues in the finite element simulation of extended endplate connections, Computers and Structures 69 (1998) 361-382*)

Muodostetaan 3D-elementtimenetelmämalli taivutetun päätylevyliitoksen ruuville:

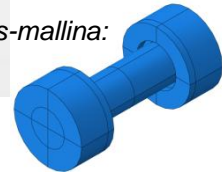
- Määritellään mallin geometria
- Ainemallit: Ramberg-Osgood
- Ruuvien elementtimenetelmämallin verifiointi
 - ◀ tutkitaan ratkaisun konvergenssia verkon tihennykselle kahden eri elementin tapauksessa (C3D8I ja C3D20R/ Abaqus)
- Validointi



3D-ruuvimallin geometria

PERIAATE: Mallin geometrian yksityiskohdat kuvataan analysoinnin tavoitteita vastaavasti ... rajallisen laskentakapasiteetin maailmassa!

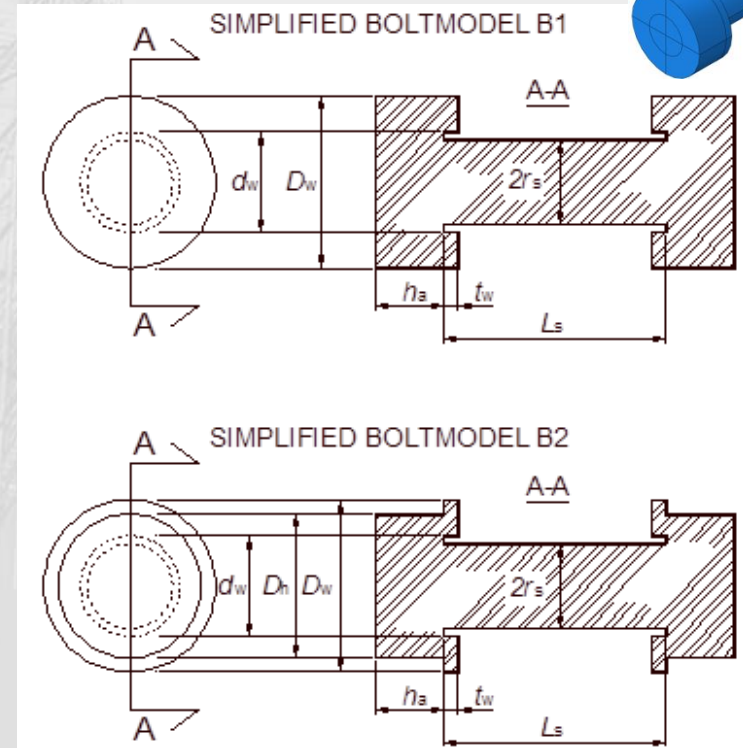
Abaqus-mallina:



- Taivutetun päätylevyliitoksen ruuvimalli, kun tavoitteena on tutkia koko liitoksen vastetta.

- $M-\theta$ -riippuvuus ► alkujäykkyys, kestävyys
- paikalliset ilmiöt toissijaisia

- Ruuvi toimii ensin yksinomaan vedettynä ja sitten vedettynä ja taivutettuna. Ruuvimalli mallinnetaan ilman kierteitä sekä ruuvimalli, mutteri ja aluslevyt esitetään monoliittisena mallina.



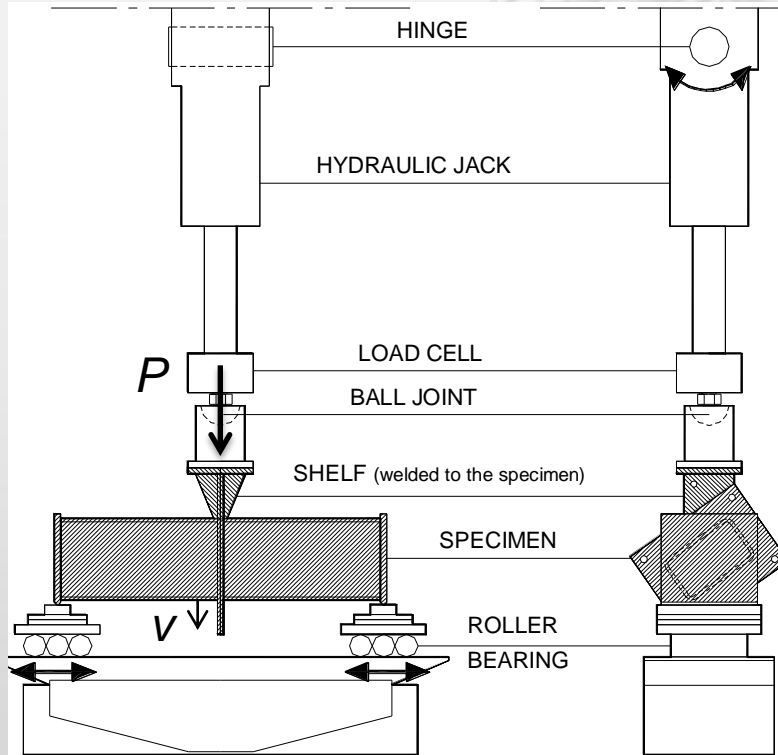
Poikkileikkauksen säde lasketaan jännityspinta-ala vastaavasti:

$$r_s = \sqrt{A_s/\pi}$$



Kokeiden simuloinnista tulevat vaatimukset ruuvimallille

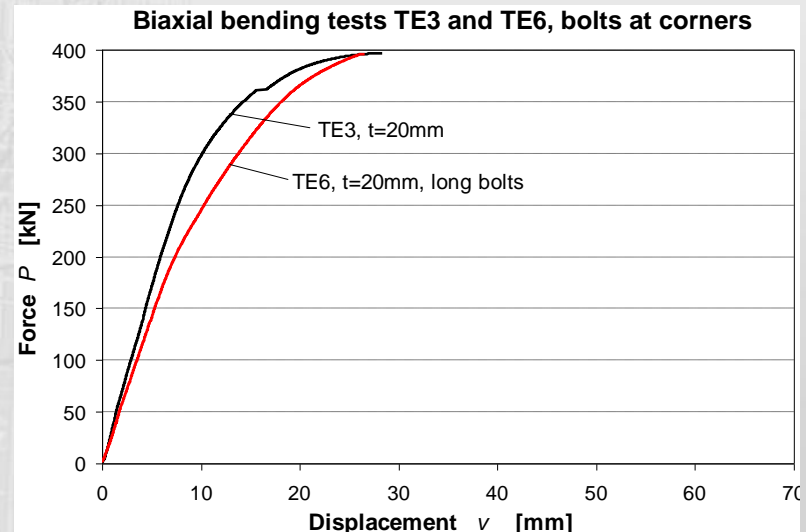
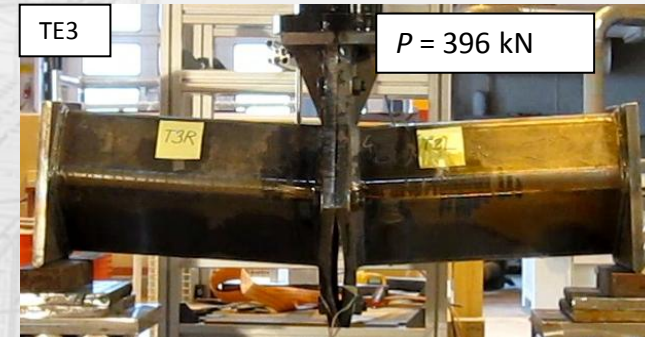
Koejärjestely:



Kolmen pisteen koe putken 250x150x10 - S355
 jatkosliitokselle (puhdas taivutus)

- päätylevyn paksuus $t = 20,3\text{mm}$
- pultit, aluslevyt mutterit M20-10.9

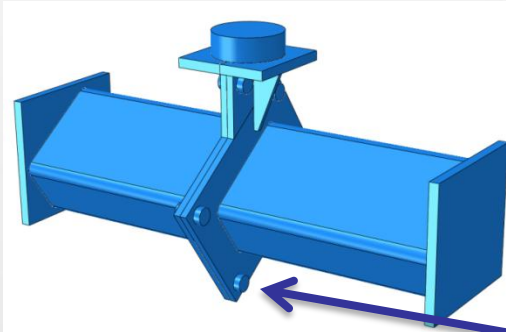
Voimaohjattu koe TE3



Pertola H., Heinisuo M.: Test Report, End plate joints of steel tubes,
 Biaxial and Weak Axis bending,

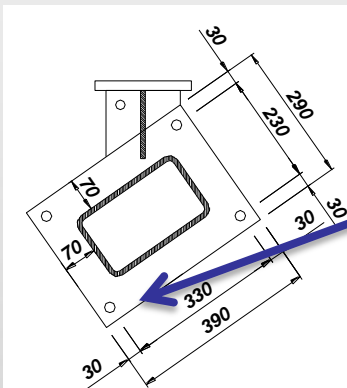


Kokeiden simuloinnista tulevat vaatimukset ruuvimallille (jatkoa)



Kokeessa alin pultti on pääosin vedetty, deformaation edetessä taivutuksen osuus lisääntyy

HAVAINTO: Liitoksen rasitetuin/alin pultti oli selvästi kuroutunut vaikka koe keskeytettiin ennen liitoksen kantokyvyn menettämistä eli "nousevan vasteen aikana"



$L + \Delta L$

Karkea mittaus pultin kokonaispituuden muutokselle antaa insinöörivenymän $\epsilon = \Delta L/L = 6,2\%$

HUOM: Valmistajan ilmoittama tyypillinen murtovenymä A5 (%) pultille M20-10.9 on noin 9%

PÄÄTELMÄ: Kokeen simulointi edellyttää pultin kuroutumisen kuvaamista, jolloin mallin tulee sisältää

- Geometrisesti epälineaarinen kinematiikan kuvaus
- Pultin aineen käyttäytyminen suurilla venymillä



Ainemallit, perusteita

Yksiakselista ainemallia käytettäessä logaritminen venymä ja hetkellinen jännitys

$$\epsilon = \ln(1 + \epsilon_n). \quad (1)$$

$$\sigma = \sigma_n(1 + \epsilon_n) \quad (2)$$

korvaavat nimellisen venymän ϵ_n ja jännityksen σ_n , kun halutaan erottaa puhtaasti materiaalinen käyttäytyminen geometriasta riippuvista ilmiöistä (kuroutuminen).

Vetosauvassa vaikuttaa voima $P = \sigma A = \sigma_n A_0$, kun A on sen poikkileikkauksen hetkellinen pinta-ala ja A_0 on vetokokeen aloitushetken pinta-ala. Kuroutuminen alkaa, kun

$$dP = \sigma dA + A d\sigma = A_0 d\sigma_n = 0 \quad (3)$$

jolloin aineen myötölujeneminen ei enää riitä kompensoimaan vetosauvan pienenevää poikkileikkauspinta-alaa. *HUOM: Muunnoskaavat yllä pätevät vain kuroutumiseen asti.*



Nimellisten ja hetkellisten venymien ero pitää ottaa huomioon kun venymä on noin muutaman prosentin kokoluokkaa!!



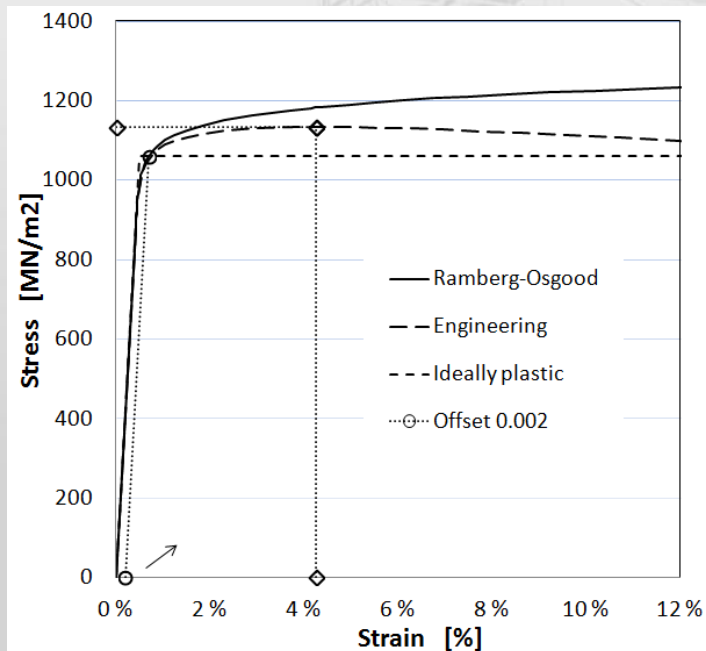
Ramberg-Osgood:

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_p = \sigma/E + \alpha \sigma_R (\sigma/\sigma_R)^n / E \quad (4)$$

Otaksutaan, että tunnetaan ruuvin teräksen kimmokerroin E sekä 0.2%-raja ($f_{0.2}$) ja murtolujuus (R_m). Nämä kaksi jälkimmäistä yleensä annetaan aineodistuksessa! Käyrä (4) kulkee pisteen ($\epsilon \approx (1 + \alpha) f_{0.2}/E$, $\sigma \approx f_{0.2}$) kautta, kun valitaan $\sigma_R \approx f_{0.2}$. Ramberg-Osgood mallin myötölujenemista kuvaavalle parametrille n voidaan iteroimalla hakea arvo ottamalla huomioon ehto

$$\text{MAX}[\sigma_n] = R_m, \quad \text{kun } d\sigma_n = 0 \quad (5)$$

jonka mukaan kuroutuminen alkaa, kun nimellinen jännitys saavuttaa murtolujuuden.



Ramberg-Osgoodin mallissa (1) otaksuttu venymän jakaminen kimmoseen ja plastiseen osaan, mikä pätee tarkkaan ottaen vain logaritmiselle venymälle.*

Muunnokset (1) ja (2) määrittelevät nimellisten ja hetkellisten venymien ja jännitysten yhteyden ja siis Ramberg-Osgood mallin ja sitä vastaavan insinöörikäyrän yhteyden ($d\sigma_n = 0$).

* = esim. Lubliner J., Plasticity theory, 1990.



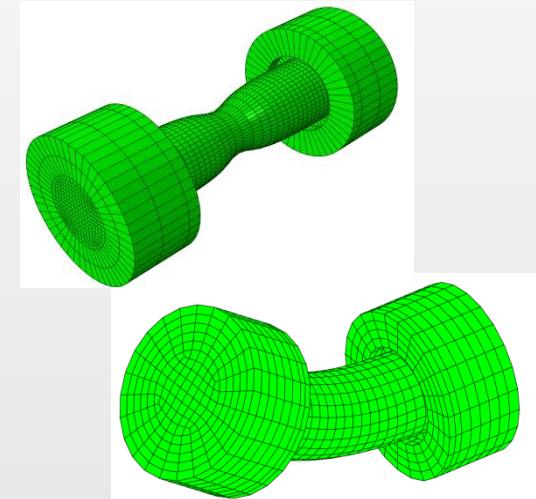
3D-elementtimenetelmämalli ruuville, yleiset vaatimukset

Diskretoidun mallin avulla tulee voida kuvata/interpoloida

- ruuvin kaareva geometria
- ruuvin muoto deformatiivisena (siirtymien interpolointi)
 - veto, ruuvi kuroutuneena
 - ruuvin taivutus

ja toisaalta suorittaa kimmo-plastinen analyysi

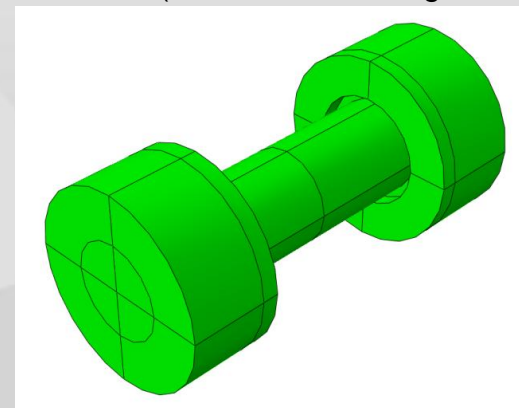
- Von Misesin myötöehto + isotrooppinen myötölujittuminen/R-O



3D-elementtiverkon luominen Abaqus CAE:ssa

- Partitointi siten, että elementtiverkko on luotavissa
- Elementtijaon muodostamisen ohjaus
(seeds by number of elements along edges or by element size)
- Elementtityypin valinta (siirtymämenetelmä)
 - ◀ Muodon perusteella se voi olla särmiö (hex), tetraedri (tet) tai kiilamainen (wedge)
 - ◀ Interpoloation asteluvun mukaan joko lineaarinen tai kvadraattinen
 - ◀ Redusoitu tai täysi integrointi (lukkiutumisvaara/0-energiamuodot)

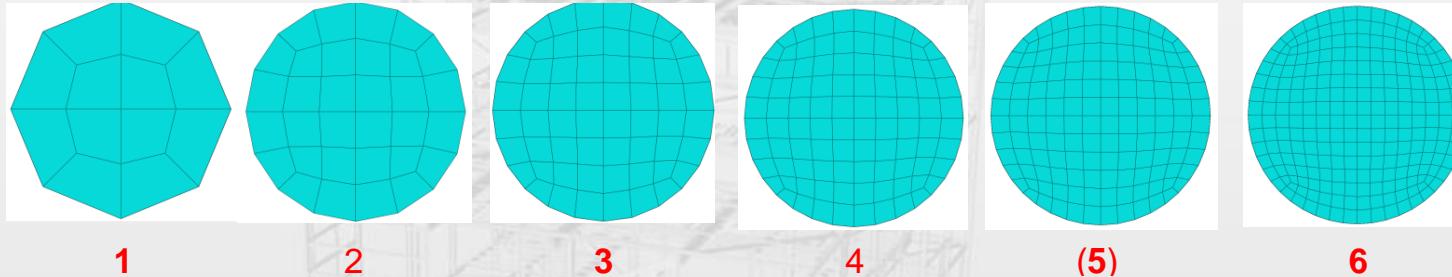
Partioitu malli (structured meshing allowed)





Ruuvien mallintaminen, kaarevan geometrian kuvaaminen

Poikittaisen verkon tihentämisen:



Taulukko: Pyöreän sauvan poikkileikkauspinta-alan A_e estimaatin suhde tarkkaan arvoon A , kun verkkoa tihennetään lineaarisen ja kvadraattisen elementin tapauksissa.

i	M_r	M_c	M_c/M_r	d/M_r [mm]	p/M_c [mm]	A_e/A lin.	A_e/A quad.
1	4	8	2.00	4.42	6.94	0.9003	0.9992
2	6	16	2.67	2.94	3.47	0.9745	1.000
3	8	24	3.00	2.21	2.31	0.9886	1.000
4	10	32	3.20	1.77	1.73	0.9936	1.000
5	12	40	3.33	1.47	1.39	0.9959	1.000
6	16	48	3.00	1.10	1.16	0.9971	1.000

d = halkaisijan pituus
 M_r = elementtejä halkaisijalla
 p = piirin pituus
 M_c = elementtejä piirillä
 lin. = lineaarinen elem.
 quad. = kvadraattinen elem.

- ▶ Lineaaristen elementtien avulla määritelty ruuvien poikkileikkauspinta-ala on liian pieni harvalla verkolla → johtaa ruuvien normaalivoiman ja momentin aliarvioimiseen
- ▶ Kvadraattisen elementin avulla kaarevan geometrian määrittely on oleellisesti tarkempaa!



Mallin verifiointi

Validation = solving the right equations!
Verification = solving the equations right!

Verifiointissa osoitetaan, että laskennallinen malli on oikein implementoitu ja sen ratkaisut edustavat riittävällä tarkkuudella matemaattisen mallin ratkaisuja.*

Oikein implementoidun elementtimenetelmämallin **verifointi** on prosessi, jossa tutkitaan **mallin diskretoinnista aiheutuvaa virhettä**. Niiden mallien tapauksessa, joille ei löydy tarkkaa analyttistä ratkaisua, käytännöllisenä lähestymistapana on tehdä **konvergenssitesti**, jossa tutkitaan verkon tihentämisen vaikutusta peräkkäisiin ratkaisuihin. Verifiointin tulee aina edeltää validointia.

Konvergenssitesti yksinkertaisessa muodossa: Lasketaan vähintään kolme ratkaisua, jotka vastaavat 1) harvaa, 2) keskitiheää ja 3) tiheää verkkoa → arvostellaan konvergenssi.

Kolmiulotteisen mallin tapauksessa tihennyksen on periaatteessa tapahduttava jokaisen kolmen dimension suunnassa → Mallin koko kasvaa nopeasti!

ESIM: Jos säännöllisen suorakaidesärmiöelementti verkon elementtien sivumitan skaalauskerroksena 0,5 jokaisessa suunnassa, niin elementtejä syntyy joka tihennyksellä $2^3 = 8$ kertaa lisää!!

* = Babuska I. ja Oden T., *V&V in computational engineering and science, Part I: Basic concepts*



3D-ruuvimallin särmiöelementit konvergenssitestissä

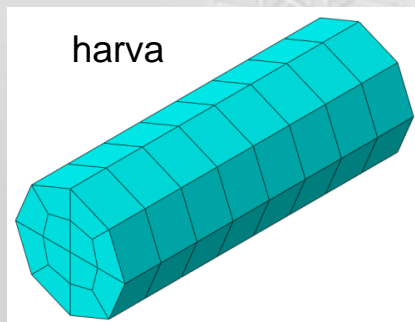
C3D8I:

- kuuluu lineaaristen 8-solmuisten elementtien perheeseen
- parannettu interpolaatio muuttujille (ei-yhteensopivat muodot)
- paloittain lineaarinen geometrian määrittely
- soveltuu kimmo-plastiseen analyysiin

C3D20R:

- kvadraattinen interpolaatio muuttujille ja geometrian määrittelyssä
- soveltuu kimmo-plastiseen analyysiin
 - ◀ redusoitu integrointi yli elementin tilavuuden, jolloin volumetrinen lukkiutumisen vaara on pieni

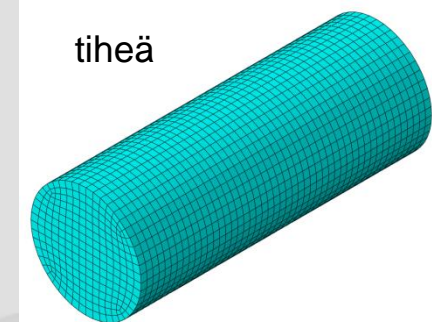
Lasketaan vedetylle (ja kuroutuvalle) sekä puhtaasti taivutetulle ruuville M20-10.9 ($R_{02} = 1057 \text{ N/mm}^2$, $E = 210 \text{ GPa}$, $n = 27,0$), jonka varren vapaa pituus $2 \cdot 3 + 2 \cdot 20.3 = 46,6 \text{ mm}$ (aluslevyt ja liitettävät levyt yhdessä) elementtimenetelmäratkaisut seuraavilla kolmella ruuvin varren elementtijaolla (eniten deformoituva osa).



$N - M_r - M_c = 8-4-8$



20-8-24

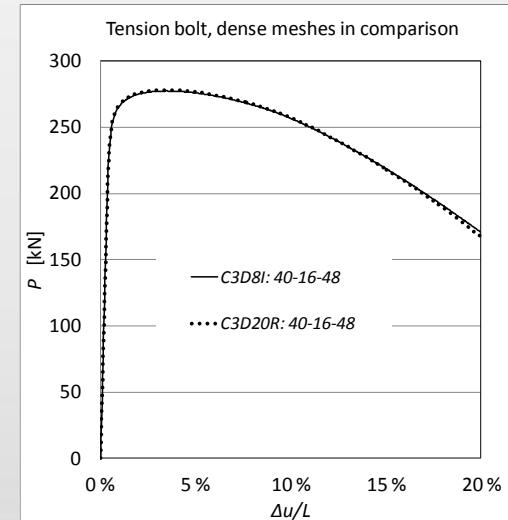
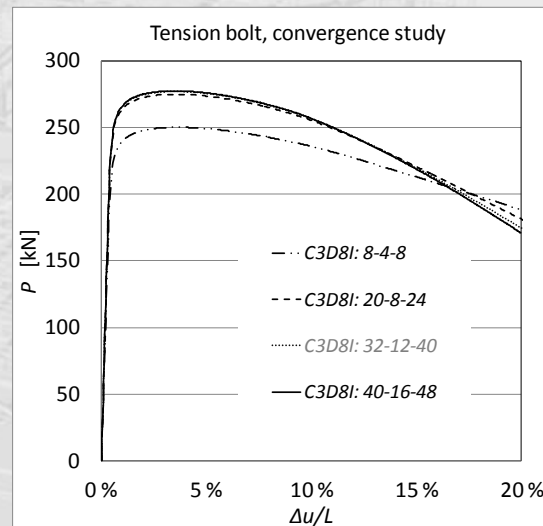
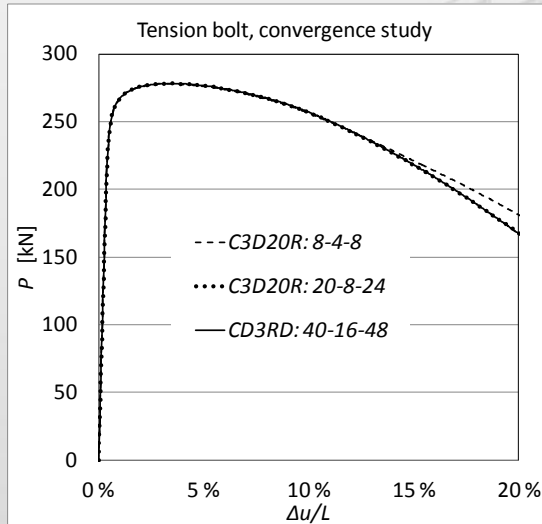
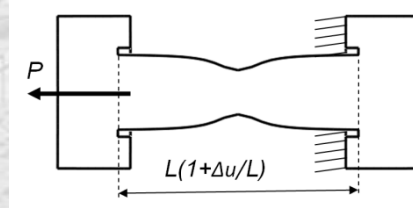


40-16-48

(N = elementtejä ruuvin vapaan varren pituudella)



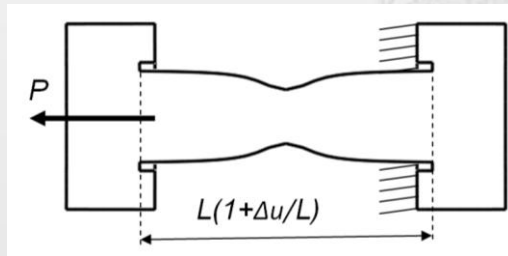
jatkoa ...



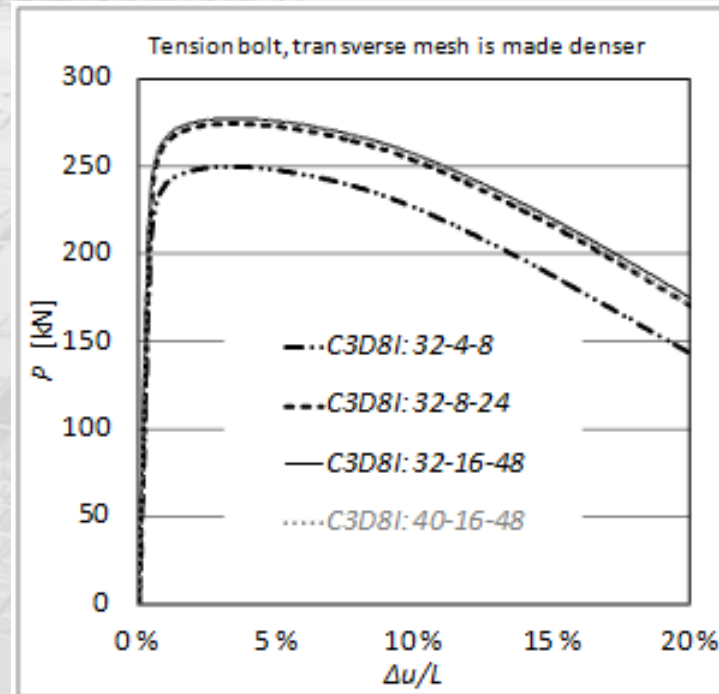
HUOM: Tiheällä verkolla 40-16-48 elementein C3D20R laskettua ratkaisua käytetään myöhemmin joissakin kaavioissa vertailukäyränä tarkan ratkaisun sijasta (ei tunneta!) . Vastaava maksimikuorman arvo $P_{ref} = 278,2\text{kN}$.



jatkoa ...



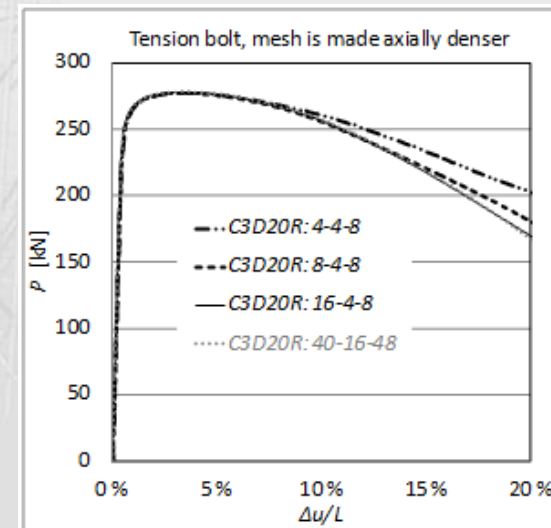
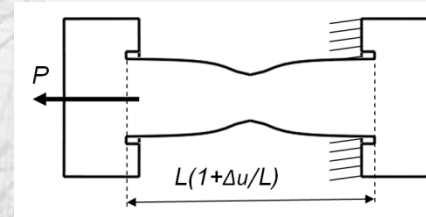
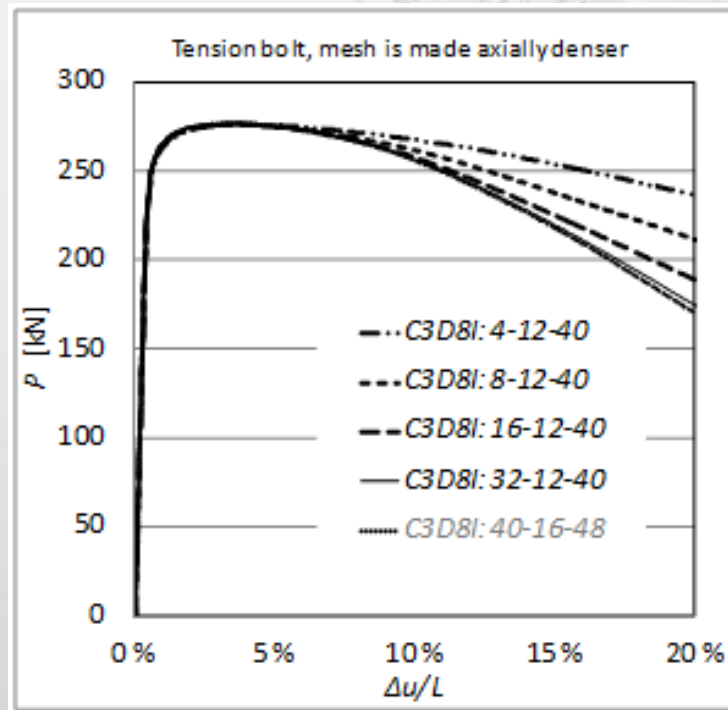
mesh	32-4-8	32-8-24	40-16-48
P_{max}/P_{ref}	0.9001	0.9885	9970
$(1-P_{max}/P_{ref})\%$	9.99	1.15	0.30
$(1-A_{lin}/A)\%$	9.97	1.14	0.29



Poikittaisen diskretoinnin aiheuttama virhe maksimikuorman arvossa on lineaaristen elementtien tapauksessa likipitään yhtä suuri kuin poikkipinta-alan virhe geometrian määrittelyssä !!



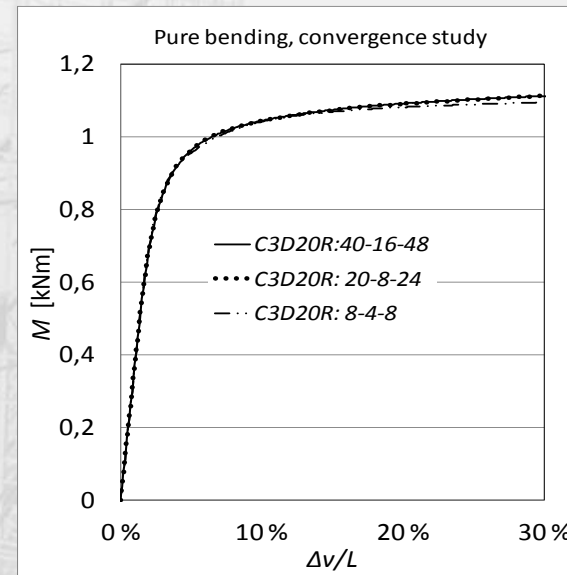
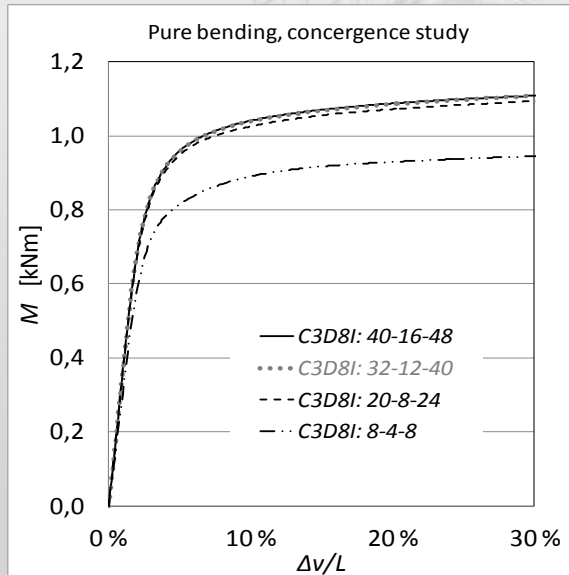
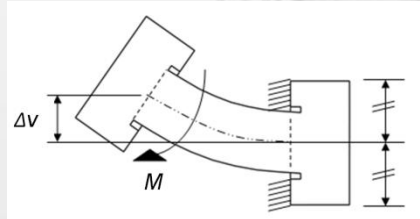
jatkoa ...



Aksiaalisen suunnan diskretoinnin aiheuttama virhe näkyy sitä selvemmin mitä pitemmälle kuroutuvan ruivin vastetta seurataan ... eli tarvittava elementtien lukumäärä N ruivin varren vapaalla pituudella riippuu periaatteessa siis siitä, mihin asti ruivin vastetta halutaan seurata.

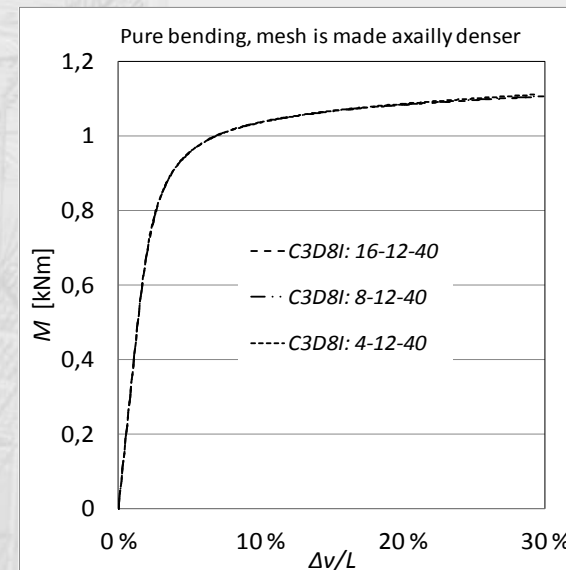
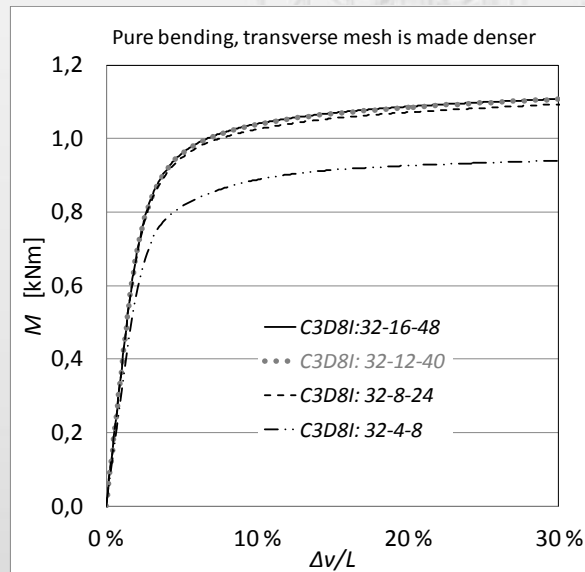
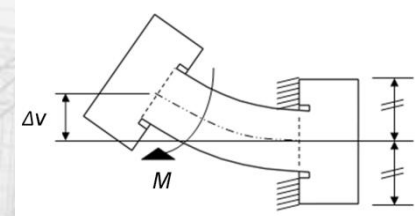


jatkoo ...





jatkoa ...



Elementtien C3D8I harva verkko poikittaissuunnassa aiheuttaa momentin aliarvioimisen ... sen sijaan harva aksiaalinen verkko toimisi hyvin!



Mallin validointi

Validation = solving the right equations!
Verification = solving the equations right!

Validoinnilla osoitetaan, että matemaattinen malli vastaa sen kuvaamaa fysikaalista mallia hyväksyttävällä tarkkuudella. Laskennallisen mallin validointia tulee aina edeltää verifiointi.

Verifioidun elementtimenetelmämallin validointi on prosessi, jossa **verrataan mallin avulla saatuja tuloksia koetuloksiin.**



Vertailu koetuloksiin

Ruuvien M20-10.9 elementtimenetelmämallissa materiaalin käyttäytyminen kuvataan Ramberg-Osgood-mallilla. Lähtötietona oli kolmelle (kokonaiselle) ruuville tehty koe, jossa määritettiin ainoastaan ruuvien kestävyys vedolle. Kolmen kokeen kesiarvona saatiin

$$P_{m,a} = 277,7 \text{ kN}$$

Tätä vastaava murtolujuus ruuvien jännityspinta-alaa ($A_s = 245 \text{ mm}^2$) kohti laskettuna on

$$R_m = 1333 \text{ N/mm}^2.$$

Otaksumalla lisäksi, että $f_{0,2} = 0.93R_m$ ja $E = 210000 \text{ N/mm}^2$ voidaan näiden ja ehdon (3) ($d\sigma_n = 0$) määrittää vastaava Ramberg-Osgoodin malli (3), jolle saadaan $n = 27,0$.

Seurataan vedetyn ruuvien vastetta elementtimenetelmämallin avulla ja määritetään maksimijännityksen arvo, joka riippuu siitä miten hyvin tai huonosti elementtimenetelmämallin avulla voidaan kuvata kuroutumisen alkaminen ruuvissa (geometriasta riippuva ilmiö!). Maksimikuormalle saadaan tiheimmän verkon avulla

$$P_{elem} = 278,2 \text{ kN}.$$

Estimaatin virhe $(P_{elem} - P_{m,a})/P_{m,a} = 0.18\%$ kokeissa havaittuun maksimikuormaan verrattuna on hyvin pieni!!

- Tässä esimerkkitapauksessa 3D-elementtimenetelmämallin voidaan estimoida ruuvien maksimikuorman arvoa erittäin tarkasti!
- Vedetyn ruuvien koko vasteen validointi edellyttäisi parempaa kokeellista vertailuaineistoa!



LOPUKSI

- Analysoijan on valittava se tarkkuus, jolla ruuvin/ruuvikiinnityksen tai -liitoksen käyttäytymistä mallinnetaan sen mukaan mikä on analyysin tavoitteiden ja kustannusten kannalta järkevää!

