

# Liimapuupilarikengän prototyypin FEM-simulointi ja verifiointi 2. sukupolven Eurokoodien mukaan

Miika Rämö

OPINNÄYTETYÖ  
Marraskuu 2025

Rakentamisen ylempi tutkinto-ohjelma (YAMK)

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Rakentamisen ylempi tutkinto-ohjelma (YAMK)

TEKIJÄ: RÄMÖ MIIKA

Liimapuupilarikengän prototyypin FEM-simulointi ja verifiointi 2. sukupolven Eurokoodien mukaan

Opinnäytetyö 102 sivua, joista liitteitä 18 sivua  
Marraskuu 2025

---

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan liimapuupilarikengän prototyypin simulointiprosessia elementtimenetelmää hyödyntävällä ohjelmistolla. Simulointi on toteutettu HAMK Techille osana HYBRITUT-hanketta, ja sen tulokset jäävät hankkeen osapuolten käyttöön. Simulointi suoritettiin SIMULIA Abaqus CAE-ohjelmistolla, ja prosessi toteutettiin pääosin Eurokoodien toisen sukupolven standardien mukaisesti. Näiden keskiössä on kokonaan uusi Eurokoodi 3, osa 14, joka oli opinnäytetyön laatimishetkellä esistandardivaiheessa nimellä prEN 1993-1-14:2023 Design Assisted by Finite Element Analysis.

Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää liimapuupilarikengän prototyypin vetokestävyys ja mahdolliset optimointimahdollisuudet pilarikengän geometriassa. Tavoitteena on myös tarkastella Eurokoodi 3:n osan 14 käytettävyyttä tämän kaltaisessa selvityksessä. Myös pilarikengän murtumistapa ja hetki selvitetään vetorasituksessa.

Opinnäytetyössä on esitetty kaikki simulointiin liittyvät parametrit ja geometria, jotta tulokset olisivat kolmannen osapuolen tarkistettavissa ja toistettavissa. Pilarikengän suuruusluokan selvittämiseksi on tehty käsinlaskennat, jotka ovat esitettyinä opinnäytetyössä.

Johtopäätöksissä todetaan, että pilarikengän lopullisen kapasiteetin määrittämiseen tulee määrittää sallittu maksimisiirtymä, jota voidaan verrata saatuihin tuloksiin. Pohdinnoissa on myös esitetty parannusehdotuksia simulointimalliin sekä itse pilarikengään. Myös työmaatoteutukseen liittyviä asennusteknisiä asioita on esitetty sekä niiden vaikutuksia pilarikengän toimivuuteen.

---

Asiasanat: elementtimenetelmä, toisen sukupolven eurokoodit, simulointi, verifiointi

## ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Master's Degree Programme in Construction Engineering

AUTHOR: MIIKA RÄMÖ

FEM simulation and verification of a glued laminated timber column shoe prototype according to the second-generation Eurocodes

Master's thesis pages 102 pages, appendices 18 pages  
November 2025

---

This thesis examines the simulation process of a glued laminated timber column shoe prototype using software based on the finite element method (FEM). The simulation was conducted for HAMK Tech as part of the HYBRITUT project, and the results remain available for the use of the project partners. The analysis was performed with SIMULIA Abaqus CAE software, following the principles of the second-generation Eurocodes. Central to these standards is the entirely new Eurocode 3, Part 14, which, at the time of this thesis, is in the pre-standard stage and titled prEN 1993-1-14:2023 - Design Assisted by Finite Element Analysis.

The main objective of the thesis is to determine the tensile strength of the glued laminated timber column shoe prototype and to identify potential opportunities for optimization. Another objective is to assess the applicability of Eurocode 3, Part 14, to this type of FEM-based structural study. The fracture mode and the moment of the column shoe under tensile stress are also examined.

The thesis presents all parameters and geometric definitions used in the simulation, enabling verification and reproducibility by third parties. Manual calculations have been performed to define the dimensions of the column shoe, and these calculations are presented for comparison.

The conclusions indicate that to determine the final capacity of the column shoe, the maximum permissible displacement must be established and compared with the obtained simulation results. The discussion also includes suggestions for improvements to both the simulation model and the column shoe itself. In addition, installation-related considerations for on-site implementation are discussed, along with their potential effects on the functionality of the column shoe.

---

Key words: Finite element method, second generation Eurocodes, simulation, verification

## TEKOÄLYN KÄYTTÖ OPINNÄYTTEESSÄ

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

- Ei
- Kyllä

Ilmoitukseni mukaan olen käyttänyt opinnäytteessäni tutkielmaprosessin aikana seuraavia tekoälysovelluksia:

Tekoälysovellusten nimet ja versiot: Tässä työssä on hyödynnetty lisensoituja ChatGPT-4o ja -5 tekoälysovelluksia.

Käyttötarkoitus: Näitä sovelluksia on käytetty tekstiasun parantamiseen ja raportin oikeinkirjoituksen tarkastukseen. Sovelluksia on käytetty myös lähdekirjallisuuden etsimisessä, kuten aiheeseen liittyvien tutkimusartikkeleiden etsimisessä.

Osiot, joissa tekoälyä on käytetty: Abstraktin muotoilu suomeksi ja englanniksi, kieliasu.

---

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien osat, joissa on hyödynnetty tekoälyä, ja hyväksyn vastuun mahdollisista eettisten ohjeiden rikkomuksista.

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	13
1.1	Tausta ja lähtökohdat.....	13
1.2	Tutkimuksen tavoitteet ja tutkimuskysymykset.....	14
1.3	Tutkimuskysymykset: .....	14
1.4	Työn rajaukset.....	15
1.5	Tutkimusmenetelmät ja käytettävä ohjelmisto.....	16
1.5.1	SIMULIA Abaqus-ohjelmisto yleisesti .....	16
1.5.2	Abaqus tokenit.....	16
1.5.3	Tutkimusmenetelmät .....	17
2	ELEMENTTIMENETELMÄ .....	18
2.1	Elementtimenetelmä lyhyesti .....	18
2.2	Elementtimenetelmän haasteet.....	20
3	ELEMENTTIMENETELMÄN KÄYTTÖÄ OHJAAVA ESISTANDARDI	21
3.1	Toisen sukupolven Eurokoodit teräsrakenteiden suunnittelussa..	21
3.2	Elementtimenetelmän käyttö 2. sukupolven Eurokoodin mukaan	22
3.3	Geometrinen malli .....	23
3.3.1	Geometrisen mallinnuksen ja diskretoinnin yleiset säännöt	23
3.3.2	Solid-elementtejä käyttävät mallit .....	23
3.3.3	Monitasoiset ja yhdistetyt mallit .....	24
3.4	Materiaalimalli .....	25
3.5	Epätarkkuudet lyhyesti .....	28
3.6	Analyysityypit .....	29
3.7	Validointi ja verifiointi.....	32
3.7.1	Verifiointi.....	33
3.7.2	Validointi.....	34
3.7.3	Mallin varmuuskerroin, $\gamma_{FE}$ .....	34
3.8	Käyttörajatilatarkastelu.....	36
3.9	Dokumentointi .....	36
4	SIMULOINNIN PERIAATTEET .....	38
4.1	Ratkaisijat: implisiittinen vs. eksplisiittinen .....	38
4.1.1	Implisiittinen (implicit) .....	38
4.1.2	Eksplisiittinen (explicit) .....	39
4.2	Elementtityypit.....	41
4.3	Sitkeän murtuman (Ductile damage) määrittäminen .....	45
5	FEM-MALLI JA MALLIIN MÄÄRITETYT PARAMETRIT .....	52
5.1	Liimapuupilarikengän mitoituksen periaatteet .....	52

5.2	Geometrinen malli .....	53
5.3	Keskinäisten vaikutuksien määrittäminen (Interactions).....	57
5.4	Elementtiverkon määrittäminen .....	59
5.5	Materiaalimallin määrittäminen.....	62
5.6	Simulointiasetusten määritykset.....	66
5.6.1	Step-moduuli .....	66
5.6.2	Laskentakustannusten hallinta .....	67
5.7	Reunaehdot (Boundary conditions).....	68
5.7.1	Tukien määrittäminen .....	68
5.7.2	Lisätukien määrittäminen.....	69
5.7.3	Kuormien määrittäminen.....	70
6	FEM-MALLIN VERIFIOINTI .....	73
6.1	Diskretointivirheen tarkastelu (a).....	73
6.2	Syöttötietojen herkkyyshanalyysi (b).....	74
6.3	Epätarkkuuksien herkkyyshanalyysi (tarvittaessa) (c).....	74
6.4	Analyttinen mitoituslaskelma (Insinöörin päätökset) (d) .....	75
6.5	Dokumentointi .....	79
7	TULOKSET JA ANALYYSI .....	81
7.1	Simuloinnin lähtötiedot, Abaqus.....	81
7.2	Simuloinnin loppu.....	83
7.3	Pilarikengän vetokestävyys simuloinnissa .....	84
7.4	Pilarikengän optimointimahdollisuudet .....	88
8	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA.....	89
8.1	Simulointiprosessi .....	89
8.2	Simuloinnin tulokset .....	90
8.3	Simuloinnin tarkentaminen.....	93
8.4	Työmaatekninen toteutus.....	95
8.5	Toisen sukupolven Eurokoodit.....	96
8.6	Jatkokehitys .....	96
8.7	Tavoitteiden saavuttaminen ja yhteenveto .....	97
	LÄHTEET.....	99
	LIITTEET .....	103
	Liite 1. Lähtötiedot. Pilarikengän geometria. (Pulkinen, 2025)	
	Liite 2. Materiaalimalli ja Abaqus lineaarinen murtoenergia	
	Liite 3. Jännityksen kolmiaksaalisuus (stress triaxiality)	
	Liite 4. Betonin puristuslujuuden laskenta-arvo EN 1992-1-1:2004 mukaan	
	Liite 5. Liimapuupilarikengän mitoituslaskelma	
	Liite 6. Pilarikengän voima-siirtymäkuvaajien vertailu eri elementtiverkolla	

Liite 7. Liimaruuviliitoksen vetokestävyyden mitoitus VTT-S-07607–12 mukaan

## LYHENTEET JA TERMIT

Abaqus CAE	(Complete Abaqus Environment) Ohjelman pääasiallinen mallinnus- ja esikäsittely- sekä perusjälkikäsittely-ympäristö. Tässä työssä käytetään yleisemmin termiä ”Abaqus”. (Dassault, 2023)
$C$	Dilataatio aallon nopeus. (O.C ym., 2005)
$\dot{D}$	Vaurion sisäisen muuttujan kehitys. (Dassault, 2023b)
Diskretointi	(Discrete) Jatkuvan tehtävän korvaaminen diskreetillä (äärellisellä) tehtävällä, jonka ratkaisun tiedetään approksimoivan jatkuvaa ongelmaa. (”Numeerinen analyysi”, 2024)
DRC	(Direct resistance check) analyysi (esim. MNA, GMNA, GMNIA), joka suoritetaan suunnittelutarkastelua varten ja jonka tuloksena saadaan analysoidun rakenteen lopullinen kantavuus. (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023)
DOF(s)	(Degree(s) of freedom) Vapausaste(et)
Sitkeä murtuminen	(Ductile damage)
$E$	Kimmomoduuli
$E_{sh}$	(strain hardening modulus) Lujittumismoduuli. kuvaa materiaalin jännityksen kasvunopeutta plastisella alueella. (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023)
Esikuormitus	(Preload) Alustava kuormitus ennen varsinaista testaus- tai käyttökuormaa. (Ottenhaus ym., 2021)
prEN	(Draft of a European Standard) Luonnosvaiheen EN-standardi ennen virallista hyväksyntää ja julkaisemista. (CEN-CENELEC, 2025)
EN	(European Standard) Eurooppalainen standardi. (CEN-CENELEC, 2025)
Epälineaarinen analyysi (Nonlinear analysis)	Sisältää joko geometrian tai materiaalin epälineaarisuutta. (Dunai ym., 2023)
GUI	(graphical user interface) Graafinen käyttöliittymä

Epätarkkuus	(Imperfection) Alkuperäinen poikkeama. Rakennegeometrian epäideaalisuus, joka vaikuttaa stabiilisuuteen. (Dunai ym., 2023)
FEA	(Finite Element Analysis) Elementtimenetelmään perustuva rakenneanalyysi. (Dunai ym., 2023)
$f_y$	Myötöraja. (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023)
$f_u$	Vetomurtolujuus. (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023)
Hauras murtuminen	(Brittle failure) Äkillinen ja ennakoimaton murtotila ilman merkittävää muodonmuutosta. (Ottenhaus ym., 2021)
$K_{el}$	(Elastic stiffness) Elastinen jäykkyys. Jäykkyys rakenteen lineaarisesti elastisella alueella. (Ottenhaus ym., 2021)
$f_h$	(Embedment strength) Upotuskestävyys. Liitoselementin (esim. pultin tai tapin) kyky siirtää puristusvoimia puuhun ilman muodonmuutosta. (Ottenhaus ym., 2021)
$G_f$	(Fracture energy) Murtumisenergia. (Veidth, 2025)
GMNA	(Geometrically nonlinear analysis) Geometrisesti ja materiaalisesti epälineaarinen analyysi. (Dunai ym., 2023)
GMNIA	(Geometrically and materially nonlinear analysis with imperfections included) Geometrisesti ja materiaalisesti epälineaarinen analyysi alkuperäisillä imperfektioilla. (Dunai ym., 2023)
GNA	(Geometrically non-linear analysis) Geometrisesti epälineaarinen analyysi. (Dunai ym., 2023)
$h$	Pienimmän tetraedrielementin korkeus solmusta sen vastakkaiseen pintaan. (ANSYS, 2025)
Jacobian suhde	(Jacobian ratio) Jacobian suhde mittaa tietyn elementin muotoa verrattuna ideaalisen elementin muotoon. (Syed, 2022)
Johansson-cook malli	(Johansson Cook model) Johnson Cookin materiaali-malli on konstitutiivinen malli. (Veidth, 2024b)
Jännityshuippu	(Stress concentration) Paikallisesti korostunut jännitys esim. liitoksen tai reunan läheisyydessä. (Dunai ym., 2023)

Konvergenssi	(Convergence) Lähentyminen. (Mot Sanakirja, 2025a) Verkkon konvergoituminen katsotaan tapahtuva, kun verkon lisätarkentaminen tuottaa merkityksettömän muutoksen ratkaisuun. (SIMULIA, n.d.b)
LA	(Linear Analysis) Lineaarinen analyysi. Olettaa pienen muodonmuutoksen ja lineaarisen materiaalimallin. (Dunai ym., 2023)
LBA	(Linear Bifurcation Analysis) Lineaarinen haarautumis-analyysi. Käytetään kriittisten nurjahdusvoimien määrittämiseen. (Dunai ym., 2023)
LH	(linear hexagon element)
LT	(Linear tetrahedron element)
Materiaalimalli	(Material model) Määrittelee materiaalin mekaanisen käyttäytymisen simulaatiossa. (Dunai ym., 2023)
MNA	(Materially non-linear analysis) Materiaalisesti epälineaarinen analyysi. Mallintaa materiaalin plastisuutta tai murtumista. (Dunai ym., 2023)
Murtotapa	(Failure mode) Tapa, jolla rakenne tai liitos epäonnistuu (esim. duktiili tai hauras). (Ottenhaus ym., 2021)
$M_{pl}$	Plastinen momentti. Momentti, jolla poikkileikkaus saavuttaa täyden plastisuuden. (Ottenhaus ym., 2021)
$p$	Hydrostaattinen paine (Hydrostatic pressure) [Pa] (Veidth, 2025)
$q$	Von Mises-ekvivalenttijännitys [Pa]. (Veidth, 2025)
QAE	Abaqus CAE:n GUI-tokeni perinteisessä lisensoinnissa. (Dassault, 2023a)
QH	(Quadratic hexahedron element) Kvadraattinen heksagonielementti, jossa on 20 solmua (C3D20R). (Benzley ym., n.d.)
QT	(Quadratic tetrahedron element) Kvadraattinen tetraedrielementti, jossa on 10 solmua (C3D10). (Benzley ym., n.d.)
r	Materiaali vakio. (Dassault, 2023b)
s	Materiaali vakio. (Dassault, 2023b)

SLS	(Serviceability Limit State) Käyttörajatila. Rakenteen toiminnallinen tila, jossa sen käyttökelpoisuus ei vaarannu. (Dunai ym., 2023))
Sitkeys	(Ductility) Rakenteen tai liitoksen kyky kestää muodonmuutosta ilman murtumista.
RQ	(System Response Quantity) Olennainen tulosarvo, jota käytetään validoinnissa ja verifiointissa. (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023)
Tilavuusviskositeetti	(Bulk viscosity) Numeerinen vaimennusmenetelmä, joka lisää tilavuusvenymänopeuteen verrannollisia (lineaarinen) ja puristuksessa sen neliöön verrannollisia (kvadraattinen) jännityksiä vaimentaen korkeataajuiset värähtelyt, levittäen iskuaallon usean elementin yli ja estäen elementtien romahtamisen. ( <i>Bulk Viscosity - an overview   ScienceDirect Topics</i> , ei pvm.)
$\bar{u}^{pl}$	(Equivalent plastic displacement) Ekvivalentin plastisen siirtymän. (Veidth, 2025)
ULS	(Ultimate Limit State) Murtorajatila. Rakenne saavuttaa kantokykynsä ääriajan. (Dunai ym., 2023)
$\nu$	Vahingoittumattoman materiaalin Poissonin luku. (Veidth, 2025)
$V$	Heksagonielementin tilavuus. (ANSYS, 2025)
Validointi	Prosessi, jolla varmistetaan mallin fyysinen vastaavuus mittauksiin tai testituloksiin. (Dunai ym., 2023)
Verifiointi	Prosessi, jolla tarkistetaan mallin matemaattinen ja laskennallinen oikeellisuus. (Dunai ym., 2023)
Vääristymiskerroin	(Warping factor) Lasketaan ja testataan joillekin nelisivuisille kuorielementeille (2D) sekä solid-elementeille (3D). (Syed, 2022)
$Y$	(Damage energy release rate) Vaurioenergian vapautumisnopeus. (Veidth, 2025)
$\Delta_T$	(Target displacement) Tavoitemuodonmuutos. Rakenteosalle suunniteltu sallittu maksimipoikkeama, esim. ULS-tilassa. (Ottenhaus ym., 2021)
$\Delta_{tcr}$	Kriittinen aika-askel.

$\gamma_{FE}$	(Model factor) Mallikerroin. Mallin epävarmuuden huomioon ottava osavarmuuskerroin. (Dunai ym., 2023)
$\dot{\gamma}$	Kertynyt plastinen venymä. (Dassault, 2023b)
$\gamma_M$	Osavarmuuskerroin. Turvallisuuskerroin, jolla otetaan huomioon materiaalin lujuusvaihtelut. (Ottenhaus ym., 2021)
$\gamma_s$	(system safety factor) Systeemivarmuuskerroin. (Mela, 2024)
$\dot{\epsilon}$	Venymänopeus (strain rate). (Veidth, 2025)
$\bar{\epsilon}_{pl}$	Ekvivalentti plastinen venymä. (Veidth, 2025)
$\epsilon_p^{init}$	Kriittinen ekvivalentti plastienn venymä (critical equivalent plastic strain). (Veidth, 2025)
$\epsilon_{sh}$	(Strain hardening strain) Lujittumisen alkamisvenymä Venymä, jossa myötäämisen jälkeen alkaa plastinen lujittuminen. (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023)
$\epsilon_u$	Murtojäännitys. (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023)
$\epsilon_y = f_y/E$	Myötövenymä. (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023)
$\epsilon_f^{pl}$	(Fracture strain) Murtovenymä. (MOT Sanakirja, 2025b)
$\sigma_{eq}$	Von Misesin ekvivalentti jännitys. (Veidth, 2025)
$\sigma_H$	Hydrostaattinen jännitys. (Veidth, 2025)
$\eta$	Jännityksen kolmiaksaalisuus (Stress triaxiality). (Veidth, 2025)
$A$	Murtovenymä, joka on määritelty kyseisessä materiaali-määrityksessä. (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023)
$C_1$	Materiaalikerroin (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023)

## 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tilaajana toimii HAMK Tech-tutkimusyksikkö ja työ toteutetaan osana Vähähiiliset rakentamisen hybridiratkaisut HYBRITUT-hanketta. Työn ohjaajana HAMK Tech:n puolelta on toiminut tutkimus- ja laboratoriopäällikkö Jarmo Havula. HAMK Tech on Hämeen ammattikorkeakoulun (HAMK) tutkimusyksikkö, joka kehittää älykkäitä teknologiaratkaisuja ja kestäviä innovaatioita erityisesti rakennetun ympäristön ja teollisuuden tarpeisiin. Yksikön profiilia leimaavat datan ja digitalisaation hyödyntäminen sekä vahvat laboratoriovalmiudet, joita käytetään muun muassa kestäväen rakentamisen tutkimukseen ja uusien teknologioiden käyttöönottoon. (HAMK Tech, n.d.)

Organisaatiotasolla HAMK Tech ja HAMK Smart yhdistyivät vuoden 2025 alussa synergian vahvistamiseksi ja päällekkäisen TKI-toiminnan vähentämiseksi. Uudistuksen myötä teknologioiden hyödyntäminen kytkeytyy entistä saumattomammin HAMK:n kolmeen tutkimusekosysteemiin (SmartBio, SmartBuilt, SmartEdu). HAMK Techissä työskentelee noin 110 asiantuntijaa osana HAMK:n noin 200 hengen tutkimustoimintaa. (Stormi, 2024)

### 1.1 Tausta ja lähtökohdat

Rakennetun ympäristön vähähiilisyyttä edistävät ratkaisut vaativat uusia, materiaaleja yhdistäviä liitostekniikoita (hybridirakenteet) ja niiden mallinnukseen perustuvaa suunnittelua. Hämeen ammattikorkeakoulun tutkimusyksikön (HAMK Tech) HYBRITUT-tutkimushankkeessa tutkitaan vähähiilisen hybridirakentamisen ratkaisuja sekä niiden ympäristövaikutuksia ja toiminnallista suorituskykyä 1.3.2023–31.12.2025 Business Finlandin rahoituksella. Hankkeessa on mukana useita yrityspartnereita, mm. Versowood. (HAMK Tech, n.d.)

Elementtimenetelmään perustuva rakenneanalyysi (Design assisted by finite element analysis) eli numeerinen mitoitus on nousemassa keskeiseksi lähestymistavaksi ohjelmistojen kehittymisen myötä, kun suunnittelu perustetaan suoraan fyysikaalisesti uskottavasti määriteltuihin malleihin ja niille asetettuihin validointi-

ja/tai verifiointivaatimuksiin. Tätä varten Eurokoodiperheeseen valmistellaan uutta osaa prEN 1993-1-14:2023, joka kokoaa FEM-perusteisen mitoituksen periaatteet ja soveltamissäännöt (ml. rajatilat, malli- ja menetelmävaatimukset sekä dokumentointi). Eurokoodi 3:n 14. osa opinnäytetyön aikana esistandardivaiheessa eikä sitä ole julkaistu opinnäytetyön aikana. (Dunai ym., 2023)

Esistandardi on valikoitunut tähän työhön, koska aikaisemmat standardit eivät ole ottaneet kantaa samalla laajuudella FEM-pohjaiseen suunnitteluun ja sen periaatteiden läpikäyminen ja tarkastelu luonnosvaiheessa uskotaan olevan tarpeellista. Tässä työssä tarkastellaan prEN 1993-1-14:2023 käytettävyyttä pilarikengän prototyypin mitoituksessa ja pohditaan sen mahdollisia haasteita. Esistandardi on luonnosvaiheen EN-standardi ennen virallista hyväksyntää ja julkaisemista, joka tulee huomioida tehtäessä tulkintoja tästä opinnäytetyöstä. (Dunai ym., 2023)

## **1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja tutkimuskysymykset**

Tämä tutkimus toteutetaan HAMK Tech:lle, osana HYBRITUT-hanketta. Tavoitteena on selvittää uudenmallisen liimapuupilarikengän prototyypin kestävyyttä ja arvioida geometrian ja materiaalin optimoinnin mahdollisuudet FEM-pohjaisesti. HAMK Tech on osallisena HYBRITUT-hankkeessa, jossa on tarkoitus tarkastella kolmea eri pilarikengän prototyyppiä, jotka ovat geometrialtaan saman tyyppisiä, mutta kooltaan ja oletettavasti kapasiteetiltaan erikokoisia. Näistä kolmesta pilarikengästä tässä työssä tarkastellaan vain pilarikengän suurimman version prototyyppiä. Pilarikengän mitoitusperiaatteet ovat vastaavat nykyisin käytössä olevan version kanssa.

## **1.3 Tutkimuskysymykset:**

Tämä opinnäytetyö pyrkii vastaamaan seuraaviin kysymyksiin:

1. Kuinka suuren vetokestävyuden uusi pilarikengägeometria saavuttaa ja mikä on sen murtomekanismi?

2. Mitä parametrisia muutoksia esimerkiksi geometria ja/tai materiaaliominaisuuksien kanssa voidaan tehdä muuttamatta murtomekanismia epäedulliseksi?
3. Miten alustavan Eurokoodin prEN1993-1-14:2023 periaatteet soveltuvat tämän kaltaiseen mitoitukseen?

#### 1.4 Työn rajaukset

Tässä työssä tarkastellaan yhtä liimapuupilarikengän prototyyppiä, jonka geometria ja materiaali on määritetty HYBRITUT-hankkeessa. Numeerinen analyysi toteutetaan ainoastaan SIMULIA Abaqus-ohjelmistolla ja kaikki mallinnus-, ratkaisu- ja tulkintamenettelyt perustuvat sen tarjoamiin ominaisuuksiin, eikä toisella vastaavalla ohjelmalla vertailua toteuteta. Laboratoriotestit rajataan työn ulkopuolelle. Niitä voidaan hyödyntää myöhemmässä vaiheessa materiaalimallin tarkentamiseen ja kalibrointiin siten, että koetulokset toimivat vertailupisteinä Abaqusmallin materiaali- ja vaurioparametreille. Laboratoriossa koekuormitetaan erillinen, geometrialtaan pienempi pilarikengä. Sen tuloksia voidaan myöhemmässä vaiheessa tulkita siinä määrin kuin mittakaava- ja rajapintavaikutukset sallivat, mutta kattavaa koesarjan analyysiä tai yksityiskohtaista testiraportointia ei tämän työn puitteissa tehdä. Pilarikengän kiinnityselementit, kuten peruspultit ja liimaruuvit, mallinnetaan osana kokonaisuutta, jotta niiden jäykkyys, siirtymävaikutus ja kuorman siirtyminen vaikuttavat liitoksen jännitys- ja muodonmuutostilaan. Näiden komponenttien kantokykyjen mitoitusta tai yksittäisten osien kapasiteettien tarkastelua ei kuitenkaan tehdä. Valmiin rakenteen juotosbetonin epälineaarista käyttäytymistä ei analysoida. Betoni huomioidaan ainoastaan laskentamallin reunaehdoissa ja tukireaktioissa, jotta pilarikengän teräsosien kuormansiirto voidaan arvioida hallitussa ja toistettavassa numeerisessa muodossa. Elementtimenetelmän (Finite element method, FEM) käyttöä teräsosien suunnittelussa ohjaa alustava toisen sukupolven Eurokoodin prEN 1993-1-14:2023 sisältö, jossa määritellään mallin validoinnin ja verifiointin periaatteet, materiaalimallin ja geometrian esittämistapa sekä dokumentoinnin vähimmäisvaatimukset, joita tarkastellaan tässä työssä. (Dunai ym., 2023)

## 1.5 Tutkimusmenetelmät ja käytettävä ohjelmisto

### 1.5.1 SIMULIA Abaqus-ohjelmisto yleisesti

Pilarikengän simulaatio mallinnetaan ja suoritetaan SIMULIA Abaqus 2023 -ohjelmistolla FEM:n käyttöä teräsrakenteiden suunnittelussa koskevan alustavan standardin (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023) mukaan. Abaqus on valikoitunut työhön sen ollessa yleisesti käytössä HAMK Tech:llä tutkimushankkeissa. Ohjelmaa käytetään myös maailmanlaajuisesti eri tutkimuksissa, joten sen on katsottu soveltuvan tähän työhön perustellusti. SIMULIA on Dassault Systèmesin FEA-pohjainen (Finite Element Analysis) simulointibrändi ja sitä voi käyttää joko erillisten tuotteiden, kuten Abaqus-ohjelman kautta tai 3DEXPERIENCE-alustan sisällä. Tässä työssä käytössä on SIMULIA Abaqus CAE. Abaqus Unified FEA -tuoteperhe tarjoaa tehokkaita ja kattavia ratkaisuja sekä rutiininomaisiin, että monimutkaisiin teknisiin ongelmiin ja se kattaa laaja-alaisesti teollisia sovelluksia. Sen sijaan, että simulointia tehtäisiin eri toimittajien erityisillä simulointityökaluilla, SIMULIA tarjoaa skaalautuvan valikoiman yhtenäisiä analyysituotteita, joiden avulla kaikki käyttäjät simulointiasiantuntemuksestaan tai toimialakohtaisesta painopisteestään riippumatta voivat tehdä yhteistyötä ja jakaa simulointitietoja ja hyväksytyjä menetelmiä saumattomasti ilman tiedon tarkkuuden menetystä. (Fidelis, 2020)

### 1.5.2 Abaqus tokenit

Abaqus käyttää lisensointia, jossa ostetaan tokeneita ja kukin ohjelman käyttötilanne varaa palvelimelta tarvittavan määrän tokeneita, niin kauan kuin GUI (graphical user interface) tai laskenta on käynnissä. Toisin sanoen, mitä enemmän yhtäaikaista Abaqus CAE-istuntoja ja mitä enemmän laskentaytimiä käytetään, sitä enemmän tokeneita tarvitaan, eikä tarve kasva lineaarisesti ytimien lukumäärän kanssa. Token-paketit voivat olla Portfolio-tyyppisiä (QPT), joissa sama token-määrä kattaa sekä graafisen käyttöliittymän että ratkaisijan ja Abaqus CAE:n ollessa auki varataan lisäksi viisi tokenia, joissa on erilliset tokenit käyttöliittymälle (QAE) ja ratkaisijalle (QAT). Extended-paketti laajentaa Portfolio-

mallia muutamiin lisäohjelmistoihin. GPU-kiihdytys vaatii lisävarauksen, joka vastaa yhtä ylimääräistä ydintä, mutta kun laskenta ylittää 12 ydintä, GPU:sta ei synny lisätöiden-kustannusta, vaikka sen suorituskykyhyöty voi olla merkittävä. Tämä malli mahdollistaa skaalautuvuuden organisaatioissa, koska sama token-pooli voidaan jakaa muiden käyttäjien kesken ja kapasiteettia lisätään joustavasti avaamalla lisää istuntoja tai ajamalla töitä useammalla ytimellä.

### 1.5.3 Tutkimusmenetelmät

Tavoitteena on toteuttaa prEN 1993-1-14:n edellyttämä verifiointi mahdollisuuksien mukaan, sisältäen diskretoinnin herkkyuden analyysin, elementtivalinnat, ratkaisijan vakauden ja dokumentoinnin. Tuloksia voidaan käyttää hyödyksi uuden pilarikengän lopullisessa suunnittelussa ja soveltaen vastaavien teräskomponenttien prEN 1993-1-14:2023 mukaisessa suunnittelussa. (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023; Dunai ym., 2023)

Tässä työssä ei suoriteta liimapuupilarikengän prototyypille omaa kokeellista laboratorikoetta. Tämä johtuu saatavilla olevan laboratorion laitekohtaisista rajoitteista sekä käytössä olevista resursseista. Tutkittavan liimapuupilarikengän oletettu vetokapasiteetti ylittää hyvin todennäköisesti koekuormitukseen tarkoitetun laitteen kapasiteetin reilusti, joten analysoidun liimapuupilarikengän koekuormitus rajataan tämän työn ulkopuolelle.

Pilarikengän optimointimahdollisuudet pohditaan ensimmäisessä vaiheessa saatujen laskentatulosten perusteella, josta selviää mahdollisesti käyttötarkoitukseen nähden liian paksut teräsosat tai muita optimointimahdollisuuksia. HAMK Tech ja hankkeen osapuolet määrittävät lopullisen käyttötarkoituksen saaduille tuloksille ja päättävät jatkotoimenpiteistä pilarikengän suhteen. Tarvittavat laskentaparametrit, asetukset ja jäljitettävyyden dokumentoidaan sekä esitetään tässä tutkimuksessa, jotta työ täyttää toistettavuuden ja läpinäkyvyyden periaatteet.

## 2 ELEMENTTIMENETELMÄ

### 2.1 Elementtimenetelmä lyhyesti

Elementtimenetelmä on numeerinen tekniikka monimutkaisten fysiikan ja tekniikan ongelmien ratkaisemiseen. Yhden suuren ja vaikean yhtälön ratkaisemisen sijaan FEM jakaa ongelman moniin pieniin, yksinkertaisiin osiin. Näitä kutsutaan elementeiksi ja ne on yhdistetty pisteillä, eli solmuilla. Tämä muuttaa alkuperäisen monimutkaisen ongelman suureksi joukoksi samanaikaisia algebrallisia yhtälöitä, jotka on paljon helpompi ratkaista tietokoneavusteisesti.

Elementtimenetelmässä ratkaistaan differentiaaliyhtälöitä numeerisella menetelmällä tietokoneavusteisesti. Elementtimenetelmässä (FEM) jatkuva rakenne diskretoidaan pieniksi elementeiksi, eli äärellisiksi elementeiksi (esim. palkki-, kuori- tai solid-elementit), joiden sisällä siirtymäkenttä approksimoidaan muoto-funktioilla. Esimerkiksi lineaarisessa ongelmassa elementtien jäykkyydsmatriisit kootaan koko järjestelmän yhtälöksi kaavalla (1)

$$[K]\{x\} = \{f\} \quad (1)$$

missä

$\{f\}$

on ulkoinen voima,

$[K]$

on elementin jäykkyydsmatriisi ja

$\{x\}$

on kunkin elementin siirtymä.

johon reunaehdot ja kuormat liitetään, minkä jälkeen ratkaistaan solmusiirtymät ja johdetaan niistä venymät ja jännitykset. (Harish, 2024; O.C ym., 2005)

Epälineaarissa ongelmassa jäykkyydsmatriisi riippuu siirtymistä  $x$ , mikä tarkoittaa, että rakenteen jäykkyys muuttuu kuormituksen tai muodonmuutoksen seurauksena. Epälineaarinen staattinen ongelma esitetty kaavassa (2). (Harish, 2024)

$$[K(x)]\{x\} = \{f\} \quad (2)$$

Koska  $[K(x)]$  riippuu tuntemattomasta muuttujasta, ongelma ratkaistaan iteratiivisesti esimerkiksi Newton–Raphson-menetelmällä. (Harish, 2024)

Dynaamisen ongelman kaava (3) kuvaa, miten rakenne käyttäytyy ajan funktiona, kun siihen kohdistuu dynaamisia kuormia. Esimerkiksi iskuja, värinää tai aaltoilua. (Harish, 2024)

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{f\} \quad (3)$$

missä

$[M]$	on massamatriisi
$[C]$	on vaimennusmatriisi
$\{\ddot{x}\}$ ja $\{\dot{x}\}$	ovat kiihtyvyydet ja nopeudet.

Taulukossa 1 on esitetty vaiheittain, miten elementtimenetelmä vaiheistetaan käytännössä. Tämä listaus on esitetty helpottamaan elementtimenetelmän käytettävyyttä.

Taulukko 1. Elementtimenetelmän prosessi. (CEA Assistant, 2025, muokattu)

Vaihe	Tehtävä	Tarkoitus
1	Diskretoi alue ja valitse elementtityypit	Jaa monimutkaiset muodot pieniksi, yksinkertaisiksi osiksi
2	Valitse $\{x\}$ -funktio (vapausasteet)	Määrittele, mitä ratkaiset (siirtymät, lämpötila jne.)
3	Määritä venymä-siirtymä- ja jännitys-venymäsuhteet	Yhdistä fysiikan lait malliin
4	Johda elementtien jäykkyydematriisit ja yhtälöt	Rakenna pieni matemaattinen malli jokaiselle elementille
5	Kokoa globaalit yhtälöt ja sovelta reunaehtoja	Luo ja rajoita koko järjestelmää
6	Ratkaise tuntemattomien vapausasteiden funktio	Etsi ensisijaisia ratkaisuja (kuten siirtymiä)
7	Laske elementtien venymät ja jännitykset	Poimi toissijaiset tulokset (jännitys, venymä jne.)
8	Analysoi ja tulkitse tuloksia	Tee päätökset tulosten perusteella

## 2.2 Elementtimenetelmän haasteet

Usein tulokseen pääsemiseen laskentamallilta vaaditaan erittäin hienojakoista elementtiverkkoa, joka vaikuttaa suoraan resursseihin kuten prosessoritehoon ja ratkaisuaikaan. Johtuen menetelmän yksinkertaistuksista se tarjoaa ainoastaan likimääräisiä vastauksia globaalisti ja tarkkoja vastauksia vain tietyissä pisteissä, jotka ovat yleensä solmuja. Jotkin yksinkertaistukset saattavat aiheuttaa erittäin monimutkaisille malleille epätarkkuuksia. Tulosten tarkkuus on myös riippuvainen verkosta, joten verkon määryksestä johtuen mallin tulokset saattavat olla epäluotettavia. Kun menetelmä on riippuvainen tietokoneohjelmiston käytöstä, saattaa periaatteet laskennan takana unohtua ja se saattaa aiheuttaa vääriä valintoja mallin parametrien määryksessä. (CEA Assistant, 2025)

### 3 ELEMENTTIMENETELMÄN KÄYTTÖÄ OHJAAVA ESISTANDARDI

#### 3.1 Toisen sukupolven Eurokoodit teräsrakenteiden suunnittelussa

Eurokoodit muodostavat eurooppalaisen rakenteidensuunnittelun standardointijärjestelmän, jonka tavoitteena on varmistaa rakenteiden turvallisuus, toiminnallisuus ja yhtenäinen suunnittelutaso eri jäsenmaissa. Ensimmäinen sukupolvi (EN 1990–1999) julkaistiin pääosin vuosien 2002–2010 aikana. Eurokoodi 3 (EN 1993) käsittelee teräsrakenteiden suunnittelua, mutta sen eri osissa ei ole aiemmin ollut kattavaa, yhtenäistä standardia FEM-avusteiseen suunnitteluun (Design Assisted by Finite Element Analysis). (Dunai ym., 2023)

Toisen sukupolven eurokoodien tavoitteena on parantaa käytettävyyttä, poistaa päällekkäisyyksiä, yhdenmukaistaa periaatteet eri materiaalien välillä ja tukea nykyaikaisten suunnittelumenetelmien, kuten elementtimenetelmän, turvallista käyttöönottoa. EN 1993-1-14:2023 Design assisted by finite element analysis on kehitetty harmonisoimaan aiemmin hajallaan eri osissa esitetyt ohjeet (esim. EN 1993-1-5, liite C ja EN 1993-1-6) sekä laajentamaan soveltamisalaa myös käsittämään väsymisen ja käyttörajatilojen tarkasteluun. (Dunai ym., 2023)

Kansallinen valinta sallitaan esistandardissa. Kansallinen valinta sisältää kansallisesti määritettyjen parametrien (Nationally Determined Parameters, NDP) arvojen valinnan. Standardin periaatteena on, että toimeenpaneva kansallinen standardi voi sisältää kansallisen liitteen, jossa esitetään kaikki kyseisessä maassa rakennusten ja siviilirakennuskohteiden suunnittelussa käytettävät kansalliset valinnat. Kun kansallista valintaa ei ole annettu, käytetään standardissa annettua oletusvalintaa. Kun kansallista valintaa ei ole tehty eikä standardissa ole annettu oletusarvoa, valinnan voi määrittää toimivaltainen viranomainen tai jollei sitä ole määritetty se voidaan sopia hankekohtaisesti asianmukaisten osapuolten kesken. (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023). Opinnäytetyön aikana ei Suomen kansallista liitettä ole saatavilla.

### 3.2 Elementtimenetelmän käyttö 2. sukupolven Eurokoodin mukaan

Elementtimenetelmän vahvuus on kyky mallintaa monimutkaista geometriaa, epälineaarisuutta kuten materiaali- ja geometrinen epälineaarisuutta, sekä paikallisia ilmiöitä, kuten lovivaikutuksia ja hitsien jännityshuippuja. Järjestelmällinen diskretointi, verkon (mesh) tiheyden herkkyytarkastelu ja sopiva elementtityyppi ovat keskeisiä tuloksen luotettavuuden kannalta. Klassiset FEM-oppaat korostavat, että laskennan konvergenssi ja virheanalyysi (esim. jäännösvirheoletus) tulee osoittaa vähintään kriittisten tulosten osalta. (O.C ym., 2005)

Toisen sukupolven Eurokoodi 3 osa 14 huomioi FEM-avusteisen mitoituksen teräsrakenteiden suunnittelussa. Uudistus kokoaa FEM-mitoituksen periaatteet yhteen dokumenttiin kuten mallinnus, epätarkkuudet (geometriset epätäydellisyydet ja jäännösjännitykset), materiaalimalli, kuormitus, analyysityypit, mallin verifiointi ja validointi, rajatilat, osavarmuuskertoimet sekä ohjelmistovaatimukset. Standardi jakaa FEM-sovellukset kahteen pääpolkuun:

1. Numeerinen suunnittelulaskelma (joko analyysi + käsin tehtävä mitoitus tai suora kantavuuden määrittäminen)
2. numeraalinen simulointi (esim. TKI-testidatan täydentämiseen).

Suora kantavuuden määrittäminen edellyttää aina epälineaarista materiaalimallia (MNA/GMNA/GMNIA). Lisäksi esitetään mallikerroin  $\gamma_{FE}$ , kun kantavuus luetaan suoraan numeerisesta mallista eikä epävarmuuksia muuten oteta huomioon. (Dunai ym., 2023)

Eurokoodien kehityksessä on käynnissä myös suoran mitoitusmenetelmän (Direct Design Method, DDM) käyttöönotto systeemitasolla (prEN 1990:n luonnosliite "Design assisted by numerical methods"). Koko järjestelmän nimelliskantavuus arvioidaan GMNIA-analyysillä (Geometrically and materially nonlinear analysis with imperfections included) ja mitoitusehto esitetään kuormituskertoimen ja systeemivarmuuskertoimen ( $\gamma_s$ ) avulla. Menetelmä edellyttää nimellismallin periaatteiden, kuten epätarkkuuksien, materiaalimallin ja liitosten mallinnuksen täsmällistä sekä luotettavuus- ja tilastoparametrien perustelua ensimmäisen kertaluvun (First-Order Reliability Method, FORM) mitoituksessa. Tämä suunta

vahvistaa FEM-avusteisen mitoituksen roolia ja kannustaa hyödyntämään epälineaarisen laskennan osaamista suunnittelussa. (Mela, 2024)

### **3.3 Geometrinen malli**

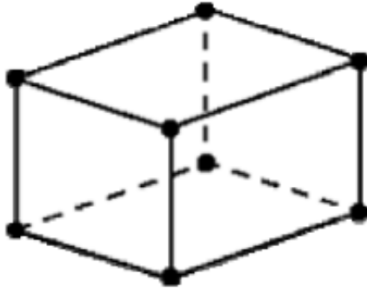
#### **3.3.1 Geometrisen mallinnuksen ja diskretoinnin yleiset säännöt**

Elementin tyypin tulee olla johdonmukainen verkon tiheyden, geometrian monimutkaisuuden ja ratkaisumenetelmän kanssa, jotta validointi- ja verifiointivaatimukset täyttyvät. Diskretoinnin tulee seurata geometrian ominaisuuksia. Hienompaa verkkoa käytetään suurten jännitys-, venymä- tai lämpötilamuutosten alueilla ja elementin laatu (muotosuhde, Jacobian suhde, vääristymiskerroin) on varmistettava. Verkon riittävyys osoitetaan verifiointilla kohdan prEN 1993-1-14, kohdan 7 mukaisesti. EN 1993-1-3 mukaan kylmämuovattujen poikkileikkausten kulmat mallinnetaan pyöristettyinä, ellei niiden vaikutus ole merkityksetön. Kylmämuovattujen rakenteiden liitosmallit validoidaan kokeilla tai verifioidaan soveltuvia suunnittelusääntöjä noudattaen. PrEN 1993-1-14 mainitsee myös, että muut elementtityypit ovat sallittuja, kunhan niiden erityispiirteet huomioidaan. Palkkirakenteiden globaali geometrisesti epälineaarinen analyysi voi yleensä perustua toisen kertaluvun teoriaan. Elementtien vapausasteiden (DOF) on oltava yhteensopivia mallin ja valittujen reunaehtojen kanssa. (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023; SFS-EN 1993-1-1:2022, 2025)

#### **3.3.2 Solid-elementtejä käyttävät mallit**

Kiinteiden kappaleiden mallintamisessa, joita kuormitetaan joko tasossa vaikuttavilla tai tasoon nähden kohtisuorilla kuormilla, voidaan käyttää taselementtejä, joissa on kaksi tai kolme vapausastetta (vain siirtymäkomponentit) kussakin solmupisteessä, kuten tasojännitys-, tasovenymä- tai aksiaalisymmetrisissä ongelmassa. Erityistä huomiota on kiinnitettävä kuormien ja tuentojen soveltamiseen, jotka on määritelty yhteensopivasti näiden kolmen vapausasteen kanssa eli taivutusmomentteja ja kiertokuormia ei voida soveltaa. Verkon tulee olla jatkuva

leikkauspisteissä, liitoksissa ja paksuusmuutoksissa, jotta jännitysten ja muodonmuutosten siirtyminen on fysikaalisesti johdonmukaista. Esimerkiksi pultit voidaan kuvata varren nimellisellä poikkileikkausalalla, mikä antaa riittävän jäykkyyden. Jos pultin varteen tai kierteisiin on tehtävä jännitystarkastuksia, niin voidaan käyttää pultin jännityspinta-alaa vastaavaa pultin halkaisijaa. Kuvassa 1 on esitetty tavallisen solid-elementin malli. (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023)



Kuva 1. Solid-elementti, 3D. (Veidth, 2024a)

### 3.3.3 Monitasoiset ja yhdistetyt mallit

Monitasoisissa ja yhdistetyissä malleissa on varmistettava, että kuormat, siirtymät ja kiertymät siirtyvät jatkuvasti malliosien rajapinnoilla. Jos eri mallinnustasot tai rakenneosat kytketään toisiinsa, niiden epäkeskisyydet on sisällytettävä malliin ja liitoksissa voidaan käyttää kosketus- tai muita rajapintaelementtejä, kunhan eri elementtien vapausasteet ja osien diskretoinnit tehdään yhteensopiviksi. Osa-malliin kohdistuvien vaikutusten tulee vastata samoja vaikutuksia, jotka kyseinen osa kokee koko rakenteen globaalimallissa. (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023)

### 3.4 Materiaalimalli

Materiaalimallien käytössä erotetaan kaksi päätarkoitusta. Kun numeerista analyysiä käytetään suunnittelulaskelman tukena, ominaisuudet otetaan nimellisarvoina. Kun analyysiä käytetään mallin validointiin, ominaisuuksien on perustuttava asiaankuuluviin materiaalikokeisiin. Teräkselle voidaan olettaa vetoon ja puristukseen sama jännitys-venymäsuhde. Esistandardissa esitetyt materiaaliparametrit koskevat alle 100 °C:n lämpötiloja. Palotilanteessa mekaaniset ominaisuudet otetaan prEN 1993-1-2:sta, eikä niitä tule yleistää muihin lämpenemisnopeuksiin tai pysyviin korkeisiin lämpötiloihin. Kun käytetään prEN 1993-1-2:n jännitys-venymäsuhteita, perusvirumista ei tarvitse mallintaa erikseen. (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023; SFS-EN 1993-1-2:2024:en, 2024)

Lineaarisesti kimmoisissa suunnittelulaskelmissa käytetään lineaarisesti kimmoisaa materiaalimallia. Epälineaariset materiaalimallit, joihin sisältyy plastisuus, soveltuvat monotoniseen kuormitukseen myöhemmin esitetyllä tavalla. Teräslajeille enintään S700, joilla on selvä myötöraja ja myötötaso, voidaan soveltaa kuvassa 2 esitettyjä malleja. Jännitys-venymäkäyriä käsitellään myöhemmin tässä luvussa. Kapasiteettianalyyseissä suositeltu myötökriteeri on von Mises, elleivät erityisolot tee sitä sopimattomaksi. Jos venymislujittuminen otetaan huomioon, tasaisessa kuormituksessa käytetään isotrooppista kovettumista. Syklistä kuormitusta varten valitaan kinemaattinen kovettuminen tai yhdistelmä. Jos analyysi liittyy poikkileikkauksen supistumiseen, voidaan käyttää todellisen jännityksen (true stress) ja todellisen venymän (true strain) kuvaajaa tasavenymään asti nelilineaarisesta mallista (Kuva 2, kohta C) tai muuntaa mitattu jännitys-venymäkuvaaja kaavojen (4,5) mukaan. (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023)

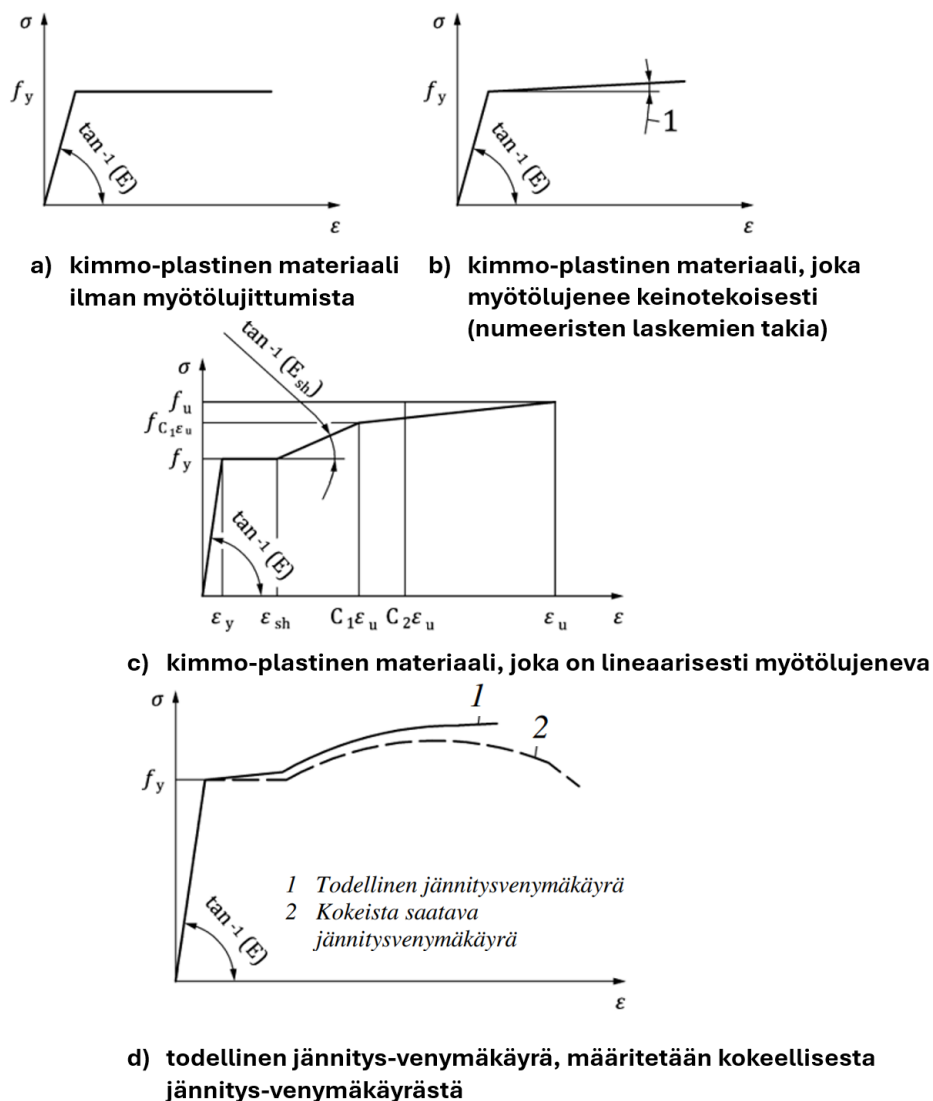
$$\sigma_{\text{true}} = \sigma \cdot (1 + \varepsilon) \quad (4)$$

$$\varepsilon_{\text{true}} = \ln(1 + \varepsilon) \quad (5)$$

Kimmomoduuli ja Poissonin luku voidaan olettaa EN 1993-1-1:2022 ja EN 1993-1-4:2025 mukaisesti. Testituloksia mallinnettaessa voidaan käyttää mitattua kimmomoduulia. Jos elastinen nurjahdus on rakenteelle kriittinen, voidaan harkita pienennettyä moduulia. Poissonin luku voi lähestyä arvoa 0,5 plastisoitumisen

myötä. GMNIA-kokeissa (Geometrically and materially non-linear analysis with imperfections) kimmomoduuli voidaan olettaa kuten edellä, ellei elastinen epäva-  
kaus hallitse. Tällöin voidaan käyttää pienennettyjä arvoja  $200\,000\text{ N/mm}^2$  hiilite-  
räkselle ja  $191\,000\text{ N/mm}^2$  ruostumattomalle teräkselle. (CEN-prEN 1993-1-  
14:2023, 2023; SFS-EN 1993-1-1:2022, 2025; SFS-EN 1993-1-4:2025:en, 2025)

Materiaalimalli valitaan analyysin tavoitteen, tarkkuuden ja sallittujen venymien  
mukaan. Kuvassa 2 on esitetty materiaalimallin valintavaihtoehdot prEN 1993-1-  
14:2023 mukaan.



Kuva 2. Materiaalimallin valinta. (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023, muokattu)

a) Kimmo-plastinen materiaali ilman myötölujittumista.

- b) Kimmo-plastinen materiaali, joka myötölujenee keinotekoisesti (numeeristen laskemien takia)
- c) Kimmo-plastinen materiaali, joka on lineaarisesti myötölujeneva, nelilineaarinen malli (quad-linear)
- d) Todellinen jännitys-venymäkäyrä, määritetään kokeellisesta jännitys-venymäkäyrästä. (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023; SFS-EN 1993-1-5:2006, 2006)

Tässä opinnäytetyössä käytetty nelilineaarinen materiaalmalli (Kuva 2, kohta c) lasketaan kaavoilla (6, 7, 8, 9, 10, 11).

$$\sigma_{(\varepsilon)} = \begin{cases} E_{\varepsilon} & \text{for } \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ f_y & \text{for } \varepsilon_y < \varepsilon \leq \varepsilon_{sh} \\ f_y + E_{sh} (\varepsilon - \varepsilon_{sh}) & \text{for } \varepsilon_{sh} < \varepsilon \leq C_1 \varepsilon_u \\ f_{C_1 \varepsilon_u} + \frac{f_u - f_{C_1 \varepsilon_u}}{\varepsilon_u - C_1 \varepsilon_u} (\varepsilon - C_1 \varepsilon_u) & \text{for } C_1 \varepsilon_u < \varepsilon \leq \varepsilon_{sh} \end{cases} \quad (6)$$

missä

$f_y$	on myötöraja
$\varepsilon_y = f_y/E$	on myötövenymä
$f_u$	on vetomurtolujuus
$\varepsilon_{sh}$	on lujittumisen alkamisvenymä

$$\varepsilon_{sh} = 0,1 \frac{f_y}{f_u} - 0,055 \text{ mutta } 0,015 \leq \varepsilon_{sh} \leq 0,03 \quad (7)$$

$\varepsilon_u$  murtojännitys

$$\varepsilon_u = 0,6(1 - \frac{f_y}{f_u}) \text{ mutta } 0,06 \leq \varepsilon_u \leq A \quad (8)$$

missä

$A$	on murtovenymä, joka on määritetty kyseisessä materiaalmäärityksessä.
$C_1$	on materiaalikerroin.

$$C_1 = \frac{\varepsilon_{sh} + 0,25(\varepsilon_u - \varepsilon_{sh})}{\varepsilon_u} \quad (9)$$

$E_{sh}$  on lujittumismoduuli.

$$E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{C_2 \varepsilon_u - \varepsilon_{sh}} \quad (10)$$

$C_2$  on materiaalikerroin

$$C_2 = \frac{\varepsilon_{sh} + 0,4(\varepsilon_u - \varepsilon_{sh})}{\varepsilon_u} \quad (11)$$

Materiaalimallit koskevat standardin EN 1993-1-1:2022 taulukoiden 5.1 ja 5.2 sekä seuraavien tuotestandardien mukaisia materiaaleja: EN 10025 -sarja, EN 10149 -sarja ja EN 10210 -sarja. Jos käytetään standardin EN 1993-1-1:2022 taulukon 5.1 mukaista materiaalimallia, yksiaksiaalisessa vetokokeessa tulee käyttää vain sitä osaa jännitys-venymäkäyrästä, joka on ennen suurinta suunnittelujännitystä. (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023; SFS-EN 1993-1-1:2022, 2025)

### 3.5 Epätarkkuudet lyhyesti

PrEN1993-1-14:2023 ohjeistaa, että jos epätarkkuuksia sisällytetään elementtimalliin, niiden tulisi ottaa huomioon geometrinen poikkeamien vaikutukset täydellisestä muodosta, jäännösjännitysten ja reunaehtojen virheiden vaikutukset. Jos epälineaarissa analyysissä käytetään geometrisia tai ekvivalentteja geometrisia epätarkkuuksia, tulee käyttää kutakin tutkittua nurjahdustapaa vastaavia epätarkkuuksia. Geometriset epätarkkuudet voidaan valita ottaen huomioon valmistus- ja asennusprosessit sekä niihin liittyvät valmistus- ja asennustoleranssit. (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023)

Poikkileikkauksien epätarkkuuksille ja rakenneosien epätarkkuuksille voidaan käyttää 80 % standardissa EN 1090-2 annetuista geometrisista valmistustoleransseista (vähintään L/1000), ellei kansallisessa liitteessä anneta erilaisia arvoja. Hitsattujen rakenteiden osalta vetojännityksen huippuarvo voidaan

ottaa yhtä suureksi kuin materiaalin myötölujuus teräslajeilla S235–S700. Puristusjäännösjännityksen huippuarvo riippuu valmistusprosessista ja poikkileikkauksen geometriasta. (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023)

### 3.6 Analyysityypit

PrEN 1993-1-14:2023 luokittelee analyysityypit sen mukaan, mitä epälineaarisuuden lähteitä on mallissa ja onko lähtögeometria täydellinen (perfect) vai onko siinä epätarkkuuksia (imperfect). Epälineaarisuuden lähteitä ovat geometrinen epälineaarisuus (GNA, suuret siirtymät/venymät), materiaalin epälineaarisuus (MNA, myötääminen, kovettuminen) ja topologinen epälineaarisuus (kontaktitilan muuttuminen). Lineaarinen analyysi on sallittu vain, jos yksikään näistä ei ole olennainen eikä niitä tarvita mitoitustarkasteluun. Muuten käytetään epälineaarista analyysiä. Lineaarisessa analyysissä pätee superpositioperiaate eikä kuormitushistorialla ole merkitystä. Epälineaarisessa analyysissä superpositio ei päde ja kukin kuormitusyhdistelmä analysoidaan erikseen. (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023)

Alla on esitetty toisen sukupolven eurokoodin prEN 1993-1-14:2023 mukaan analyysityypit tiivistetysti lueteltuna. Lyhenteen perässä oleva numero sulkujen sisällä (x) viittaa kuvaan 3, jossa analyysityypit ja niiden odotetut tulokset on esitetty graafisesti. Analyysityyppi valitaan rajatilakriteerin ja tarkasteltavien ilmiöiden perusteella. Analyysityypit on esitetty tiivistetysti taulukossa 2 lukemisen helpottamiseksi.

**LA (1)** – (Linear elastic analysis) Ennustaa rakenteen käyttäytymistä pienten siirtymien ja venymien sekä lineaarisesti elastisen materiaalin perusteella, jotka liittyvät mallinnetun rakenteen ideaaligeometriaan. (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023)

**LBA (2)** – (Linear bifurcation (eigenvalue) analysis) Ennustaa rakenteen ominaisarvot ja ominaismuodot, joilla rakenne voi vääntyä eri muotoihin olettaen, ettei

geometriassa ole tapahtunut muutosta ennen haarautumista. Analyysi antaa rakenteen elastisen kriittisen bifurkaatiokuorman, joka määritellään  $R_{cr}$ :llä. Epätarkkuudet jätetään huomioimatta. (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023)

**MNA** (5) – (Materially non-linear analysis) Materiaalinen epälineaarisuus (esim. elastisplastinen), pienet siirtymät ja/tai venymät, ideaaligeometria. Tuottaa plastisen kapasiteetin  $R_{MNA}$  viitekuormaa varten suositellaan elastista täysplastista mallia ilman lujittumismoduulia. (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023)

**GNA** (3) – (Geometrically non-linear analysis) Toisen kertaluvun vaikutukset (suuret siirtymät), lineaarinen elastinen materiaali, ideaaligeometria. Voidaan käyttää määrittämään sisäiset voimat ja jännitykset, kun geometrian muutos vaikuttaa. (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023)

**GMNA** – (Geometrically and materially non-linear analysis) Menetelmä yhdistää GNA- ja MNA-analyysien ominaisuudet. Se perustuu ideaaligeometriaan ja huomioi sekä materiaalisen että geometrisen epälineaarisuuden. Antaa kapasiteetin  $R_{GMNA}$  ilman epätarkkuutta. (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023)

**GNIA** (4) – (Geometrically non-linear elastic analysis with imperfections) Elastinen materiaali, geometrinen epälineaarisuus sisältäen epäkeskisyydet/epätarkkuudet (geometriset poikkeamat, tukiehtopoikkeamat, jäännösjännitysten vaikutukset). Tuottaa sisäiset voimat ja jännitykset epätarkkuudet huomioiden laskennassa. (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023)

**GMNIA** (6) – (Geometrically and materially non-linear analysis with imperfections) täysin epälineaarinen analyysi, jossa rakenteen epätarkkuudet on huomioitu. Menetelmä ottaa huomioon sekä materiaalisen että geometrisen epälineaarisuuden sekä alkuperäiset epätäydellisyydet. Käytetään rakenteen karakteristisen kestävyuden  $R_{GMNIA}$  määrittämiseen tilanteissa, joissa nurjahdus, myötö ja epätarkkuudet vaikuttavat samanaikaisesti. (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023)

Standardia tukeva katsaus korostaa, että suoraa kestävyystarkistusta varten on aina käytettävä materiaalista epälineaarisuutta sisältävää analyysiä (MNA,

GMNA tai GMNIA), kun taas pelkät kestävyysarvot (esim.  $R_{cr}$ , siirtymät, jännitykset) voidaan hankkia LA/LBA/GNA/GNIA-analyyseillä. (Dunai ym., 2023)

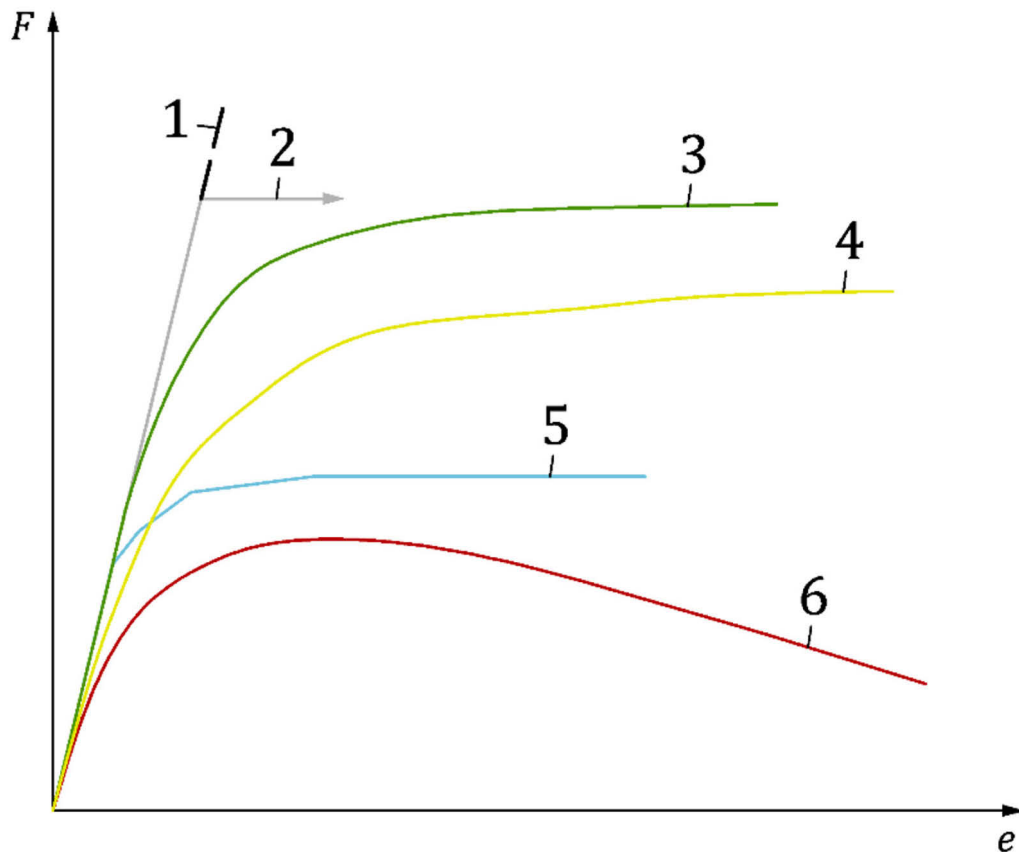
Taulukko 2. Analyysityypit. (CEN prEN 1993-1-14, 2023, muokattu)

Analyysin tyyppi	Deformaatiot	Materiaalilaki	Geometria
Lineaarinen elastinen analyysi [LA, (1)]	lineaarinen	lineaarinen elastinen	täydellinen
Lineaarinen haarautumisanalyysi (ominaisarvo) [LBA, (2)]	haarautuminen	lineaarinen elastinen	täydellinen
Materiaaliltaan epälineaarinen analyysi [MNA, (5)]	lineaarinen	elastisplastinen	täydellinen
Geometrialtaan epälineaarinen analyysi [GNA, (3)]	epälineaarinen	lineaarinen elastinen	täydellinen
Geometrialtaan ja materiaaliltaan epälineaarinen analyysi [GMNA]	epälineaarinen	epälineaarinen	täydellinen
Geometrialtaan epälineaarinen elastinen analyysi epätarkkuuksilla [GNIA, (4)]	epälineaarinen	lineaarinen elastinen	epätarkkuudet
Geometrialtaan ja materiaaliltaan epälineaarinen analyysi epätarkkuuksilla [GMNIA, (6)]	epälineaarinen	epälineaarinen	epätarkkuudet

Analyysityyppi valitaan rajatilakriteerin ja tarkasteltavien ilmiöiden perusteella (ks. Taulukko 2). Jos rakenteen käyttäytymistä määräävät nurjahdus ja epätarkkuudet, GNIA- tai GMNIA-analyysi on perusteltu. Jos plastinen kantokyky on määräävä ilman merkittäviä toisen kertaluvun vaikutuksia, MNA-analyysi on riittävä. Rakenteen elastinen käyttäytyminen arvioidaan LBA-analyysin avulla, ja sen jälkeen lopullinen vastus varmistetaan tarvittaessa epälineaarilla GMNIA-analyysillä. (Dunai ym., 2023)

Standardi prEN 1993-1-14 ohjeistaa kaksi vaihtoehtoista toimintatapaa:

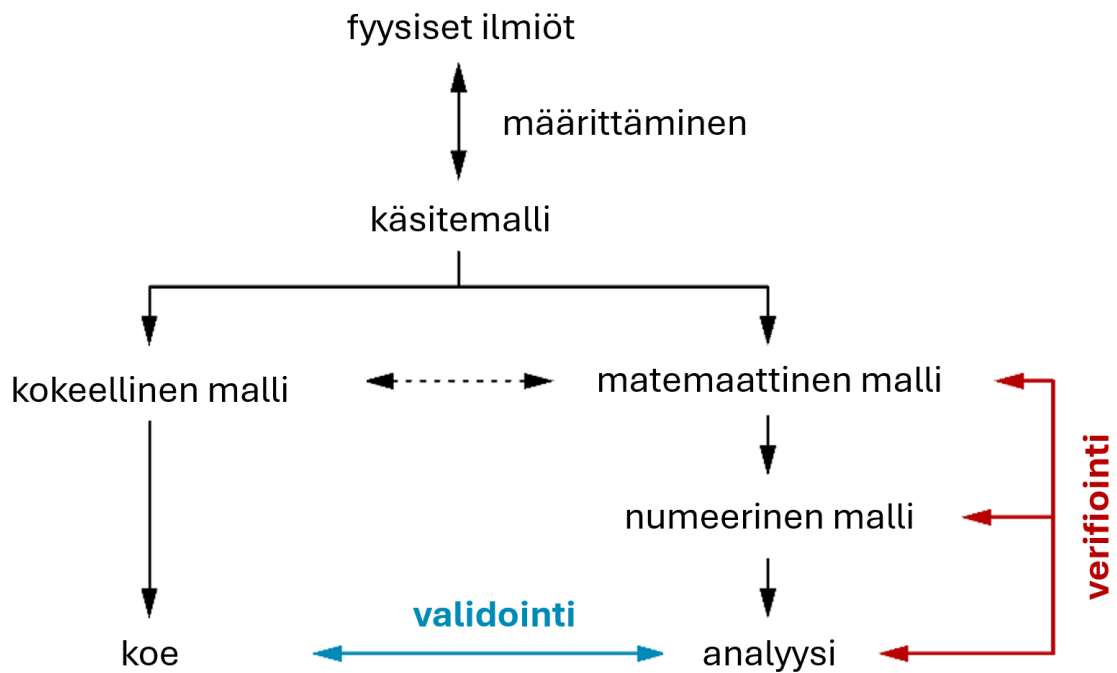
1. Numeerinen suunnittelulaskenta, jossa FEM-mallista saadaan vasteet ja tehdään standardin mukaiset tarkastukset (LA, LBA, GNA, GNIA, MNA).
2. Suora kestävyystarkistus, jossa rakenteen lopullinen kantokyky määritetään suoraan epälineaarisen analyysin tuloksista (MNA, GMNA tai GMNIA). (Dunai ym., 2023)



Kuva 3. Eri analyysityypit graafisesti esitettynä. (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023)

### 3.7 Validointi ja verifiointi

PrEN 1993-1-14:2023 määrittelee verifiointin ja validoinnin kaksivaiheiseksi prosessiksi, jonka tarkoitus on osoittaa, että numeerinen malli on tarkoitukseen soveltuva. Verifiointi varmistaa, että numeerinen ratkaisu approksimoi matemaattista mallia riittävällä tarkkuudella ja että mallia sekä analyysimenetelmää käytetään oikein. Validointi on tulosten vertailua tarkkoihin analyttisiin/numeerisiin referensseihin tai kokeisiin, jotta voidaan osoittaa mallin kuvaavan tarkasteltavaa ilmiötä fysikaalisesti oikein tai konservatiivisesti. Prosessit voivat osin limittyä, mutta lähtökohta on, että ensin verifioidaan (mallin tarkkuus, diskretointi, analyysitapa) ja vasta sen jälkeen validoidaan ilmiökohtaisesti. Kuvassa 4 on havainnollistettu validointi- ja verifiointiprosessin etenemistä. (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023; Dunai ym., 2023)



Kuva 4. Validointi- ja verifiointiprosessin tulkinta. (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023, muokattu)

### 3.7.1 Verifiointi

Verifiointi prEN 1993-1-14:2023 mukaan, kattaa vähintään seuraavat tarkastukset:

- a) **Diskretointivirheen tarkastelu**, joka sisältää verkon herkkyystarkastelun, valittujen vastesuureiden (system response quantity, SRQ) suhteen, Konvergenssi tarkastelu (convergence study) tulisi tehdä tarkistettaessa, että lähestyykö SRQ-arvo, kun verkkoa tihennetään.
- b) **Syöttötietojen herkkyyshanalyysin** eli mitkä parametrit hallitsevat SRQ:ta ja kuinka tarkasti ne on määritettävä. Syöttöparametreihin tehdään pieniä muutoksia, määrittää, mitkä tiedot ovat ratkaisevia vaaditun SRQ:n kannalta. Täytyy myös osoittaa, että onko tämä tieto määriteltävä suuremalla tarkkuudella vai ei. Tämä tarkistus tulisi tehdä vain malleille ja syöttötiedoille, joista ei ole aiempaa kokemusta tai mahdollinen herkkyys on noussut esiin.

- c) **Epätarkkuuksien herkkyyshanalyysin.** Tämä tarkistus tulisi suorittaa numeeristen simulaatioiden ja numeeristen suunnittelulaskelmien tapauksessa, jos epätarkkuuksien herkkyys on olennaista. (Suoritetaan tarvittaessa).
- d) Sekä ”**insinöörin päätökset**” (engineering judgement), joka käsittää muodonmuutokset, voima-siirtymäkuvaajat, sisäiset voimakuvaajat ja niiden uskottavuuden tarkastelun.

Konvergenssin lähestyminen osoitetaan verkkoa hienontamalla tai elementtijärjestystä nostamalla ja todentamalla, ettei SRQ ole merkittävästi riippuvainen diskretoinnista. Nämä säännöt eivät koske väsymistä. (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023)

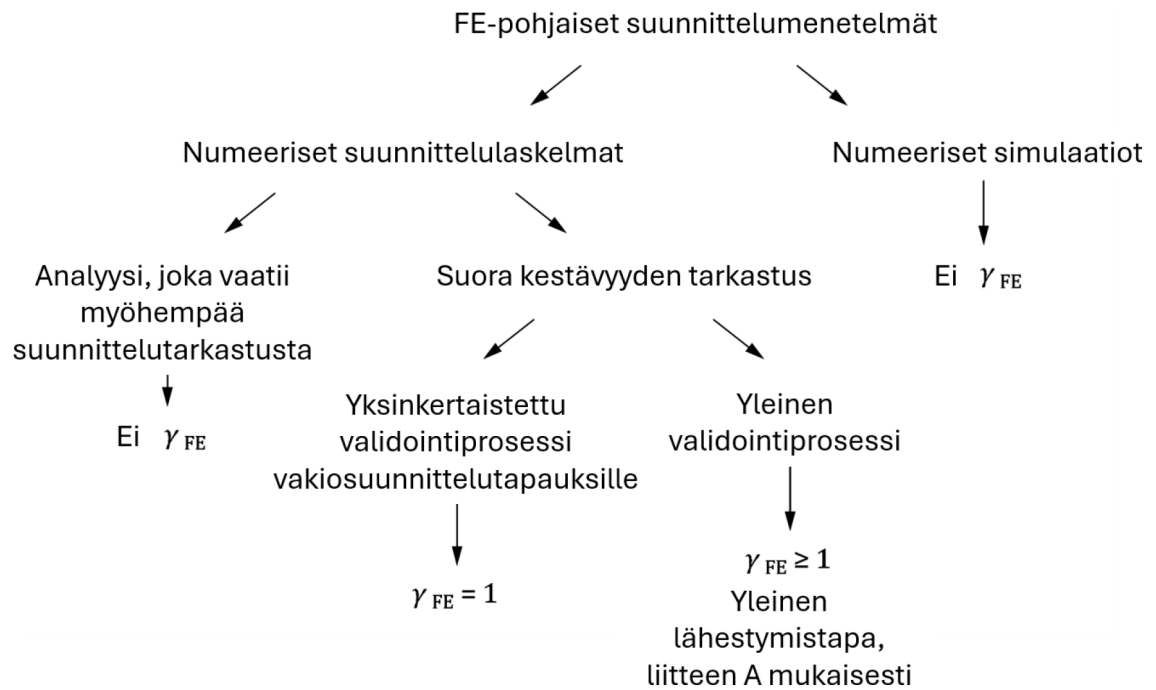
### 3.7.2 Validointi

Validoinnissa rakennetaan laboratorioskoe eli vertailutapaus (benchmark). Vertailun yhteydessä tulee kehittää ja laskea numeerinen malli (FEM-malli), jolla on identtiset parametrit vertailutapauksen kanssa. Erot arvioidaan ilmiöittäin (esim. paikallinen plastisoituminen, stabiilius, kontaktin käyttäytyminen). Korkein validointitaso saavutetaan, kun sekä syötöt, että tulokset käsitellään satunnaisina muuttujina (stochastic variables) ja epävarmuuksia mallinnetaan tilastollisesti (toistettavat laskennat jakaumaoletuksin). Jos tällaista ei tehdä, mallin epävarmuus voidaan kattaa mallitekijällä  $\gamma_{FE}$  esistandardin liitteen mukaisesti. Tämä käsitellään luvussa 3.7.3. (prEN 1993-1-14, 2023; Dunai et al., 2023.)

### 3.7.3 Mallin varmuuskerroin, $\gamma_{FE}$

Jos FE-mallia käytetään suoraan kestävyuden tarkistukseen (DRC), suunnittelun epävarmuus katetaan yhdistämällä Eurokoodien osavarmuuskertoimet ja mallitekijä  $\gamma_{FE}$ . Sen sijaan, jos FEA-mallia käytetään numeeriseen suunnittelulaskentaan siten, että varsinaiset mitoitustarkistukset tehdään erillisten kaavojen mukaan (eli FEM-laskenta tuottaa vain sisäisiä voimia/rasituksia),  $\gamma_{FE}$ :tä ei sovelleta,

vaan epävarmuudet katetaan EN 1990 ja EN 1993 -sarjan osavarmuuksilla. Lisäksi väsymistilanteessa ja MNA-analyysin plastisen viitekuorman määrittämisessä  $\gamma_{FE}$ :tä ei käytetä. Samoin jos suoritetaan EN 1990:n mukainen testipohjainen tilastollinen arviointi, numeerinen simulointi käsitellään kuten koe, eikä  $\gamma_{FE}$  sovelleta. Mallikertoimen soveltamistapa on esitetty kuvassa 5. (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023; Dunai ym., 2023)



Kuva 5. Laskentamallikertoimen ( $\gamma_{FE}$ ) soveltaminen. (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023, muokattu)

Standardi sallii käytännön suunnittelussa kokemuseräisen validoinnin silloin, kun kyse on toistuvista, suunnittelunäkökulmasta samankaltaisista malleista (standard design case). Esimerkiksi jos malleilla on sama hallitseva murtotapa ja samankaltainen verkko ja/tai mallinnus on yhtenäinen. Tällöin malli voidaan validoida ensimmäisellä käyttökerralla ja katsoa edelleen validoiduksi vakio- tai muotoilun suunnittelutapauskontekstissa. (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023) Poikkeuksista säädetään kansallisissa liitteissä (NDP-valinnat). (Dunai ym., 2023)

### 3.8 Käyttörajatilatarkastelu

Käyttörajatilassa numeerista mallia voidaan käyttää kaikkien EN 1990:n ja EN 1993:n mukaisten käyttörajatilakriteerien tarkistamiseen, kunhan mallinnus noudattaa EN 1990:n yleisiä suunnittelusääntöjä. Geometria otetaan nimellisarvoina, jotta rakenteen jännitykset, muodonmuutokset sekä värähtelyt tai ominaistajuudet ennustetaan johdonmukaisesti. Poikkileikkausominaisuuksissa käytetään EN 1993:n mukaisesti, joko täydellisiä tai tehokkaita arvoja sen mukaan, mikä on rakenteen luokan ja paikallisen lommahduksen kannalta tarkoituksenmukaista. (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023)

Käyttörajatilassa voidaan hyödyntää samoja analyysityyppejä kuin murtorajatilan tarkastuksissa. Jännitykset ja muodonmuutokset lasketaan lähtökohtaisesti lineaarisesti kimmoisella käyttäytymisellä käyttäen LA-, GNA- tai GNIA-analyysiä, ottaen huomioon Eurokoodi 3:n muissa osissa määritellyt lisäsäännöt. Jos materiaalin epälineaarisuus ja voimien tai momenttien plastinen uudelleenjakautuminen voivat aktivoitua käyttörajatilan kuormatasolla, ne tulee sisällyttää analyysiin standardin ohjeiden mukaisesti. Mikäli liitosten liukuminen on otettava huomioon, numeeriseen malliin määritetään tätä varten sopivat liitoselementit, rajoitteet tai keskinäiset vaikutukset, jotta käyttökelpoisuusvaatimukset voidaan arvioida realistisesti. (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023)

### 3.9 Dokumentointi

Esistandardissa (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023) ohjeistetaan, että kaikkien FEM-analyysien dokumentaation tulee sisältää kaikki mallinnetun geometrian, oletusten, valittujen analyysien ja mallinnusvaiheiden olennaiset yksityiskohdat. Sen tulee sisältää kaikki lähtötiedot sekä tulostiedot dokumentoituna siten, että laskelmat ovat kolmansien osapuolten toistettavissa.

Seuraavassa on lueteltuna mitä esistandardissa (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023) on esitetty elementtimallin, analyysin ja suunnittelun dokumentaation sisältöksi:

- a) valitun elementtimallin nimi ja versio,
- b) geometrinen malli (elementtimallin geometria, elementtityyppi, elementti-verkko, epäkeskisyydet jne.),
- c) materiaalmalli (lineaarinen tai epälineaarinen, ominaisuudet ja tunnusluvut),
- d) tuki- ja kuormamalli (reunaehdot, määrättyt siirtymät, kuormat yhdistelmiin),
- e) epäkeskisyydet (geometriset epäkeskisyydet ja jäännösjännitykset, jos sovellettavissa),
- f) analyysityyppi ja konvergenssikriteerit (jos sovellettavissa),
- g) murtumiskriteerit,
- h) mallin validoinnin ja todentamisen tulokset (jos sovellettavissa),
- i) analyysin tulokset (sisäiset voimat, jännitys jakaumat, siirtymät, muodonmuutokset, rajakuormat, haarautumispisteet, ominaisarvot, nurjahdusmuodot, jos sovellettavissa),
- j) tarkastettavat rajatilakriteerit (staattisen tarkastuksen perusteet).

## 4 SIMULOINNIN PERIAATTEET

### 4.1 Ratkaisijat: implisiittinen vs. eksplisiittinen

Elementtimenetelmän ratkaisuisissa on kaksi päämenetelmää, implisiittinen ja eksplisiittinen. Implisiittinen menetelmä ratkaisee jokaisessa kuorma- tai aikainkrementissä tasapainon iteroiden (esim. Newton–Raphson) ja voi siksi käyttää suurempia aika- ja kuormainkrementtejä. Eksplisiittinen menetelmä taas etenee ilman globaalia iterointia ehdollisesti stabiililla keskitetyn erotuksen integraatiolla, jolloin yksittäinen askel on vähemmän kuormittava, mutta stabiiliuden takia inkrementit ovat hyvin pieniä ja määrä voi olla suuri. Valinta vaikuttaa suoraan konvergenssin hallintaan, analyysin keston, kontaktien käsittelyyn ja siihen, milloin dynaamiset vaikutukset on huomioitava. (Harish, 2024)

#### 4.1.1 Implisiittinen (implicit)

Implisiittisessä menetelmässä tasapaino ratkaistaan joka kuorma- tai aika-askeleessa iteratiivisesti (tyypillisesti Newton–Raphsonin muunnelmilla) ja muodostetaan (tai arvioidaan) tangenttijäykkyys, lasketaan siirtymät, tarkistetaan jäännösvoimat ja toistetaan, kunnes konvergenssikriteerit täyttyvät. Menetelmä on siksi vakaa suuremmilla askelpituuksilla ja askelkoko määräytyy pääosin konvergenssista eikä aallonopeuden määräämästä stabiilisuusehdosta. Tämä sopii erityisen hyvin kvasistaattisiin ja maltillisen epälineaarisiin tehtäviin. Toisaalta vahvasti epälineaariset kontaktit tai epästabiilit vaiheet voivat vaatia pieniä askeleita tai erityisiä menetelmiä. (Harish, 2024)

Dynaamisessa implisiittisessä analyysissä käytetään tavallisesti Newmarkin integraattoria tai Hilber–Hughes–Taylor (HHT- $\alpha$ ) -menetelmää. Newmark antaa perustan implisiittiselle aikaintegroinnille, kun taas HHT- $\alpha$  lisää hallittua numeerista energian hajoamista korkeataajuuksien värähtelyjen vaimentamiseksi. Nämä integraattorit voivat olla parametreista riippuen ehdottoman stabiileja, joten aikaaskel voidaan valita suuremmaksi kuin eksplisiittisessä menetelmässä, kunhan konvergenssi säilyy. (SIMULIA, n.d.c)

**Menetelmän vahvuuksia ovat:**

- tehokkuus pitkissä, hitaissa prosesseissa,
- hyvä soveltuvuus toisen kertaluvun vaikutuksiin ja vakausanalyyzeihin,
- mahdollisuus suodattaa ei-fysikaalisia korkeataajuisia komponentteja (HHT- $\alpha$ ).

**Rajoitteita ovat:**

- mahdolliset konvergenssiongelmat suurissa epälineaarisisissa malleissa (esim. kontaktin aukeaminen tai sulkeutuminen),
- tarve huolellisille rajatila- ja ratkaisija-asetuksille
- yksittäinen askel on laskennallisesti raskas

Käytännössä implisiittistä käytetään, kun tavoitteena on kvasistaattinen tasapainoratkaisu, kuormitus etenee rauhallisesti, geometrian ja materiaalin epälineaarisuudet ovat hallittavissa ja halutaan edetä harvemmillä mutta raskaammilla askelilla. Tällöin tulee varmistaa, että mallissa on realistiset tuennat (ei keinotekoista kiinnittymistä), sopiva askelstrategia ja konvergenssin seuranta (Christine Obbink-Huizer, 2025)

**4.1.2 Eksplisiittinen (explicit)**

Eksplisiittisessä menetelmässä uusi tila lasketaan suoraan edellisestä ilman globaalia tasapainoiteraatiota, yleensä keskitetyn erotuksen aikaintegroinnilla. Menetelmä on ehdollisesti stabiili, eli suurin sallittu aika-askel määräytyy lähinnä pienimmän elementtimittakaavan ja materiaalin aallonnopeuden perusteella. Kriittinen aika-askel lasketaan kaavasta (12)

$$\Delta_{tcr} = l_{min}/C \quad (12)$$

missä

$l_{min}$

on pienimmän elementin pituus ja

$C$

on dilataatio aallon nopeus

joten yksittäinen edullinen askel toistuu todella monta kertaa. Tästä syystä eksplisiittinen on sopivampi valinta voimakkaasti epälineaarisiin ilmiöihin, kuten suurten muodonmuutosten, paikallisten murtumien, monimutkaisten kontaktien tai kitkan ja iskujen tarkastelussa, joissa implisiittinen ratkaisija voi pysähtyä konvergenssiin mallin alkaessa hajoamaan, eli elementtien alkaessa irrota toisistaan. (O.C ym., 2005)

Kvasistaattisessa analyysissä eksplisiittinen ratkaisutapa on toimiva vaihtoehto, kun inertian vaikutus pidetään riittävän pienenä. Tällöin kuormitusta kasvatetaan hitaasti ja energiataseita seurataan jatkuvasti. Tyypillinen käytäntö on käyttää kiineettistä energiaa koko analyysin ajan ja tarvittaessa käytetään varovaisesti massaskaalausta tai numeerista vaimennusta (tilavuusviskositeetti, bulk viscosity), perustellen näiden vaikutukset tuloksiin. Lisäksi valvotaan elementtien tiimalasimoduulien (hourglass modes) hallintaa, jotta nollanenergiamuotojen aiheuttamaa näennäisdynamiikkaa ei synny. (Bathe, K. J., 1996)

#### **Menetelmän vahvuuksia ovat:**

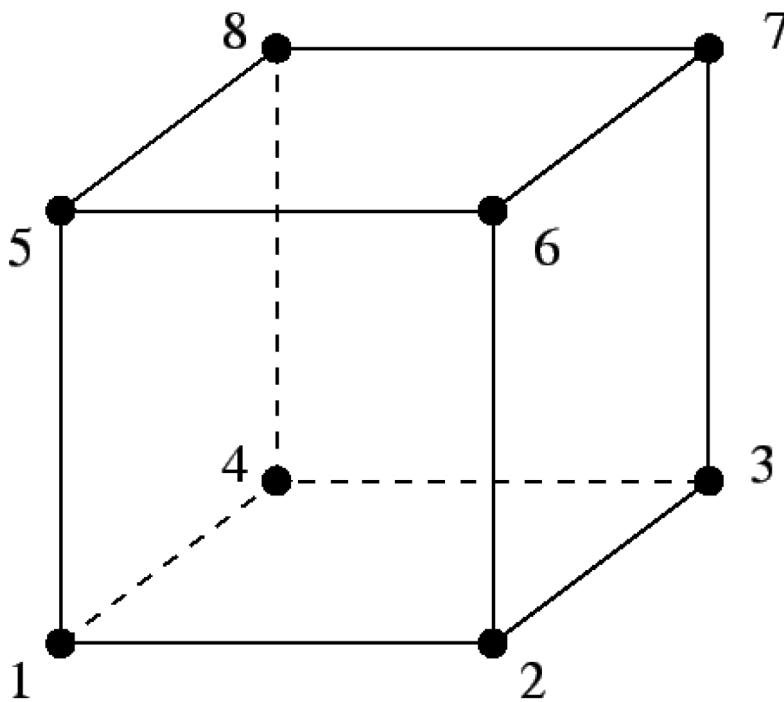
- voimakas kontaktien ja ei-sileiden murtoprosessien kanssa (ei konvergenssi-ongelmaa),
- luonnollinen soveltuvuus äkillisiin tilanteisiin (esim. iskut) ja
- hyvä rinnakkaiskaalautuvuus suurissa verkoissa.

#### **Rajoitteita ovat:**

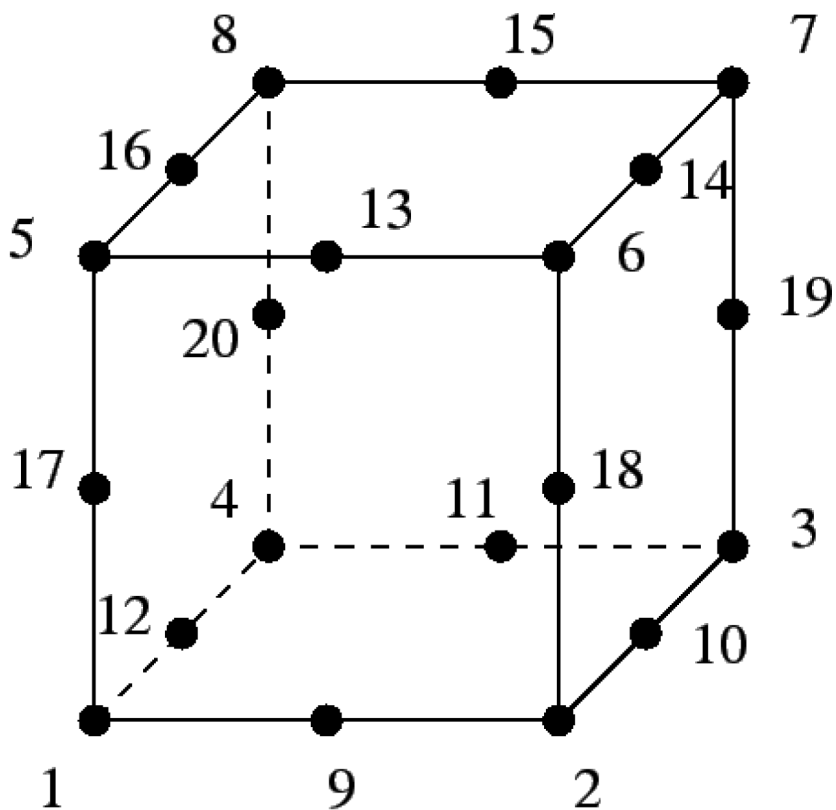
- pieni kriittinen aika-askel (hidas kvasistaattisissa prosesseissa),
- verkon herkkä riippuvuus pienimmän tai huonolaatuisen elementin mitasta ja laadusta,
- tarve energia- ja rajaehdotarkasteluihin tulosten fysikaalisuuden varmistamiseksi. (O.C ym., 2005)

## 4.2 Elementtityypit

Tässä työssä käytetään solidielementtejä, koska liimapuupilarikengän kriittiset ilmiöt (paikalliset jännityshuiput liitoksissa, geometrian epäjatkuvuudet) edellyttävät kolmiulotteista jännitystilaa. Heksagoni (hex, Kuva 6 ja Kuva 7) elementit antavat yleensä hyvän tarkkuuden, kun verkko voidaan kohdistaa geometrian pääsuuntiin, kun taas tetraedriset (tet, Kuva 8 ja Kuva 9) elementit mukautuvat monimutkaisiin muotoihin, mutta samaan tarkkuuteen pääseminen vaatii tyypillisesti tiheämmän verkon. Riippumatta valinnasta diskretoinnin herkkyys on osoitettava. Herkkyysanalyysin tulee pitää sisällään verkon hienonnuksen ja elementtivalinnan. PrEN 1993-1-14 korostaa, että elementtityypin on vastattava tarkasteltavaa ilmiötä ja rajatilakriteeriä. Soveltuvuus osoitetaan verifiointilla ja validoinnilla. Lisäksi standardi muistuttaa, että paikalliset jännityshuiput syntyvät malliin vain kuori- tai solidielementeillä, eivät siltamaisilla palkkielementeillä. Niiden käsitelyssä on noudatettava standardin soveltamissääntöjä. (CEN-prEN 1993-1-14:2023, 2023; Dunai ym., 2023)

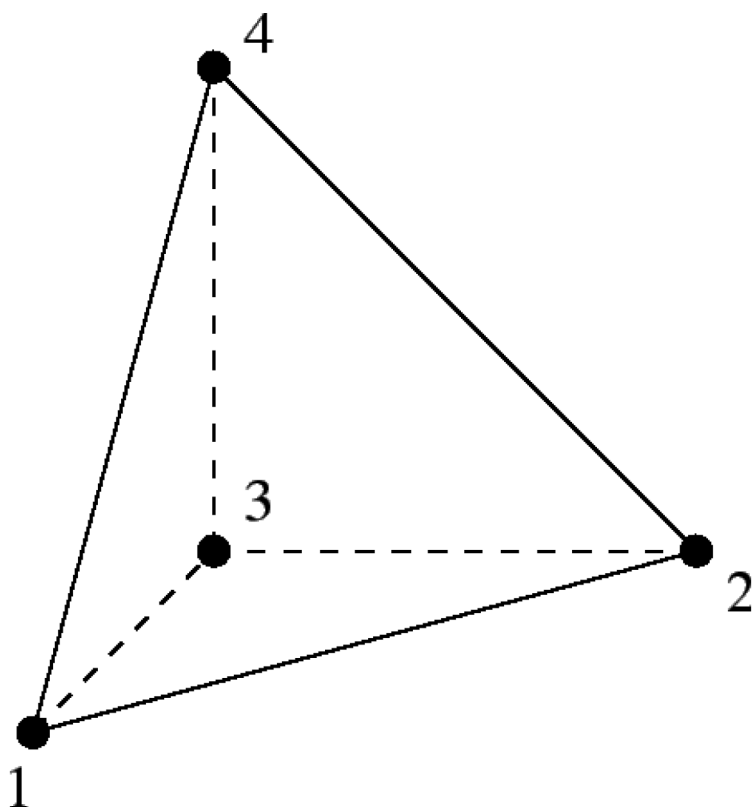


Kuva 6. C3D8R, 8-solmuinen heksagonielementti. (MIT, 2014)

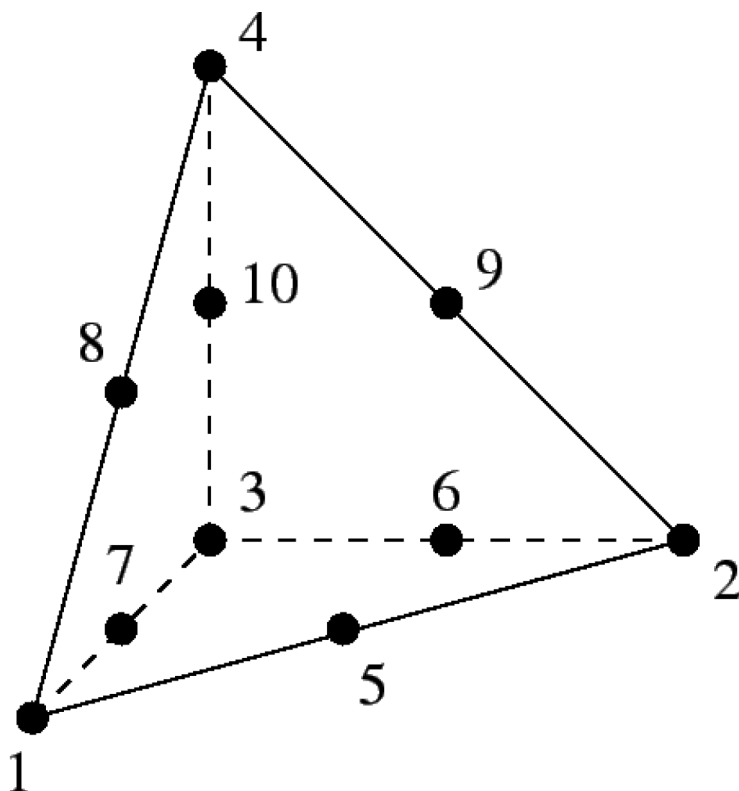


Kuva 7. C3D20R, 20-solmuinen (kvadraattinen) heksagonielementti. (MIT, 2014)

Ensimmäisen asteen elementit (Kuva 6, Kuva 8) kuvaavat siirtymäkentän lineaarisesti elementin sisällä. Toisen asteen kvadraattiset elementit (Kuva 7, Kuva 9) kuvaavat kaarevuutta ja jännityskentän vaihtelua tarkemmin, mikä on eduksi taivutus- ja lovikohtaisissa ilmiöissä. Valinta vaikuttaa sekä tarkkuus- ja kustannussuhteeseen sekä konvergenssiin (todellisen fysikaalisen ratkaisun lähestymiseen). Kvadraattiset elementit vähentävät usein tarvittavaa verkon tihennystä, mutta kasvattavat vapausasteita, mikä osaltaan pidentää laskenta-aikaa. PrEN 1993-1-14 edellyttää, että verkko- ja elementtiherkkyys dokumentoidaan osana verifiointia ja että analyysityyppi (LA, LBA, MNA/GNA/GMNIA) harmonisoidaan mallinnustason kanssa ennen rajatilatulkintaa. (Dunai ym., 2023)



Kuva 8. C3D4, 4-solmuinen tetraedrielementti. (MIT, 2014)



Kuva 9. C3D10, 10-solmuinen (kvadraattinen) tetraedrielementti. (MIT, 2014)

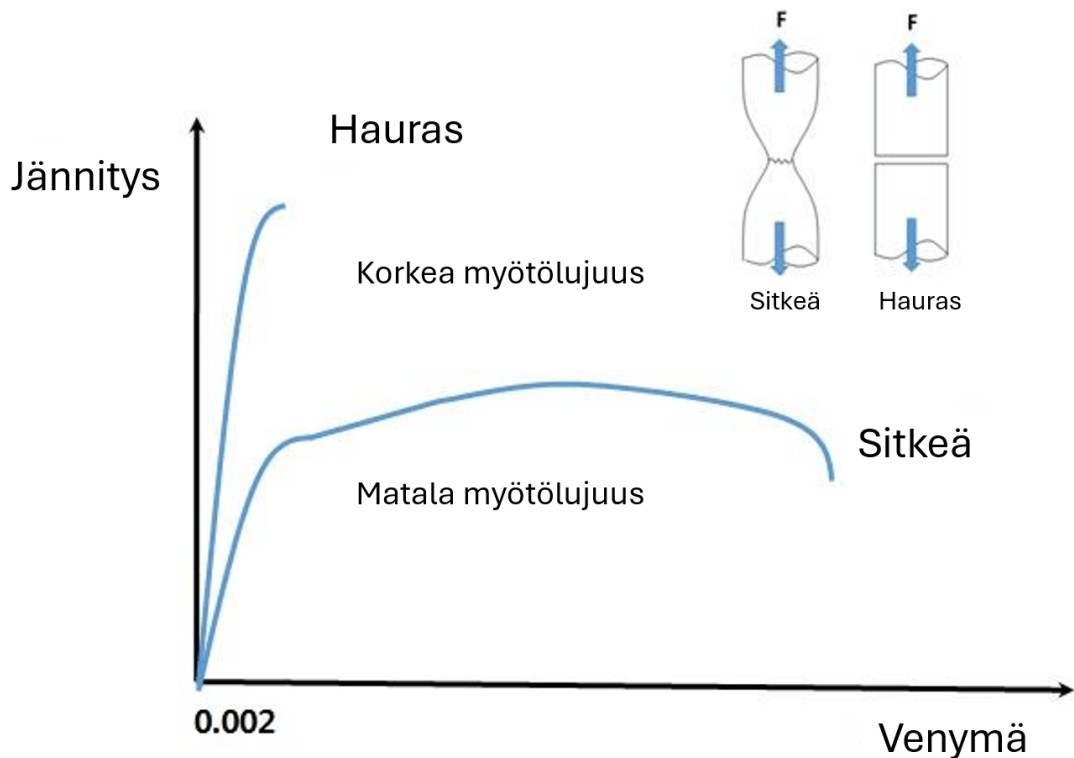
Elementtityyppi valitaan tarkasteltavan ilmiön perusteella. Globaalien jäykkyyss- ja stabiiliusindikaattorien arviointiin voidaan käyttää kevyempiä elementtimalleja

(esimerkiksi LBA-tarkastelua), mutta kantavuuden ja paikallisten jännityskenttien arviointi edellyttää solidi- tai kuorielementtien käyttöä sekä niiden asianmukaista käsittelyä (mm. jännitysten tulkinta ja tarvittaessa ekstrapolointi). Mallin soveltuvuus osoitetaan esistandardin mukaisesti. Elementtivalintojen perustelut, laskentaverkon herkkyystudkimus sekä validointi ilmiöittäin, kokeellisiin tuloksiin tai luotettaviin referensseihin tukeutuen, ovat edellytyksiä sille, että FEM-tuloksia voidaan hyödyntää rajatilatarkastelussa turvallisesti ja ohjelmistoriippumattomasti. Standardi prEN 1993-1-14 korostaa, että valitun elementtityypin on vastattava tarkasteltavaa ilmiötä ja rajatilaa ja että sen soveltuvuus on osoitettava verifiointin ja validoinnin avulla. Standardin mukainen menettely on ohjelmistoriippumaton ja painottaa elementti- ja verkkoherkkyysanalyysin dokumentointia ennen suunnittelutulkintojen tekemistä. (Dunai ym., 2023)

Kirjallisuuden vertailututkimuksissa heksagoni (hex) ja tetraedriset (tet) solidit eroavat selvästi etenkin elementtien järjestyksen (lineaarinen vs. kvadraattinen) ja ilmiön mukaan. Sandia National Laboratories-tutkimus osoittaa, että lineaarinen tet tuottaa systemaattisesti suurimman virheen. Linearisessa taivutuksessa LT-mallien (Linear Tetrahedron) siirtymä- ja jännitysvirheet yltyvät karkeilla verkoilla 10–70 % tasolle, kun taas LH, QH ja QT (Linear Hexahedron, Quadratic Hexahedron ja Quadratic Tetrahedron) antavat hyväksyttävän tarkkuuden. Lähes kokoon puristumattomalla materiaalilla ( $\nu \approx 0,49$ ) virheet kasvavat kaikilla elementeillä. Väännön tapauksessa LT on selvästi heikompi kuin kvadraattinen heksagoni (QH), joka on johdonmukaisesti täsmällisin. Dynaamisissa muodoissa trendi on sama, eli LT on heikoin, kvadraattiset mallit riittävän tarkkoja. Lisäksi epälineaarisen elastisplastisen vertailun perusteella lineaarinen heksagoni voi ylittää jopa kvadraattisen tetraedrin (QT) tarkkuuden leikkausjännityksen hallitessa. Ominaisarvovertailut viittaavat myös lineaarisen tetran suurempaan näennäisjäykkyyteen (lukkiutumisriski). Jos heksagoniverkotus (LH, QH) on mahdollinen, se on etusijalla. Mutta monimutkaisissa muodoissa kvadraattinen tetraedri (QT) on kelvallinen, kunhan verkon laatu ja hienonnus osoitetaan. (Benzley ym., n.d.)

### 4.3 Sitkeän murtuman (Ductile damage) määrittäminen

Sitkeä murtuma on materiaalin lujuuden asteittaista heikkenemistä, joka johtuu pienten mikrokooppisten virheiden kertymisestä. Materiaalin sisään muodostuu pieniä tyhjiä kohtia ja halkeamia, kun materiaalissa tapahtuu plastista muodonmuutosta, eli se venyy tai taipuu pysyvästi palaamatta takaisin. Toisin kuin hauraat materiaalit, jotka särkyvät äkillisesti, sitkeät materiaalit antavat runsaasti varoitusmerkkejä. Ne venyvät, pullistuvat ja muuttavat muotoaan huomattavasti ennen varsinaista murtumistaan. Tästä syystä sitkeät materiaalit sopivat vaativiin rakenteisiin. (Veidth, 2025) Sitkeän ja hauraan materiaalin erot ovat esitetty kuvassa 10. Hauraita materiaaleja ei käsitellä tässä opinnäytetyössä tarkemmin.



Kuva 10. Sitkeä ja hauras materiaalmalli. (Veidth, 2025, muokattu)

Sitkeä murtuminen ei tapahdu äkillisesti vaan se kasvaa alkamishetkestä lopulliseen kappaleen hajoamiseen. Tämä käsittää pääpiirteittäin kolme vaihetta, joista ensimmäisenä voidaan pitää vaurioitumisen alkamista. Kimmoisen alueen ylityksen jälkeen teräkseen alkaa syntyä mikrotason vaurioita, jolloin sitkeän vaurioitumisen voidaan katsoa alkavan. Numeerisessa laskennassa ohjelmalle tulee määritellä tämä piste, jolloin mikroaurioita alkaa syntyään. Yksinkertaistetusti

voidaan todeta, että kun ekvivalentti plastinen venymä saavuttaa kriittisen arvon alkaa materiaalin vaurioituminen. (Veidth, 2025)

Sitkeää vauriota mallinnettaessa Abaqus-ohjelmalla tehdään se usein kertyneen plastisen venymän perusteella, johon vaikuttaa kaksi tekijää:

1. Jännityksen kolmiaksaalisuus (Stress triaxiality), joka määritellään hydrostaattisen paineen ja von Misesin ekvivalenttijännityksen suhteena. Esi-  
tetty kaavassa (13).
2. Venymänopeus ( $\dot{\epsilon}$ , strain rate). Joka määrittää kuinka nopeasti materiaali  
muuttaa muotoaan (Fidelis, 2024)

$$\eta = -\frac{p}{q} \quad (13)$$

jossa

$p$

on hydrostaattinen paine [Pa],

$q$

on von Mises-ekvivalenttijännitys [Pa] ja

Nämä tekijät vaikuttavat tyhjien onkaloiden muodostumiseen ja kasvamiseen. Minkä vuoksi määritetään kriittinen ekvivalentti plastinen venymä (critical equivalent plastic strain), josta käytetään myös nimeä murtovenymä (Fracture Strain) jonka määrittäminen on esitetty kaavassa (14)

$$\epsilon_p^{init} = f(\eta, \dot{\epsilon}) \quad (14)$$

jossa

$\dot{\epsilon}$

on venymänopeus (strain rate).

Abaqus interpoloi näiden pisteiden ( $\epsilon_p^{init}$ ,  $\epsilon$ ,  $\eta$ ) välillä, määrittäessä, milloin vauriot alkavat kullakin verkon elementillä. Abaqus-ohjelmassa on muitakin murtumis-  
muotoja mahdollista määrittää. (Veidth, 2025). Muut murtumistavat ja niiden määrittäminen rajataan tämän työn ulkopuolelle.

Toisessa vaiheessa, kun vaurio alkaa syntyä, materiaali alkaa menettää jäykkyyttään. Ensin vähitellen ja sitten kokonaan. Tätä murtumista säätelevät vauriokehityksen lait (damage evolution laws). Kun vaurio kehittyy materiaali jatkaa jäykkyyden ja lujuuden menettämistä vaurion alkamiskynnyksen saavuttamisen jälkeen. Halkeaman muodostuttua sitä ympäröivä alue heikkenee ja tämä heikkous kasvaa ajan tai kuormituksen kasvaessa ennen lopullista murtumista. (Veidth, 2025)

Sitkeän materiaalin vaurioituessa, se ei hajoa välittömästi, vaan hajoaminen etenee ja tätä prosessia kutsutaan vaurion evoluutioksi (damage evolution). Tätä määritellään vaurioenergian vapautumisnopeudella,  $Y$  (damage energy release rate). Se mittaa sitä, kuinka paljon energiaa vapautuu materiaalin pehmetessä. Joka saadaan kaavasta (15). Tämän avulla määritetään vaurion kehitysnopeus,  $\dot{D}$  (damage evolution rate) kaavassa (16) esitetyllä tavalla.

$$Y = \frac{\sigma_{eq}^2}{2E(1-D)^2} \left[ \frac{2}{3}(1+\nu) + 3(1-2\nu) \left( \frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}} \right)^2 \right] \quad (15)$$

missä

$\sigma_{eq}$	on von Misesin ekvivalentti jännitys,
$\sigma_H$	on hydrostaattinen jännitys,
$\nu$	on vahingoittumattoman materiaalin Poissonin luku ja
$E$	on vahingoittumattoman materiaalin kimmomoduuli.
$\frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}}$	on kolmiaksisuusuhde. Mitattu venyvyys murtumishetkellä pienenee suhteen kasvaessa. Josta voidaan päätellä, että hauraille materiaaleilla on suuri kolmiaksisuusuhde. (Veidth, 2025)

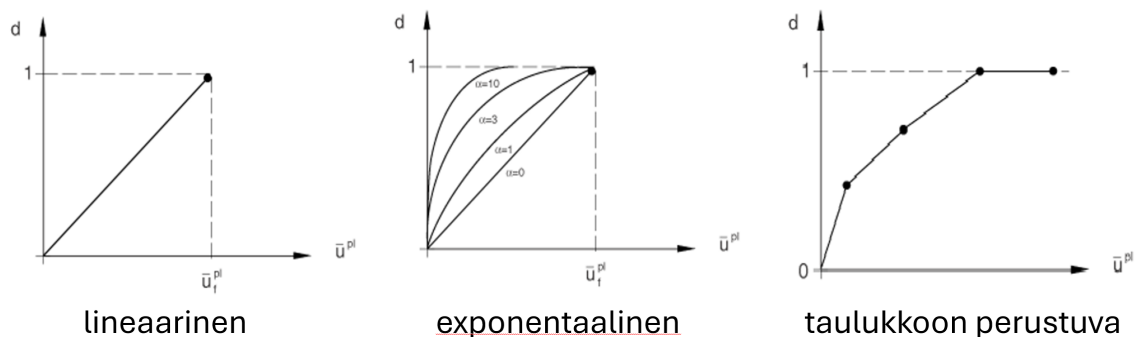
Vaurion sisäisen muuttujan kehityksen oletetaan määräytyvän seuraavassa kaavassa (16) esitetyn suhteen mukaan:

$$\dot{D} = \dot{\gamma} \frac{1}{1-D} \left( \frac{-Y}{r} \right)^s \quad (16)$$

jossa

$\dot{\gamma}$  on kertynyt plastinen venymä ja  $r$  ja  $s$  ovat materiaali vakioita.

Abaqus-ohjelmassa sitkeän vaurion kriteerit voivat aloituksen jälkeen seurata vaurion kehittymistä määritettyjen parametrien mukaisesti. Kehittymiseen on ohjelmassa kaksi tyyppiä, jotka ovat, ”siirtymä” (displacement) ja ”energia” (energy). Lisäksi ohjelmassa tulee määrittää pehmentymisen muotokuvio kuvan 11 mukaan. Vaihtoehtoja on kolme, lineaarinen, eksponentiaalinen ja taulukkoarvoilla määritettävä. (Veidth, 2025)

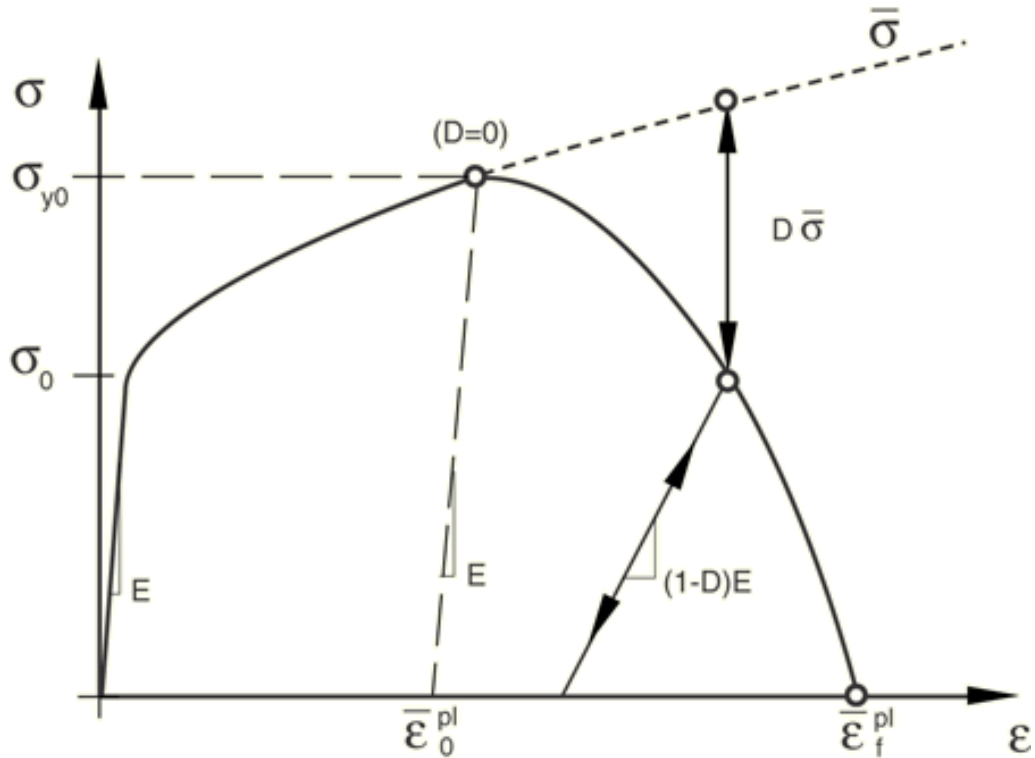


Kuva 11. Vaurionkehityksen eri määritelmiä plastisen siirtymän perusteella. (Dassault, 2023b)

Sitkeän vaurion alku noudattaa ns. ductile damage-kriteeriä, jossa kriittinen plastinen venymä asetetaan funktiona kolmiaksisesta jännityksestä ja venymänopeudesta. Tähän on myös vaihtoehtoisia alkamiskriteerejä, kuten Johnson–Cook, leikkaus, jne., jotka soveltuvat eri tarkasteluihin. Tässä työssä painopiste on sitkeän murron kriteerissä (ductile damage), koska se vastaa teräsluotosten tyypillistä murtotapaa. Siinä syntyneiden onteloiden yhdentymisestä sulkeumien ja matriisin välisten irtoamisten vuoksi, mitä seuraa niiden kasvu ja yhteen kasvaminen plastisen epävakauden ilmiön kautta. (Veidth, 2025)

Abaqus-ohjelmassa sitkeän murtuman mallinnus etenee kahdessa peräkkäisessä vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa määritetään vaurion aloitus (damage initiation) ja toisessa vaiheessa vaurion kehittyminen (damage evolution). Aloitus kertoo, milloin materiaali alkaa heiketä mikrotasolla ja kehittyminen määrittää, miten jäykkyys ja kantokyky vähenevät aloituksen jälkeen aina murtumaan saakka. (Veidth, 2025)

Kun kumuloitunut plastinen venymä ylittää taulukoidun rajan  $D = 0$  kyseisessä kolmiakselisessa tilassa, vaurioprosessi alkaa integraatiopisteessä. Tämä on esitetty kuvassa 12. Käytännössä raja-arvot kalibroidaan kokeista tai kirjallisuudesta, jotta tilat vedossa ja leikkauksessa ovat mallissa realistisia. Ne voidaan myös yksinkertaistaa määrittämällä laskennallisesti. (Veidth, 2025)



Kuva 12. Jännitys-venymäkuvaaja, jossa etenevä vaurioituminen. (MIT, n.d.)

Vaurion kehittyminen (damage evolution) Abaqus-ohjelmassa voidaan määrittää kahdella tapaa. Materiaalin pehmeneminen määritetään joko ekvivalentin plastisen siirtymän (equivalent plastic displacement) mukaan, joka lasketaan kaavasta (17). Abaqus ottaa huomioon karakteristisen elementtipituuden tässä laskentavassa (characteristic element length), jotta materiaalin pehmeneminen on säännön mukaista. Elementin pituus otetaan pienimmän elementin mukaan oletetulta murtoalueelta. (Veidth, 2025)

$$\bar{u}^{pl} = \bar{\epsilon}^{pl} * L_c \quad (17)$$

jossa

$\bar{\epsilon}^{pl}$

on ekvivalentti plastinen venymä ja

$L_c$  on elementin karakteristinen pituus, joka lasketaan heksagonielementeille kaavalla (18). (Veidth, 2025)

$$L_{c.hex} = \frac{V}{\max(A)} \quad (18)$$

jossa

$V$  on heksagonielementin tilavuus ja

$A$  on elementin pinnan pinta-ala.

Tetraedrielementeille karakteristinen elementin pituus lasketaan kaavasta (19)

$$L_{c.tet} = \min(h) \quad (19)$$

jossa

$h$  on pienimmän tetraedrielementin korkeus solmusta sen vastakkaiseen pintaan. (ANSYS, 2025)

Kvadraattisille 2. kertaluvun (quadratic, Kuva 7 ja Kuva 9) elementeille karakteristinen pituus puolitetaan.

Ennen vaurion alkamista  $\bar{u}^{pl} = 0$  (MIT, n.d.)

Toinen vaihtoehto on määrittää murtumisenergia (fracture energy), joka lasketaan kaavasta (20). (MIT, n.d.)

$$G_f = \int_{\bar{u}_0^{pl}}^{\bar{\varepsilon}_f^{pl}} L \sigma_y d\bar{\varepsilon}^{pl} = \int_0^{\bar{u}_f^{pl}} \sigma_y d\bar{u}^{pl} \quad (20)$$

Jos halutaan, että tulos ei riipu liikaa elementtikoon valinnasta, niin on suositeltavaa käyttää energiaperustaista määrittelyä. (Veidth, 2025)

Kun kantokyky mallissa on paikallisesti menetetty, elementtejä poistetaan (element deletion) todenmukaisemman murtuman etenemisen mallintamiseksi. Pehmenemisvaiheessa voidaan tarvittaessa käyttää viskoosiregularisointia (viscous regularization) pienen numeerisen viskositeetin avulla konvergenssin parantamiseksi ilman oleellista vaikutusta ratkaisuun. Nämä valinnat dokumentoidaan ja niiden vaikutus arvioidaan energiataseiden ja muodonmuodon kehittymisen kautta. (SIMULIA, n.d.a)

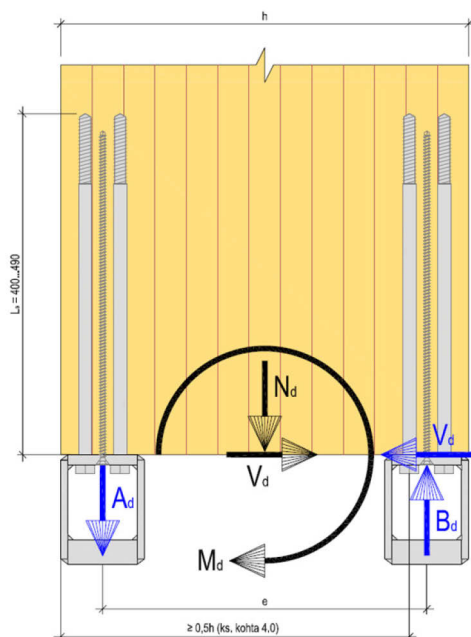
## 5 FEM-MALLI JA MALLIIN MÄÄRITETYT PARAMETRIT

### 5.1 Liimapuupilarikengän mitoituksen periaatteet

Liimapuupilarikengä toimii liitososana, jäykästi tuetussa liimapuupilariliitoksessa perustuksiin. Pilarikengä jakaa mastopilarilta välittyvät kuormitukset kuvan 13 mukaisesti. Pilarilta tulevat kuormitukset muutetaan pilarikengälle puristukseksi kaavan (21) mukaan ja vetorasitukseksi kaavan (22) mukaan. Näiden olettamien mukaan pilarikengää rasittaa ainoastaan veto-, puristus- ja leikkauskuormituksia. Leikkauskestävyys lasketaan puristetun liimaruuvien leikkauskestävyyden mukaan. Puristusvoimien oletetaan jakautuvan perustuksille juotosvalun välityksellä ylälaipan ja pilarin poikkileikkauksen kautta. Liimapuupilarikengän ei oleteta olevan mitoittava liitoksen mitoituksessa. Mitoittaviksi liitoksessa jää peruspultit ja liimaruuvit. (Puuinfo, 2025; Versowood, 2025). Tässä opinnäytetyössä käsitellään ainoastaan pilarikengän prototyypin käyttäytymistä vetorasituksessa.

$$B_d = \frac{M_d}{e} + \frac{N_d}{2} \quad (21)$$

$$A_d = \frac{M_d}{e} - \frac{N_d}{2} \quad (22)$$



Kuva 13. Liimapuupilarikengän kuormitukset. (Puuinfo, 2025)

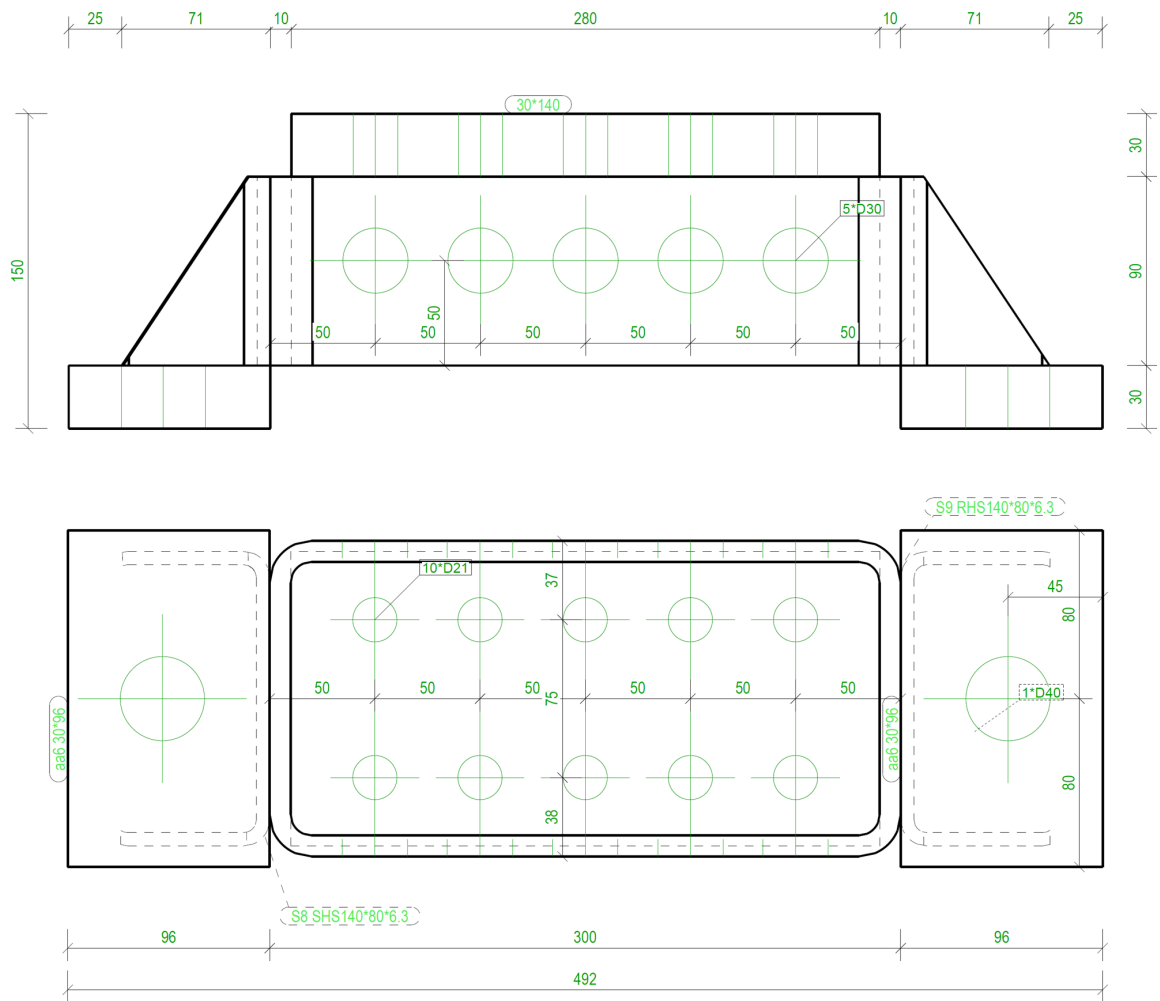
## 5.2 Geometrinen malli

Tässä työssä tarkasteltava pilarikengän prototyyppi kulkee työnimellä "EB\_TKCustom13". Lähtötiedot ja tarkasteltavan pilarikengän alustava geometria saatiin Versowoodilta, joka on osallisena HYBRITUT-hankkeessa. Näistä lähtötiedoista selviää pilarikengän dimensiot ja osat, joista kenkä koostuu sekä alustava materiaali osille. Myös alustavat hitsien a-mitat löytyvät lähtötiedoista. Geometrian mallinnukseen käytetyt lähtötiedot löytyvät liitteestä 1. Pilarikengän geometria pyrittiin pitämään toivotunlaisena. Ylälaipan leveyttä jouduttiin kaventaamaan lähtöarvoista 3 millimetriä molemmilta puolilta, jotta hitsin a-mitta saatiin lähtötietojen mukaiseksi ( $a = 5 \text{ mm}$ ). Ylälaipan leveydeksi mallinnettiin 140 mm sijaan 134 mm.

Pilarikengän prototyypin kokonaisulkomitat ovat lähtötietojen perusteella seuraavat, 492 mm x 160 mm x 150 mm (pituus x syvyys x korkeus). Tarkemmat geometriatiedot on esitetty liitteessä 1 ja kuvassa 14. Pilarikengä koostuu yhteensä kuudesta toisiinsa hitsattavasta osasta. Taulukkoon 3 on koottu kaikkien erillisten osien lähtötiedot. Taulukossa esitetty väri viittaa kuvaan 15, jossa osat ovat eroteltu väreillä taulukon mukaisesti.

Taulukko 3. Pilarikengän osaluettelo. (Pulkkinen, 2025, muokattu)

OSALUETTELO KOKOONPANOLLE EB_TKCustom13								
Kappale	OSA	PROFIILI [S355JR]	PITUUS [mm]	Leveys [mm]	LKM	Väri	Tilavuus [mm <sup>3</sup> ]	Paino [kg]
Sivutuki	S8-9	RHS140*80*6.3	90	-	2	harmaa	111365	0,874
Runko RHS	S10	RHS300*150*10	90	-	1	sininen	672415	5,278
Ylälaippa	aa5	30*134	280	134	1	violetti	1021692	8,02
Alalaippa	aa6	30*96	160	96	2	vihreä	423101	3,321
Hitsit		a = 5 mm				keltainen	47092	0,41
<b>Yhteensä</b>							<b>2810131</b>	<b>22,1</b>



Kuva 14. Pilarikengän dimensiot. (Pulkkinen, 2025, muokattu)

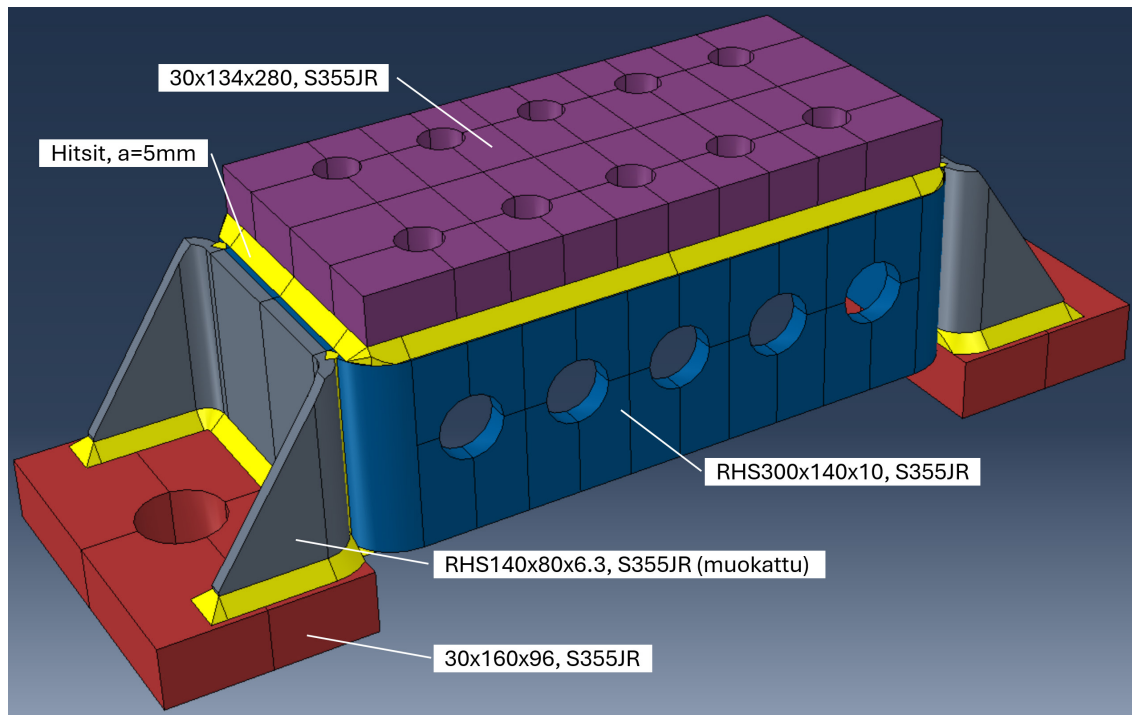
Pilarikengä on suunniteltu leveydeltään minimissään 280 mm oleville liimapuupilareille (Pulkkinen, 2025). Pilarikengä on tarkoitettu pilarin perustusliitokseen kaksi kappaletta. Pilarikengä kiinnitetään liimapuupilariin liimaruuveilla samalla periaatteella kuin tällä hetkellä markkinoilla oleva pilarikengä. Liimaruuveja varten pilarikengään on suunniteltu 10 kappaletta reikiä, halkaisijaltaan 21 mm. Liimaruuviliitosta ei käsitellä tässä opinnäytetyössä, muuten kuin kuormien siirtymisen reittinä FEM-mallissa. Liimaruuvi kiinnitys suunnitellaan tapauskohtaisesti Puuinfon tilaaman lausunnon No EUFI29-25000438-T1 mukaan. Liimaruuvien dimensiot on otettu edellä mainitusta lausunnosta. (VTT, n.d.)

Markkinoilla olevassa pilarikengässä ylälaipassa on kaksi reikää niin sanottuja paloruuveja varten, joiden avulla pilarikengä saadaan toimimaan onnettomuustilanteessa. Prototyyppi pilarikengässä EB\_TKCustom13 ei vastaavia paloruuvien

reikiä ole, johtuen aikaisemmin julkaistusta lausunnosta No EUFI29-25000438-T1, joka ottaa kantaa palotilanteen mitoitukseen ja käsittelee liimaruuvien mitoitusta palotilanteessa. Palotilanteen mitoitus voidaan toteuttaa edellä mainitun lausunnon mukaan. (VTT, n.d.). Palotilanteen mitoitusta ei käsitellä tarkemmin tässä opinnäytetyössä.

Pilarikengän kiinnitys perustuksiin on niin ikään vastaavanlainen markkinoilla olevan pilarikengän kanssa. Se kiinnitetään perustuksiin peruspultteille niille tarkoitettujen kuormia siirtävien laippojen kautta. Näitä kutsutaan alalaidoiksi tässä työssä. Alalaidoissa on halkaisijaltaan 40 mm reikä peruspulttia varten. Tämä mahdollistaa pilarikengän kiinnittämisen perustuksiin maksimissaan 30 mm halkaisijalla olevalla peruspultilla. Peruspulttien dimensiot ja materiaaliparametrit on saatu Peikon HULCO-ankkuripultit ohjeesta. (Peikko, 2024). Peruspulttien mitoitusta ei käsitellä tarkemmin tässä opinnäytetyössä, vaan liimaruuvien tapaan ne käsitellään ainoastaan kuorman siirtoreittinä laskentamallissa sekä niiden käyttäytyminen kuormituksessa on otettu simuloinnissa huomioon. Ankkuripultteille ja liimaruuveille on määritelty materiaalmallit simulointiin prEN 1993-1-14 mukaan. Tarkempi laskelma on esitetty liitteessä 2.

Pilarikengän osat tulee mallin toimivuuden vuoksi ja verkon määrittämisen parantamiseksi erotella toisistaan omiksi lohkoiksi (partition). Tässä työssä mallista on ensiksi lohkotettu kaikki osat ja hitsit omiksi lohkoiksi. Tämän jälkeen osat on vielä lohkotettu elementtiverkon parantamiseksi useampiin lohkoihin. Esimerkiksi reiälliset osat ovat verkotuksen kannalta haastavia, joten ne kannattaa usein lohkottaa niin, että reikä on lohkoissa ainoastaan yhdessä nurkassa, eikä esimerkiksi keskellä. Jossain tapauksissa voi olla suositeltavaa mallintaa reiän ympärille tiheämpi verkko, jotta saadaan tarkempia tuloksia. Verkon optimointia ja parantamista olisi mahdollista suorittaa kattavammin, mutta tässäkin on jouduttu tekemään kompromisseja mallinnukseen käytettävän ajan kanssa. Esimerkiksi reikien tarkempaa verkosta ei ole lähdetty tekemään. Verkkoa on hallittu vain lohkotamalla osia pienemmiksi reikien osalta. Mallinnetun pilarikengän eri osat ja geometria on esitetty kuvassa 15 eri väreillä. Verkotusta varten tehty lohkotus näkyy myös samassa kuvassa. Osat ovat mallinnettu joko suoraan Part-moduulilla tai ne on osan geometrian vuoksi ensiksi mallinnettu Part-moduulilla, jonka jälkeen niitä on muokattu yhdistä- ja/tai leikkaa-toimintojen (merge, cut) avulla.

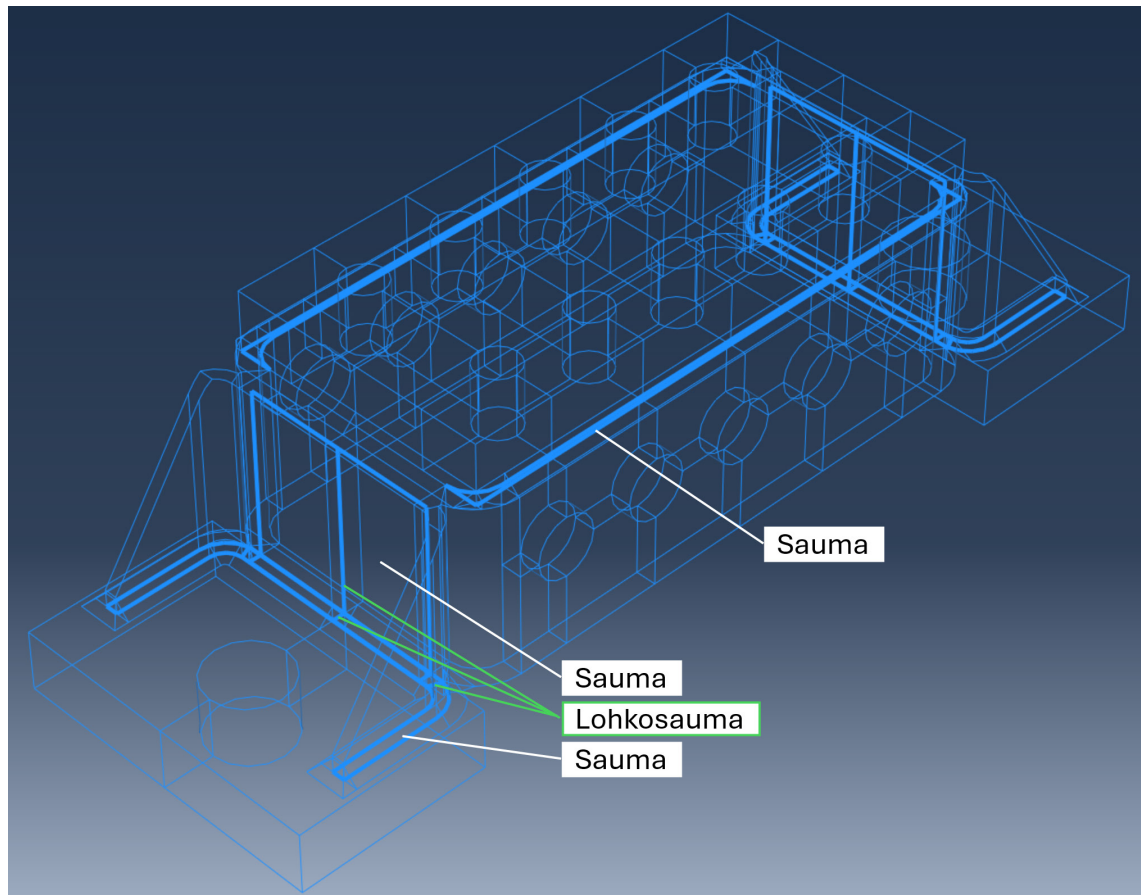


Kuva 15. Geometrinen malli, pilarikengän osat, Abaqus.

Koska Abaqus-ohjelma olettaa, että toisissaan kiinniolevat kappaleet ovat myös laskennassa jäykästi kiinnitettyinä toisiinsa. Malli tulee rakentaa tarkasti, jotta elementtien solmut kiinnittyvät mallissa todellisuudessa toisiinsa. Tämä voidaan varmistaa mallinnuksessa erilaisilla mallinnustekniikoilla. Geometrian rakentamisessa referenssipisteenä on järkevää käyttää toisen kappaleen referenssipistettä, tai muokata jo olemassa olevaa kappaletta, jotta kappaleet pysyvät kiinni toisissaan myös mikrotasolla. Laskennasta tulee epävakaata ja/tai sen virhemarginaali kasvaa huomattavasti, jos monista osista koostuvan osan kappaleiden ja/tai solmujen välillä on mikrotason rakoja. Tässä työssä FEM-malli on kasattu niin, että on voitu varmistua siitä, että näitä rakoja ei synny malliin. Esimerkiksi hitsit ovat tehty ohjelman omalla kulmien viistoamiseen tarkoitetulla työkalulla (chamfer). Siinä annetaan kulmalle kateetin pituus. Lähtötietojen pohjalta hitsin  $a$ -mitta on 5 mm, jonka kateetin pituus on 7.071 mm. Geometrisessa mallissa käytettiin pyöristettyä arvoa 7.1 mm kateetin pituutena, joka on 0.4 % suurempi, mutta ei vaikuta hitsin kapasiteettiin oleellisesti. Tämän jälkeen määritetään reunaviiva, jonka jälkeen ohjelma mallintaa tälle viivalle kulman, jos se löytää kulman molemmilta puolin toisiaan vastakkaiset pinnat. Näin voidaan varmistua, että hitsit ovat kontaktissa niille määriteltyihin pintoihin.

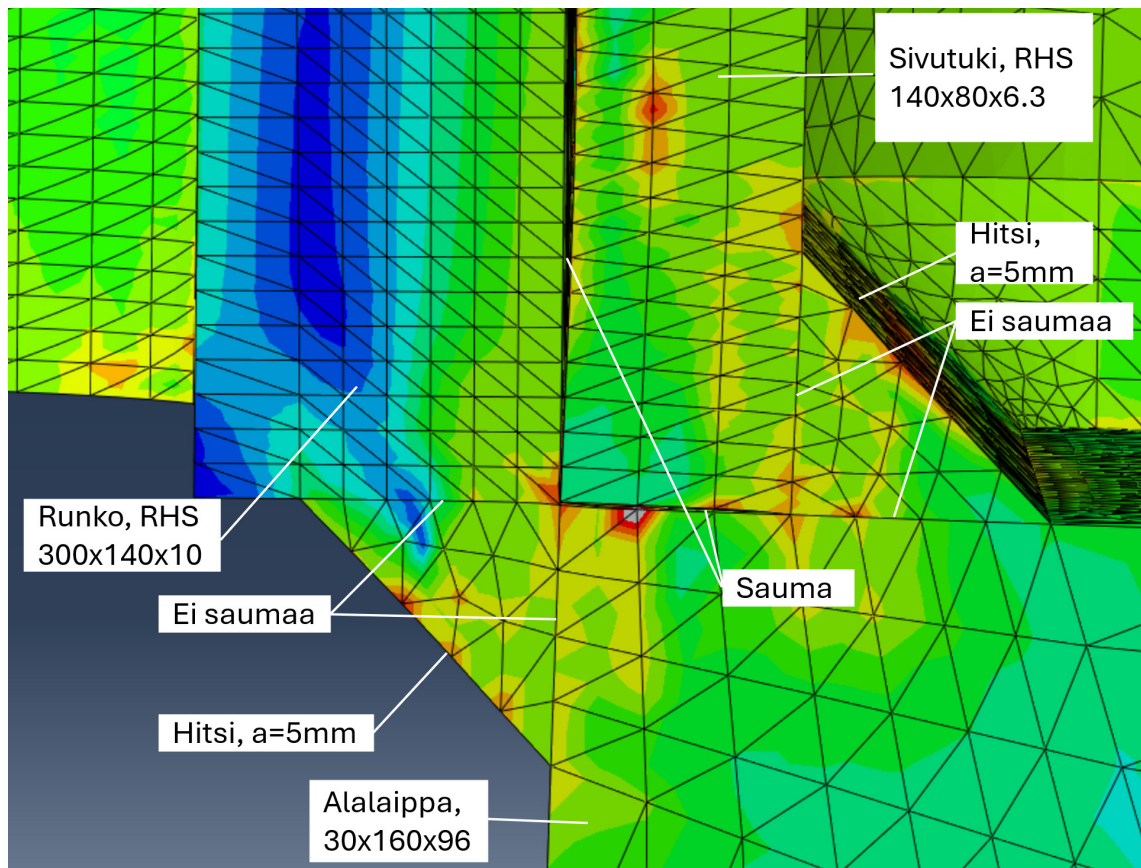
### 5.3 Keskinäisten vaikutuksien määrittäminen (Interactions)

Pilarikengässä vain hitsit ovat todellisuudessa kiinni toisissa kappaleissa ja muut toisiaan koskettavat pinnat jäävät irti toisistaan. Näillä pinnoilla tulee myös olla mahdollisuus irrota kosketuspinnastaan kuormitustilanteessa. Näitä toisiinsa kosketuksissa olevia pareja ovat laipat ja RHS-putkista tehdyt rungot. Nämä osat kiinnittyvät ainoastaan hitseillä toisiinsa. Jotta tämä saatiin määritettyä geometriseen malliin, käytettiin Interactions-moduulin työkalua, jolla pinnoille saadaan määriteltyä niin sanottu rako (crack) tai sauma (seam). Raon määrittäminen tuplaa solmut määrittämisalueella ja estää näiden raossa olevien tuplasolmujen kiinnittymisen toisiinsa. Eli eri kappaleissa olevien solmujen yhdistyminen on estetty, joka sallii niiden liikkeitä toisistaan erillään. Näin kappaleet saadaan käyttäytymään kuten se käyttäytyisi todellisuudessa. Kuvassa 16 on esitetty pilarikengään määritetyt saumat. Osa saumoista on jakautunut useampaan osaan, joka johtuu geometrian verkotuksen parantamiseksi tehdystä lohkotuksesta, joka on käsitelty aiemmin kappaleessa 5.2. Tällä lohkotuksella ei ole saumojen kanssa laskennan kannalta merkitystä muuten kuin verkon toimivuuden kautta. Saumojen ja/tai rakojen määrittäminen kannattaa tehdä ennen verkotusta, koska se vaikuttaa suoraan verkotukseen ja sen muodostumiseen. Jos verkko on jo tehty, täytyy se poistaa ennen kuin voidaan määrittää sauma.



Kuva 16. Pilarikengän mallinnetut saumat, Abaqus.

Kuvassa 17 on esitetty pilarikengän rungon, sivutuen ja alalaipan hitsiliitos sekä määritetyt saumat ja hitsit. Kuvasta selviää, miten edellä mainittu asetus toimii simuloinnissa käytännössä. Hitsille ei ole määritetty saumaa, joten ne ovat kiinnittyneet jäykästi muihin osiin ja liitoskohdassa elementtien solmut ovat yhteiset. Saumassa elementtien solmut on tuplattu ja irrotettu toisistaan, joten kuormitus-tilanteessa pilarikengän osat pääsevät vapaasti irtoamaan toisistaan, kuten kuvassa on nähtävillä. Kuvasta on myös nähtävillä erilainen elementtiverkko sivutuen ja rungon välillä. Värikoodi kertoo jännitysjaakaumasta kuvassa 36 määritetyllä tavalla.

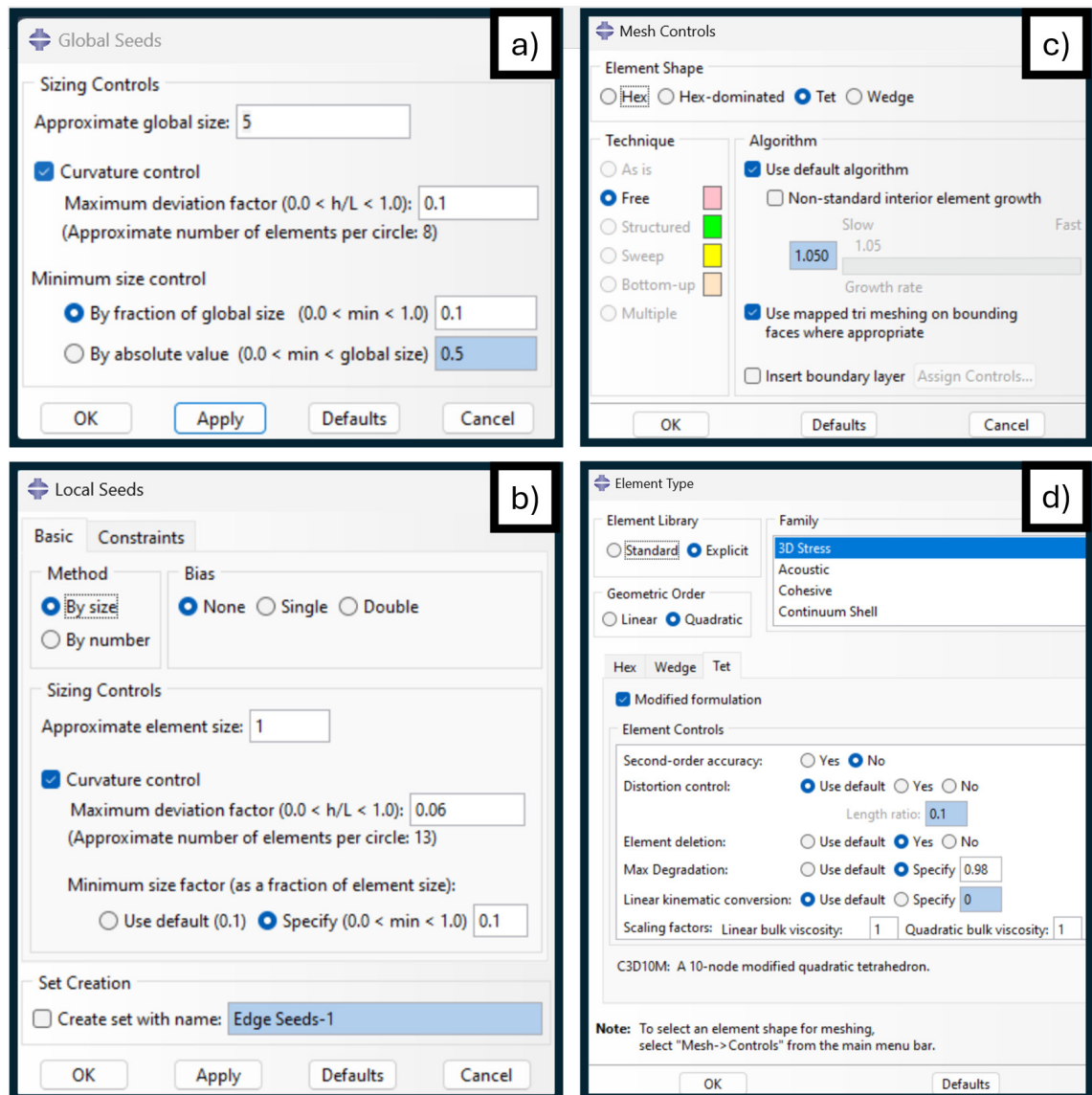


Kuva 17. Sauman määrittämisen vaikutus simulointiin, Abaqus.

#### 5.4 Elementtiverkon määrittäminen

Elementtiverkkoa määrittäminen vaikuttaa suoraan laskennan kustannuksiin sekä myös tulosten luotettavuuteen. Tämän takia verkkojen määrittäminen simulointimallissa on usein monien kompromissien summa. Liian tiheän verkkojen kustannukset laskennassa saattavat olla ajallisesti kannattamattomat, kun taas liian harva verkko antaa epäluotettavia tuloksia.

Verkkojen määrittäminen aloitetaan määrittämällä globaali siemennys mallin jokaiselle erilliselle reunalle. Asetuksissa määritetään siementen taajuus, kaarevien muotojen siemennys ja minimi koko. Mallissa globaalille verkolle käytetyt asetukset esitetty on kuvassa 18, a). Globaalit asetukset asetettiin niin, että siementaajuus on viisi millimetriä (5 mm) ja kaarevuuden hallinnan poikkeamakerroin asetettiin 0.1. Globaalien verkkojen määrittäminen on esitetty kuvassa 19 valkoisilla palloilla lohkojen reunoilla.



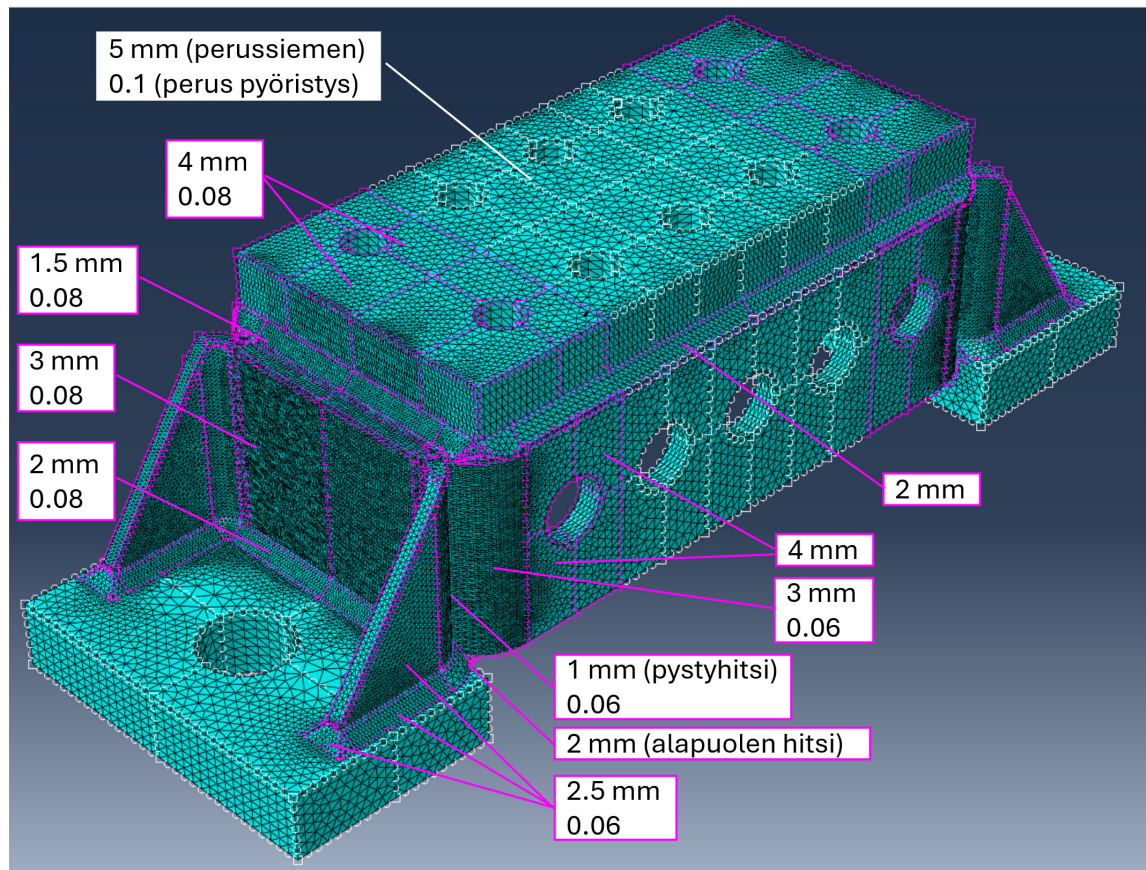
Kuva 18. Verkon määrittämisen asetukset, Abaqus.

Tämän jälkeen verkkoa on useiden iterointikierrosten jälkeen lähdetty optimoimaan ja tarkentamaan vaadittavista paikoista. Kuvassa 18, b) on esitetyt yhdelle lohkolle määritetyt asetukset.

Elementtiverkon optimointi on toteutettu iteratiivisesti useiden simulointien tuloksien perusteella. Aluksi laskenta on tehty karkealla elementtiverkolla, jota on tarkennettu kriittisiltä alueilta. Jotta elementtiverkko on saatu toimivaksi ja tulosten kannalta riittävän tarkaksi, on pilarikentä verkotettu lohkokohtaisesti muuttamalla kunkin lohkon elementin verkotuksen siemenkokoa sekä tarvittaessa kaarevuuden hallinnan poikkeamakerrointa (deviation factor). Tarkemmat lohkokohtaiset elementtiverkon muutokset on esitetty kuvassa 19 magentan värisillä lohkojen reunoilla. Kuvan viitteissä on esitetty muutettu siementäajuus sekä kaarevuuden

hallinnan poikkeamakerroin, jos sitä on muutettu. Seuraavaksi määritetään verkolle muoto, joko heksagonin- tai tetraedrinmallinen elementtiverkko. Näiden eroavaisuudet on kerrottu aiemmin luvussa 4.2. Pilarikengän geometrian vuoksi heksagonielementtiverkko ei ollut mahdollinen, joten tavoitteena oli määrittää toisen kertaluvun tetraedrielementtiverkko (C3D10). Sen ollessa tarkempi ja laadukkaampi verrattuna lineaariseen tetraedriin (C3D4). Tetraedrielementtiverkon määrittäminen on esitetty kuvassa 18, c). Asetuksissa muutettiin ainoastaan verkon tyyppiä tetraedri (Tet) ja muut asetukset jätettiin oletuksiksi, niiden ollessa soveltuvia. Tämän jälkeen elementtiverkko rakennetaan, jonka jälkeen määritetään elementtityypin mukaiset asetukset. Jotka ovat esitetty kuvassa 18, d). Toisen kertaluvun elementtityyppi (quadratic) saadaan valittua kohdasta "Geometrisen järjestys" (Geometric order). Tämä asetus lisää jokaiseen tetraedrisen elementin sivuun keskelle solmun, joka tekee 4 solmuisesta 10 solmuisen elementin, joka lisää tulosten luotettavuutta. Elementtityypit käsitelty tarkemmin kappaleessa 4.2.

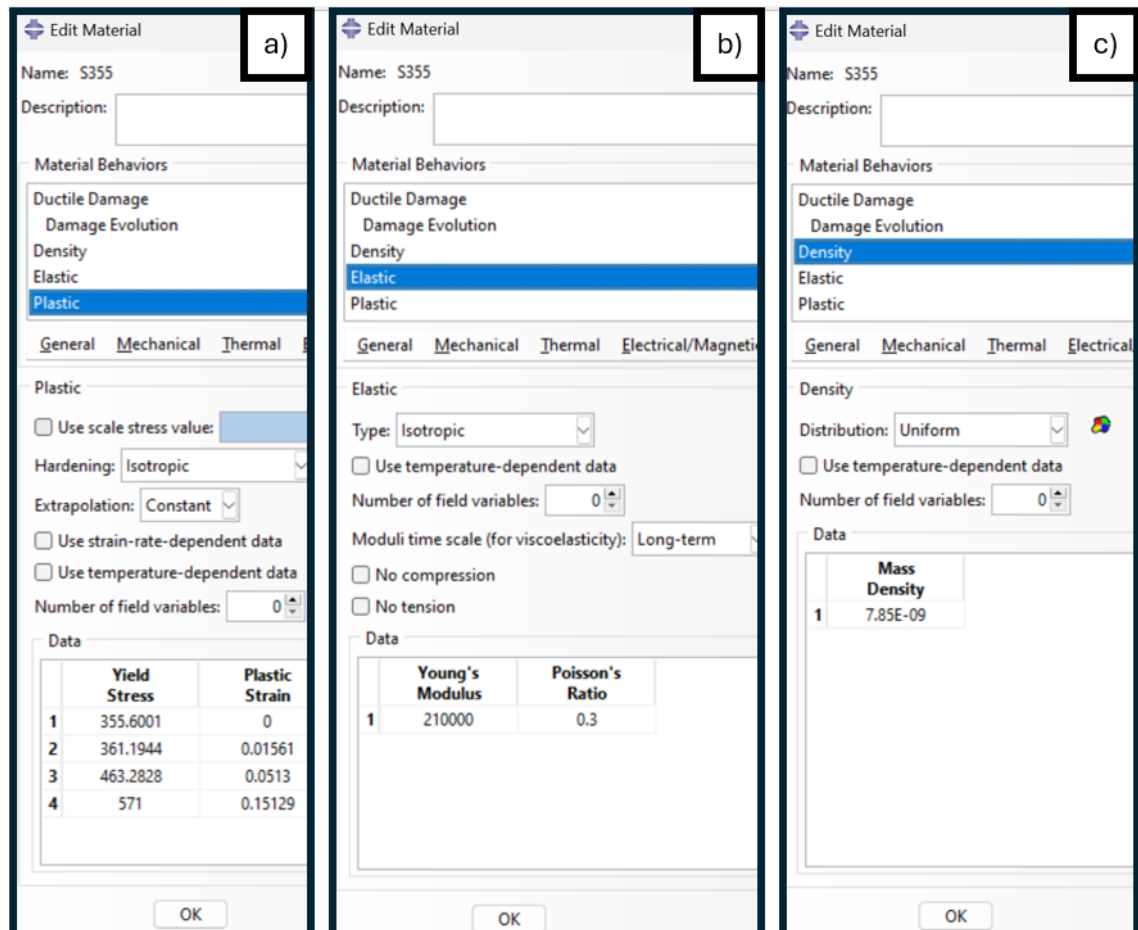
Mallinnuksen tavoitteena oli aluksi selvittää pilarikengän lopullinen murtumispiste sekä murtumismalli, joten ohjelmalle sallittiin elementtien poistaminen, kun niiden kapasiteetti ylittyy. Tämä asetus antaa ohjelmalle mahdollisuuden alkaa tehdä onkaloita rakenteeseen poistamalla elementtejä ennen koko rakenteen lopullista hajoamista. Tarkempi teoria on esitetty kappaleessa 4.3. Elementin hajoaminen (degradation) määritettiin tapahtuvan elementin kapasiteetin täyttävän 98 %. Elementin poiston mahdollistavat asetukset esitetty kuvassa 18, d).



Kuva 19. Elementtiverkon reunasiemennys eri lohkoille sekä tetraedrinen elementtiverkko, Abaqus.

## 5.5 Materiaalimallin määrittäminen

Laskentamallissa pilarikengän rungolla ja hitseillä käytetään alustavasti samaa materiaalimallia, vaikka ne ovat määritetty ja nimetty malliin erikseen. Materiaalimalli on määritetty pilarikengän rungolle ja hitseille prEN 1993-1-14 mukaan, käyttäen kuvassa 2 esitettyä vaihtoehtoa C (nelilineaarinen materiaalimalli). PrEN 1993-1-14 mukaiset materiaaliarvot on laskettu esistandardin perusteella ja löytyvät liitteestä 2. Ensimmäiseksi on määritetty plastiset ominaisuudet materiaalille, jotka on esitetty kuvassa 20, kohdassa a). Tämän jälkeen on määritetty kimmomoduuli ja Poisson-vakio kuvan 20, kohdan b) mukaan. Lisäksi määritettiin massa materiaalille kuvan 20, kohdan c) mukaan.

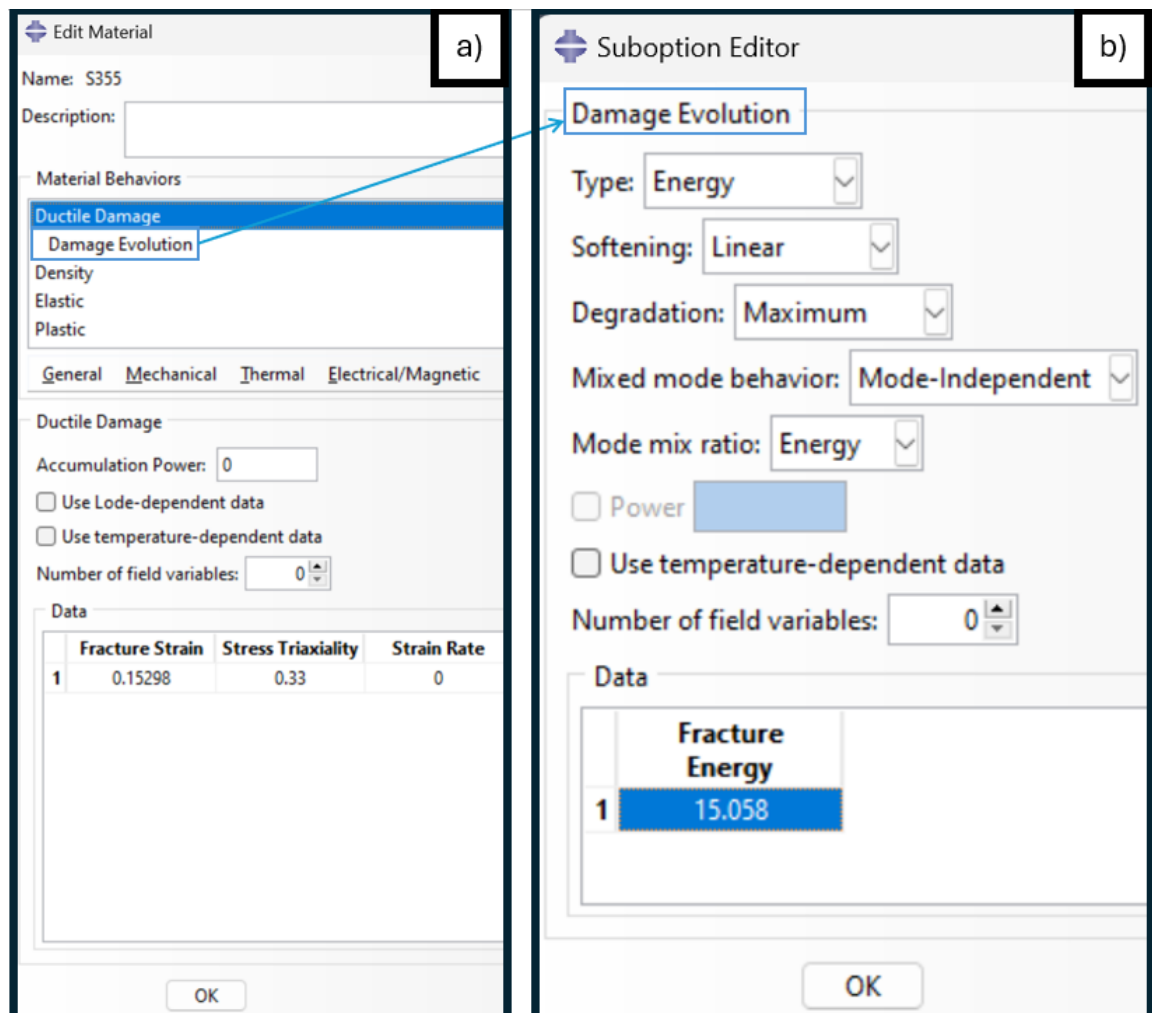


Kuva 20. Materiaalimalli, Abaqus.

Materiaalimalliin määritettiin myös sitkeän materiaalin murtokriteerit, koska esistandardin materiaalimalli sallii materiaalin plastisoitumisen, mutta ei sen pehmenemistä ennen murtoa. Tämän määrittäminen tarkoittaa hieman laskentaa murron loppuvaiheessa, kun halutaan tietää loppuvaiheen käyttäytyminen ja murtopiste, ennen kuin rakenne hajoaa kokonaan. Ekvivalentti plastinen venymä (Fracture Strain) on määritelty liitteen 2 mukaan, materiaalimallista saaduilla arvoilla. Jännityksen kolmiaksisuus (stress triaxiality) määritteenään kaavan (13) mukaan ja saadaan tulokseksi 0,33. Tarkempi laskelma esitetty liitteessä 3. Simulointimalliin määritetyt asetukset on esitetty kuvassa 21, kohdassa).

Vaurioitumisen kehittyminen Abaqus-ohjelmassa on kerrottu tarkemmin luvussa 4.3. Tähän valittu määrittäykseksi murtumisenergia, joka lasketaan kaavalla (20). Tarkempi laskenta esitetty liitteessä 2, sivulla 1(4). Pehmenemismuotona on käytetty lineaarista mallia. Abaqus-ohjelmaan asetetut asetukset on esitetty kuvassa 21, kohdassa b). Vaurioitumisevoluution asetukset ei laskentamallin kannalta ole kriittisessä asemassa, koska pilarikengän katsotaan menettäneen lujuutensa

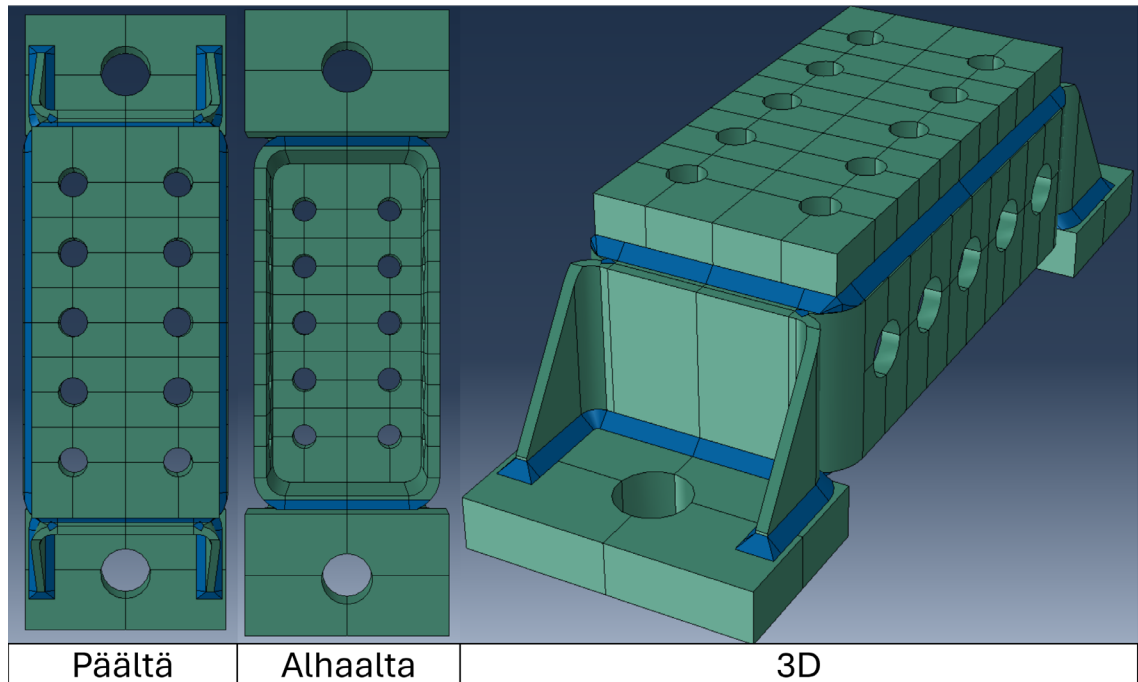
jo ennen kuin kappaleet kokonaan irtoavat toisistaan. Implisiittisessä laskennassa laskenta keskeytyy ennen tämän tapahtumista, mutta pehmenemisen alkuvaihe on kuvaajassa nähtävillä. Tässä kohdassa rakenteeseen on jo alkanut syntyä onkaloita ennen lopullista pettämistä. Eksplisiittinen laskenta mahdollistaa rakenteen kappaleiden irtoamisen kokonaan toisistaan, mutta tämä tieto ei lujuuden pettämisen jälkeen ole relevanttia tässä tarkastelussa (Christine Obbink-Huizer, 2025). Vaurioitumisen kehittymisen määrittämiseen tarvittava murtovenymä ( $\epsilon_f^{pl}$ ) on oletettu tutkimuksesta, jonka ovat tehneet Mengfei Li, Ho-Cheung Ho, K.F. Chung ja D.A. Nethercot, vuonna 2025. Tämän tutkimuksen tuloksista murtovenymäksi on oletettu 24 % (Li ym., 2025).



Kuva 21. Sitkeän murtuman ja vaurioitumiskehittymisen määrittäminen, Abaqus.

Hitsien materiaalmalli on määritelty erikseen, mutta se on kuitenkin määrittämissään identtinen rungon materiaalmallin kanssa, jotta tarvittaessa materiaalmallit

ovat helpompia päivittää erikseen rungon ja/tai hitsien osalta myöhemmässä vaiheessa. Kuvassa 22 on osat väreillä eriteltynä seuraavasti: Sinisellä hitsit ja vihreällä runko.



Kuva 22. Pilarikengän runko ja hitsit eriteltynä, Abaqus.

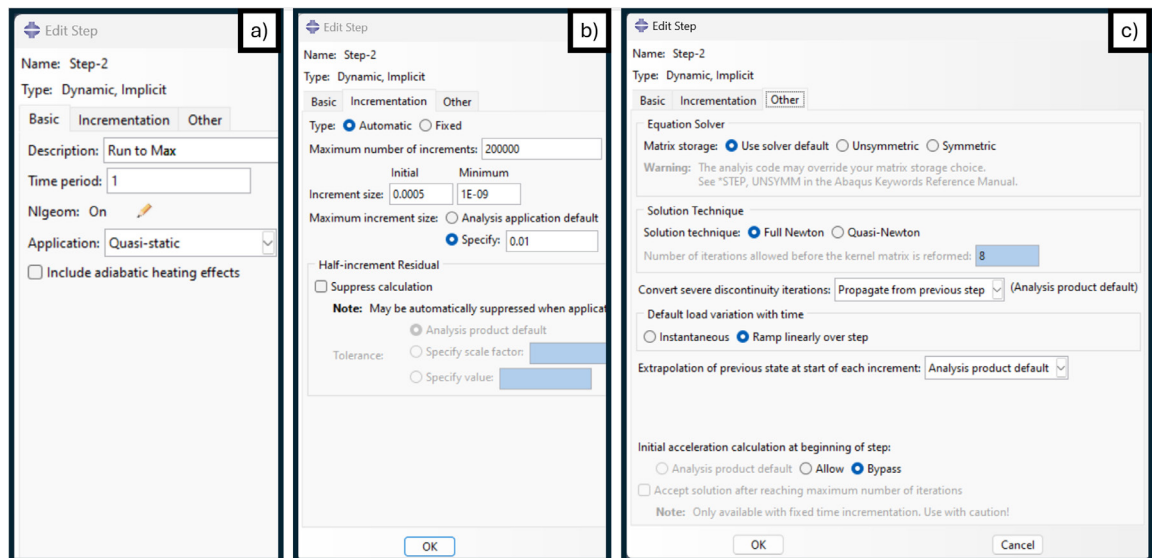
Peruspultteille ja liimaruuveille on myös laskettu materiaalimalli prEN 1993-1-14 mukaan, käyttäen kuvassa 2 esitettyä vaihtoehtoa C (nelilineaarinen materiaalmalli). PrEN 1993-1-14 mukaiset materiaaliarvot on laskettu esistandardin perusteella ja löytyvät liitteestä 2. Materiaaliarvot on saatu Peikon Hulco-ankkuripultit teknisestä käyttöohjeesta (Peikko, 2024). Näiden osalta ei kuitenkaan määritetty sitkeää murtumaa, koska peruspulttien ja liimaruuvien osalta haluttiin mallintaa vain niiden käyttäytyminen, kuten muodonmuutos rasituksessa, mutta ei esimerkiksi tarkastella niiden kestävyyttä. Koska kapasiteetit määritetään valmistajan ohjeen mukaan suunniteltaessa rakennetta. Peruspulttien aluslevyt on määritetty samalla materiaalimallilla (S355), kuin pilarikengän runko, mutta myöskään siihen ei määritetty sitkeän murtuman asetuksia.

## 5.6 Simulointiasetusten määrittämiset

### 5.6.1 Step-moduuli

Abaqus-ohjelman Step-moduulissa määritetään analyysivaiheen fysiikka, kuten ratkaisutapa ja aikamittakaava. Siinä määritetään mitä ilmiöitä ratkaistaan ja miten vaikeat epälineaarisuudet kuten geometria, materiaali ja kontakti käsitellään. Tyypillisiä steppejä ovat staattinen (Static), yleinen (General, kvasistaattinen, Newton–Raphson) ja dynaaminen (dynamic). Step-moduulissa aktivoidaan kuormat ja reunaehdot (boundary conditions) ja valitaan niiden taajuudet (amplitud). Implisiittinen ja eksplisiittinen valinta vaikuttaa suoraan vakautus- ja aikaskaala- ehtoihin ja laskenta-aikaan.

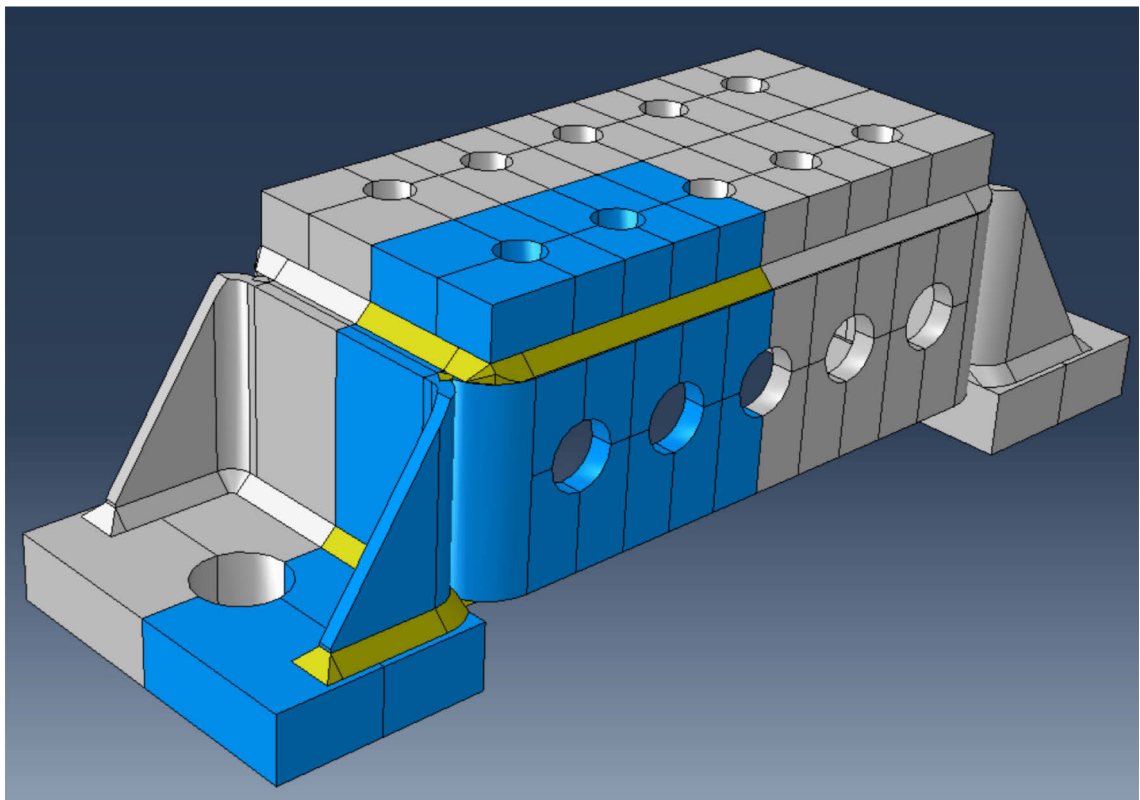
Laskentamallissa käytetyt Step-asetukset on esitetty kuvassa 23, kohdissa a), b) ja c). Mallin asetusten iteroinneissa inkrementin asetuksia on jouduttu muuttamaan useasti, jotta saatiin laskenta ensiksi lähtemään käyntiin ja toteutumaan haluttuun pisteeseen asti sekä laskenta-aika pysymään kannattavana.



Kuva 23. Step-asetukset, Abaqus.

## 5.6.2 Laskentakustannusten hallinta

Laskentamallin kasvettua niin suureksi, että käytössä olleen tietokoneen kapasiteetti loppui käytännössä kesken, oli siirryttävä simuloimaan ainoastaan osaa pilarikengästä. Koska pilarikengä on kaksoissymmetrinen ja tarkasteltava tilanne on keskeisesti kuormitettu, päätettiin simulointimalli pienentää käsittämään ainoastaan neljäsosaa pilarikengästä. Mallin neljäsosan laskeminen ei vaikuta tuloksiin muuten kuin saatujen tulosten osalta vetorasitus on kerrottava neljällä, jotta saadaan koko pilarikengään vaikuttava voima tietyllä siirtymällä. Tällä tavoin saatiin laskentaongelma ja kustannukset hallittua realistisiksi toteuttaa. Mallin pienentäminen neljäsosaan vähentää elementtien määrän käytännössä noin neljännekseen aikaisemmasta. Simuloinnissa muutoksen jälkeen tarkasteltava geometria on esitetty kuvassa 24, jossa sinisellä pilarikengän runko, keltaisella hitsit ja harmaalla poistettavat osat, joilla pienennetään laskentaongelmaa. Myös peruspultti ja liimaruuvi puolitettiin leikkauksen kohdalta. Tästä eteenpäin opinnäytetyössä käsitellään pilarikengän neljännestä simuloinnin osalta.



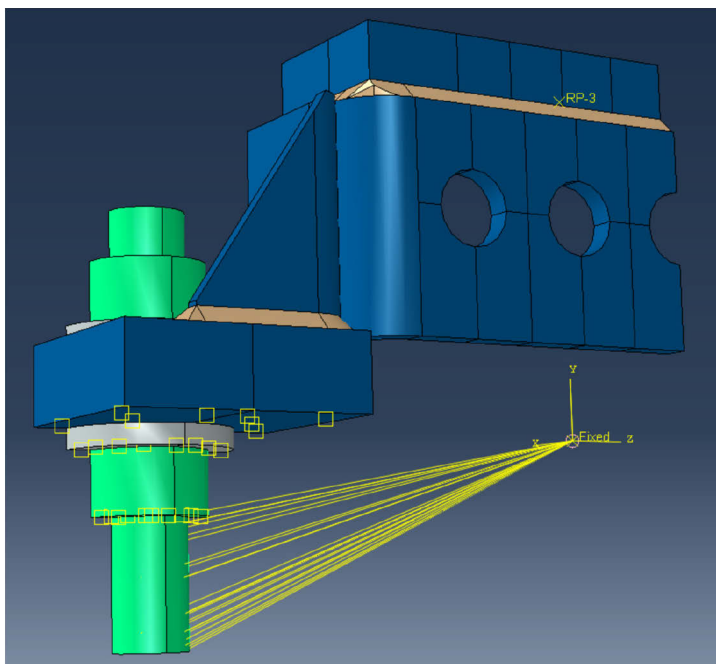
Kuva 24. Kustannusten hallinta pienentämällä laskentamallia, Abaqus

## 5.7 Reunaehdot (Boundary conditions)

### 5.7.1 Tukien määrittäminen

Pilarikengän FEM-malliin on määritetty alalaipan alapintaan interactions-moduulissa elastinen perustus (elastic foundation). Pilarikengä valetaan juotosbetonilla, joka tukee ja jäykistää pilarikengää ja rajoittaa osaltaan sen muodonmuutoksia. Malliin määritettiin juotosbetoniksi 600/3, C50/60. Betonin puristuslujuuden laskenta-arvoksi saatiin SFS-EN 1992-1-1:2015 mukaan laskettuna 28.33 MPa, joka määritettiin "elastic foundation"-työkalulla. Laskelmat on esitetty liitteessä 4. Asetuksella määritetyt pinnat on esitetty kuvassa 25 alalaipan alapinnassa ja peruspulttien aluslevyn ja mutterin alapinnoissa keltaisilla neliöillä. Määrittäminen tukee pilarikengän alapintaa alaspäin siirtymisessä betonin lujuuden määrityksen mukaisesti, mutta mahdollistaa sen siirtymisen muissa suunnissa. (SFS-EN 1992-1-1/A1:en, 2015)

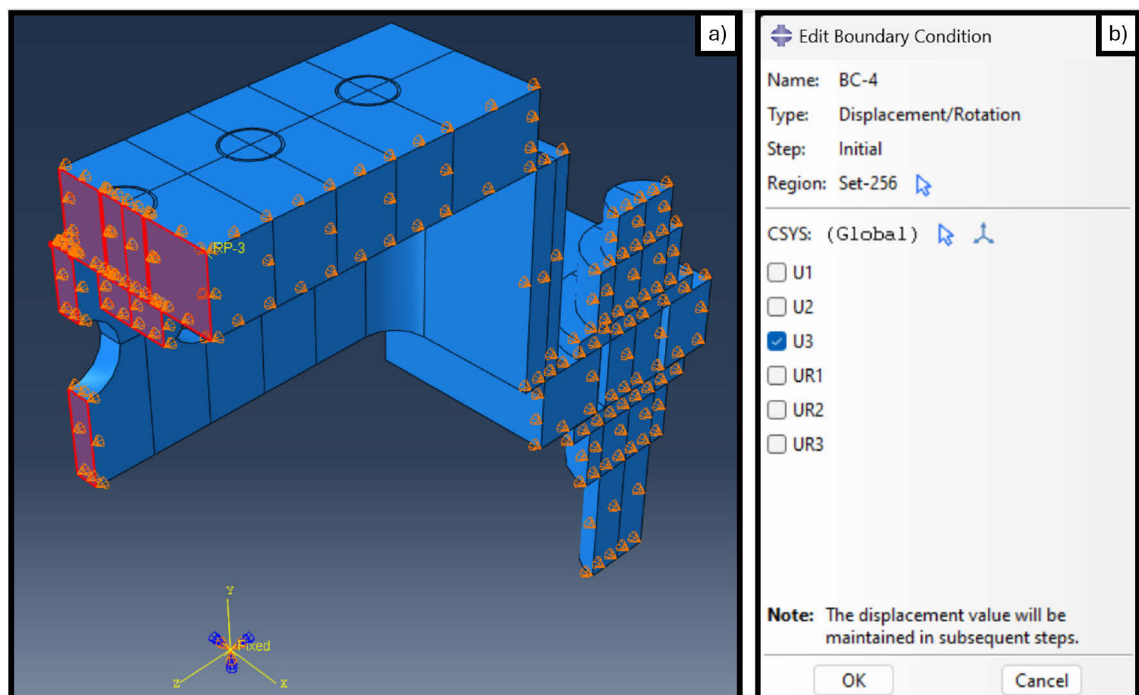
Peruspulttien kiinnitys on määritetty peruspistettä (reference point), johon peruspulttien varsi on kiinnitetty jäykästi. Peruspulttien kiinnitys peruspisteeseen on esitetty kuvassa 25 ja kuvassa 28 keltaisella viivoituksella kiinnityspinnasta peruspisteeseen nimeltä "Fixed". Kiinnitys rajoittuu mutterin alapuolelle. Peruspiste sijaitsee alalaipan alapinnassa keskeisesti kokonaiseen pilarikengään nähden.



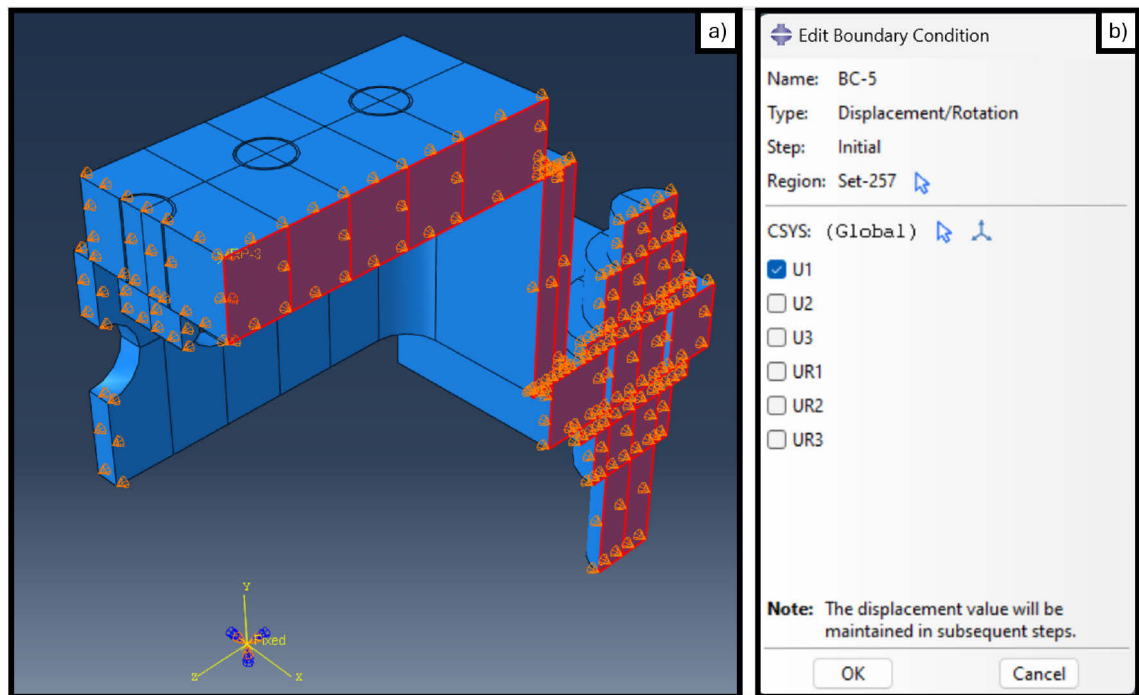
Kuva 25. Neljäosan pilarikengän juotosvalu ja peruspulttien kiinnitys, Abaqus

### 5.7.2 Lisätukien määrittäminen

Koska simulointimallia jouduttiin optimoimaan laskennan kustannusten vuoksi, simuloitava neljäsosa pilarikengästä oli saatava käyttäytymään samalla tavoin kokonaiseen simulointimalliin verrattuna. Geometrian leikkauspintoihin määritettiin vaakasuunnan estävä tuki pintaa vastaa. Tämä saa mallin käyttäytymään kuin esimerkiksi alalaippa jatkuisi yhtenäisenä leikkauspinnan yli. Leikkauspinta pysyy kuormituksessa sivusuunnassa paikallaan ainoastaan ideaalisen geometrian ja kuormituksen vuoksi. Jos esimerkiksi kuormituksessa olisi huomioitu epäkeski-syyttä, niin olisi määritettävä jokin toinen tapa kiinnittää leikkauspinta. Kuvassa 26, a) on esitetty pituussuuntaa vastaan leikatun pinnan tukialueet ja kuvassa 26, b) on esitetty asetus, jolla vaakasuunta on estetty leikkauspintaa vastaan. Kuvassa 27, a) on esitetty pituussuunnan mukaisesti leikatun pinnan tukialueet ja kuvassa 27, b) on esitetty asetus, jolla vaakasuunta on estetty leikkauspintaa vastaan. Kuvissa 26 ja 27 on esitetty myös globaali koordinaatisto. Tukiasetuksissa esitetyt suunnat tarkoittavat seuraavaa globaalissa koordinaatistossa: U1 = X-suunta (pilarikengän pituussuunta, U2 = Y-suunta (pystysuunta) ja U3 = Z-suunta (pilarikengän poikkisuunta)



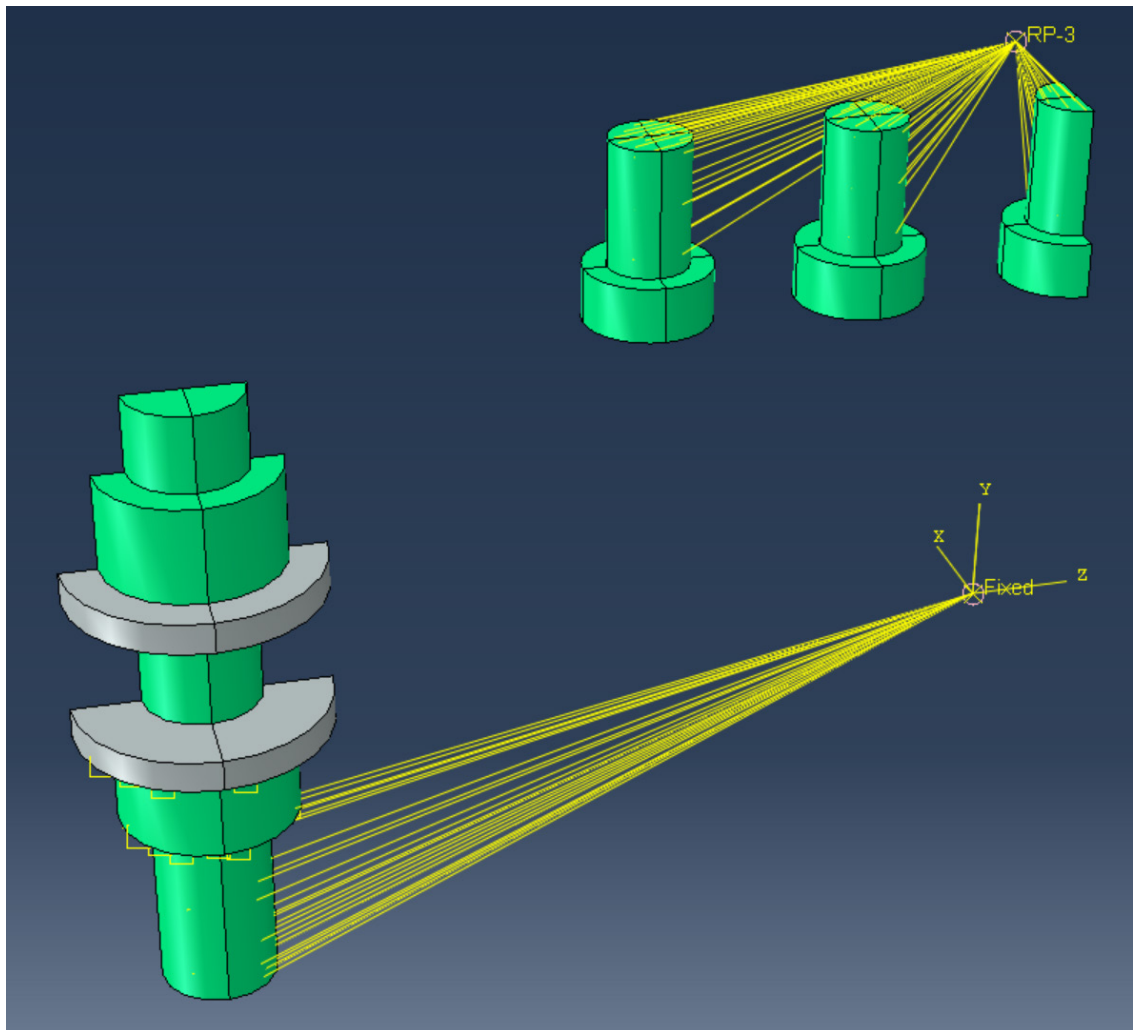
Kuva 26. Pituussuunnan vastaisen leikkauspinnan tuen määrittäminen, Abaqus.



Kuva 27. Pituussuunnan mukaisen leikkauspinnan tuen määrittäminen, Abaqus.

### 5.7.3 Kuormien määrittäminen

Pilarikengän keskeinen vetokuormitus on määritetty myös peruspisteen kautta. Kuvassa 28 on esitetty keltaisilla viivoilla liimatankojen pinnoista kiinnitykset peruspisteeseen nimeltä "RP-3". Pilarikengä on piilotettu kuvasta. Kun peruspisteelle RP-3 määritetään siirtymä, niin siirtymästä aiheutuvat rasitukset jakautuvat yhtä suurina kaikille liimatangoille. Kun peruspiste RP-3 alkaa siirtymään ylöspäin pilarikengän alkaa rasitukset siirtymään liimatankojen kautta pilarikengään ja tätä kautta peruspulteille. Näiden tulosten perusteella on mahdollista selvittää pilarikengän kestävyys ja tarkastella sen jäykkyyttä siirtymien mukaan.

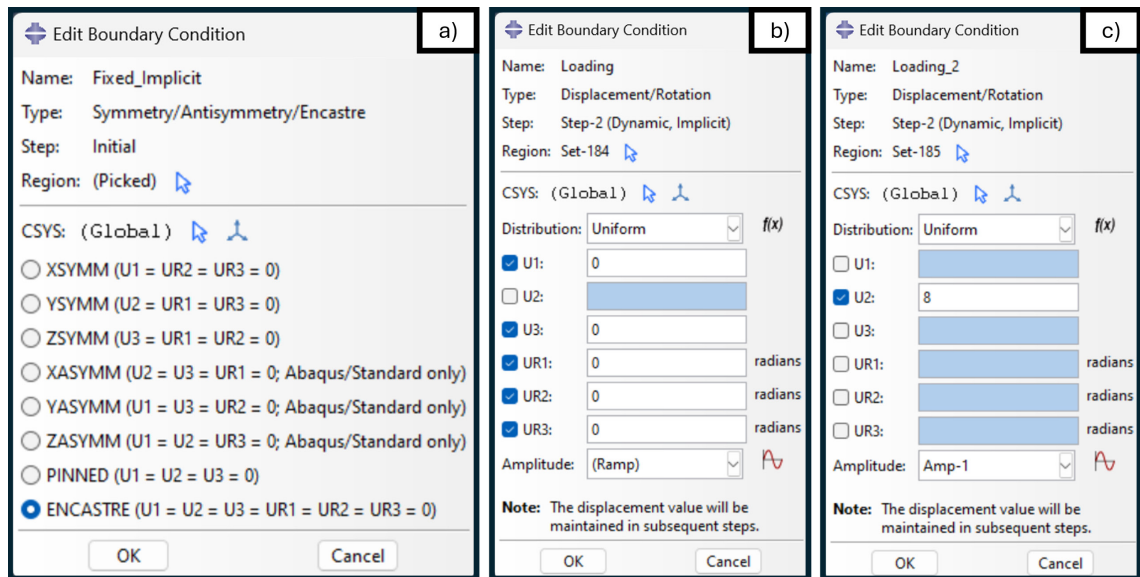


Kuva 28. Neljäsosa pilarikengän kuormituksen- ja tuen peruspiste, Abaqus

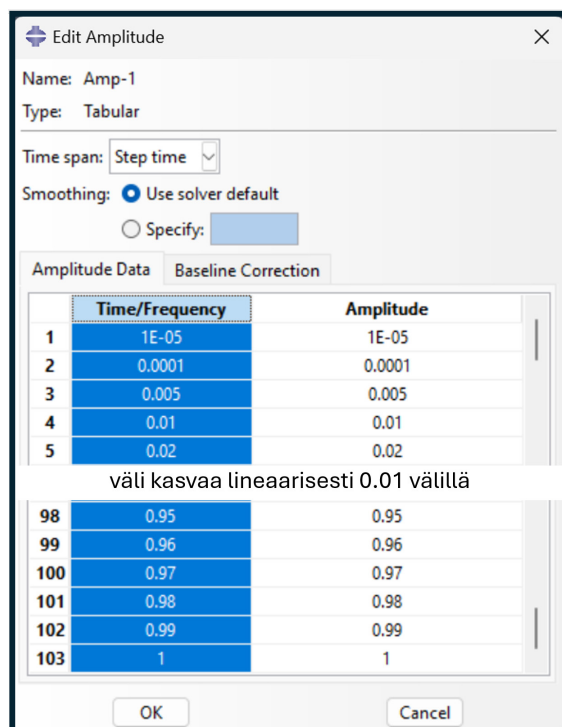
Perustuksien ehdoksi on määritetty jäykkä kiinnitys, joka on osoitettu Fixed-peruspisteelle. Kuvassa 29, a) on esitetty asetusvalikon määrittäminen.

Siirtymä määritettiin peruspisteelle nimeltä RP-3. Koska tarkoituksena oli selvittää murtumismekanismi pilarikengälle, niin siirtymäksi valittiin 25 mm. Tämän siirtymän jossain vaiheessa oletettavasti pilarikengän lujuus pettää ja pilarikengä murtuu. Tämä aiheutti kuitenkin simuloinnin myöhemmässä vaiheessa ongelmia ja hienolla elementtiverkolla määritetty laskenta ei onnistunut käynnistymään. Jotta laskenta saatiin käynnistymään, niin siirtymä laskettiin 8 mm. Tämä siirtymä on myös riittävä määriteltäessä pilarikengän kapasiteettia ja murtumispistettä. Kuvassa 29 kohdissa b) ja c) on esitetty siirtymäehdon toteutus kahdessa osassa. Kohdassa b) on tuettu peruspisteen RP-3 siirtymä kaikista muista suunnista paitsi pystysuunnasta (y-suunta, Abaqus), joka on jätetty vapaaksi. Kohdassa c) on määritetty y-suunnan siirtymäksi edellä mainittu 8 mm ja muut kohdat

jätetty vapaaksi. Kuormituksen taajuus (amplitude) on määritetty kuvan 30 mukaan. Asetus on taulukoitu niin, että aika ja taajuus alkaa 0.00005, jonka jälkeen askeleet hyppäävät 0.0001, 0.005 josta 0.01. Tällä vältetään 0 askeleen alussa, mikä pehmentää käynnistystä ja ehkäisee kontaktin tai jäykän kappaleen singulariteettiherkkyyttä. Tämän jälkeen askeleet kasvavat lineaarisesti 0.01 askeleella välillä 0.01–1. Toisin sanoen, jos siirtymäksi on asetettu 8 mm ja aika stepissä on 0.375, niin siirtymä on silloin noin 3 mm.



Kuva 29. Reunaehdot, Abaqus



Kuva 30. Kuormitustaajuus, Abaqus

## 6 FEM-MALLIN VERIFIOINTI

Tässä opinnäytetyössä FEM-mallin validointi ja laboratoriokokeet jätetään ulkopuolelle, käytettävissä olevien resurssien vuoksi. FEM-malli verifioidaan prEN 1993-1-14 mukaan. Verifiointiperiaatteet on käsitelty luvussa 3.7.1 Verifiointi. Otsikon suluissa oleva kirjain viittaa kappaleessa käsiteltyihin kohtiin. Verifiointi on sisällytetty opinnäytetyöhön ja se on listattuna alla:

### 6.1 Diskretointivirheen tarkastelu (a)

Viimeisimmän simulaation tuloksia verrataan aikaisempaan samoilla laskenta-asetuksilla, mutta karkeammalla elementtiverkolla tehtyyn simulaatioon. Tuloksien tulisi pysyä lähellä toisiaan simulaatioiden välillä, jotta voidaan todeta elementtiverkon riittävyys laskennassa. Karkeassa laskennassa laskentaongelman koko verrattuna viimeisimpään, hienommalla elementtiverkolla tehtyyn simulaatioon oli huomattavasti pienempi. Laskentaongelman koon vertailu on esitetty taulukossa 5. Tästä nähdään hyvin kuinka hienompi elementtiverkko kriittisissä alueissa nostaa simuloinnin kustannuksia reilusti. Tässä tapauksessa simulointiongelma on käytännössä yli kaksinkertaistunut. Tämä on lähes suoraan verrannollinen simulointiaikaan. Huonolaatuisten elementtien määrä karkeassa verkossa oli 37 kappaletta, mikä on 0.0164293 % koko mallin elementeistä. Tämä on melkein kaksi ja puolikertainen määrä huonolaatuisia elementtejä verrattuna hienoon elementtiverkkoon. Mutta kuten tuloksista voi päätellä, niin vähäinen määrä yksittäisiä huonolaatuisia elementtejä ei vaikuta oleellisesti laskentatuloksiin.

Liitteessä 6 on esitetty siirtymä-voimakuvaajien erot taulukkomuodossa hienolla ja karkealla elementtiverkolla. Karkean elementtiverkon simulointi kesti noin 13 tuntia pisteeseen, johon se jumittui, eikä päässyt yli. Laskenta oli edennyt tähän pisteeseen mennessä 47 % kokonaissimuloinnista. Tämä on ajallisesti noin 20 tuntia vähemmän ja simulointi suoritti yli 7 % enemmän laskentaa kuin hienolla elementtiverkolla. Joten voidaan todeta, että karkean verkon simulointi on huomattavasti edullisempi kuin hienolla verkolla. Simulointien erot vetokuormituksen suhteet ovat noin 0.25 % aina 2.6 millimetrin siirtymään asti, jonka jälkeen erot

hieman muuttuvat mutta pysyvät alle 1 % laskennan loppuun asti. Karkeassa simuloinnissa vetokuormitus on pääsääntöisesti yhdestä kolmeen kilonewtonia enemmän verrattuna hienon verkon simulointiin. Tuloksien perusteelle voimme pitää elementtiverkkoa riittävänä tulosten kannalta ja voidaan todeta, että tulokset eivät muutu enää, vaikka elementtiverkkoa hienonnettaisiin lisää.

## **6.2 Syöttötietojen herkkyyshanalyysi (b)**

Tässä osassa on käsitelty kappaleen 3.7.1 b-kohdan analyysia. Tässä analyysissä selvitettiin ainoastaan pilarikengän vetokestävyyttä. Analyysityypiksi valikoitui kappaleen 3.6 mukainen GMNA-analyysi, jossa huomioidaan epälineaarinen materiaali ja geometria ilman geometrian epätarkkuuksia (ks. taulukko 2). FEM-mallin tuloksiin vaikuttavat tekijät on listattu alla:

### **1. Kuormasta johtuva vetorasitus**

- a. Esitetty luvussa 5.7.3 Kuormien määrittäminen

### **2. Tuet**

- a. Esitetty luvussa 5.7.1 Tukien määrittäminen

### **3. Materiaalimalli**

- a. Esitetty luvussa 5.5 Materiaalimallin määrittäminen

### **4. Geometrinen malli ja sen toimivuus**

- a. Esitetty luvussa 5.2 Geometrinen malli

### **5. Keskinäiset vaikutukset mallissa**

- a. Esitetty luvussa 5.3 Keskinäisten vaikutuksien määrittäminen (Interactions)

## **6.3 Epätarkkuuksien herkkyyshanalyysi (tarvittaessa) (c)**

Tässä on käsitelty kappaleen 3.7.1 c-kohdan analyysia. Geometrisia epätarkkuuksia ei tässä tarkastelussa otettu huomioon. Vetorasituksen oletetaan kohdistuvan pilarikengälle täysin keskeisesti ja kuormien jakautuvan liimaruuveille tasanaisesti. Peruspulttien liitos on myös oletettu olevan täysin keskeinen.

Materiaalien epätarkkuus on otettu huomioon määriteltäessä pilarikengän alle tulevan juotosvalun lujuutta. Määrittäminen on tehty SFS-EN 1992-1-1:2015 mukaan, jonka laskelma on esitetty liitteessä 4. Myös pilarikengän ja kiinnitysosien materiaaliset epätarkkuudet on otettu huomioon EN 1993-1-14 mukaan, käyttäen materiaalmallia c), joka on esitetty luvussa 5.5 Materiaalimallin määrittäminen.

#### 6.4 Analyttinen mitoituslaskelma (Insinöörin päätökset) (d)

Tässä on käsitelty kappaleen 3.7.1 d-kohdan analyysia. Pilarikengän simuloinnin kestävyysvertailuarvoiksi on tarkasteltu pilarikengän lopputilannetta yksinkertaistetulla käsinlaskennalla. Lopputilanteessa liimaruuvien ja peruspulttien on oletettu välittävän kuormat pilarikengälle symmetrisesti. Lopputilanteessa on myös oletettu, että suuria sivusiirtymiä ja muodonmuutoksia ei pilarikengässä synny juotosvalun vuoksi. Voidaan kuitenkin olettaa, että juotosvalun kutistumasta johtuen pilarikengän osien taipumat ovat mahdollisia. Asennustilannetta ei ole tarkasteltu tässä työssä erikseen, eli tilannetta, jossa juotosvalua ei vielä pilarikengän ympärillä ole.

Simuloinnin tulosten vertailukelpoisuuden varmistamiseksi sekä pilarikengän kapasiteetin alustavan suuruusluokan määrittämiseksi tehtiin vertailulaskelmat. Laskelmat on tehty A-Insinöörit Oy:n Liimapuupilarikengän laskelmaselostusta (Versio C. 5.2.2015) soveltamalla, sekä hitsien maksimikestävyys on tarkistettu SFS-EN 1993-1-8:2024 mukaan. Pilarikengän yhden puolen mitoittava kuorma on laskettu kaavalla (23),

$$F_{el} = \frac{f_y}{\frac{\sqrt{3}}{l_s \cdot t} + \left( \frac{W_{el.1}}{W_{el.2} + W_{el.3}} \cdot \frac{e}{W_{el.1}} \right)} \quad (23)$$

jossa

$W_{el.i}$

levyn kimmainen taivutusvastus,

$\sqrt{3}$

leikkausvoimasta aiheutuva jännityksen kerroin,

$l_s$

leikkautuvan alueen piiri ja

*e* laipan kuormituksen epäkeskisyys. (Kortelainen, 2015)

Hitsien kapasiteetti on tarkastettu SFS-EN 1993-1-8 mukaan yksinkertaistetulla menetelmällä. Hitsien kestävyysmitoitussarvo saadaan kaavalla (24),

$$F_{w.Rd} = f_{vw.d} \cdot a \quad (24)$$

jossa

*a* on hitsin *a*-mitta  
*f<sub>vw.d</sub>* hitsin leikkauslujuuden mitoitussarvo, joka lasketaan kaavalla (25).

$$f_{vw.d} = \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} \quad (25)$$

jossa

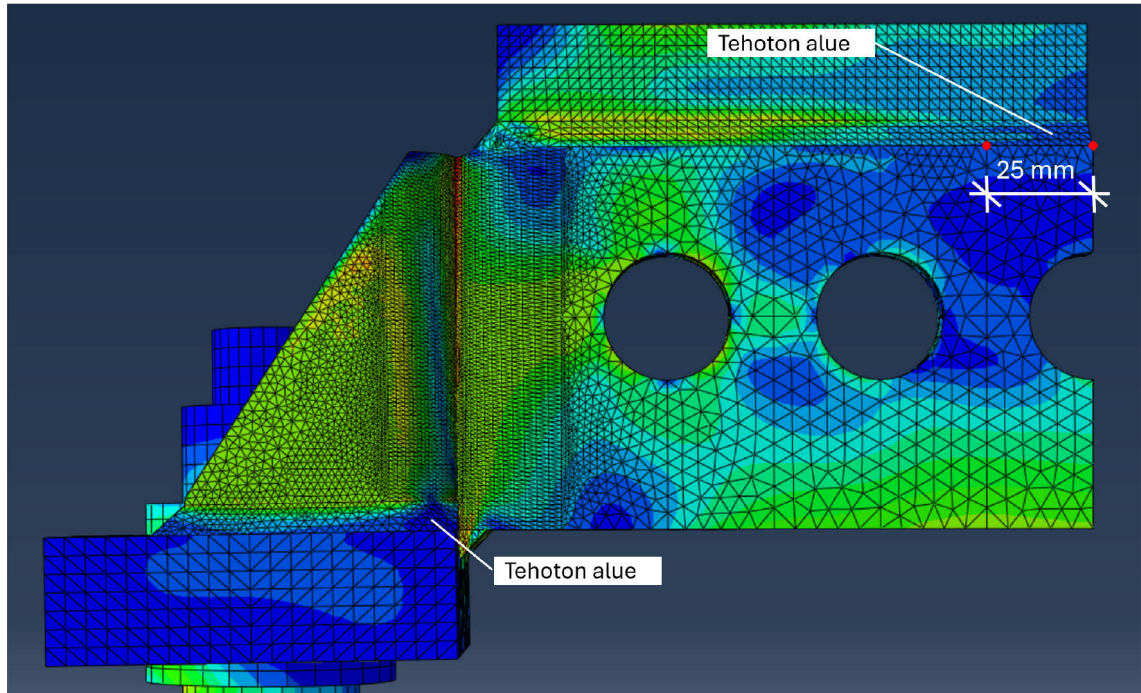
*β<sub>w</sub>* on EN 1993-1-8 taulukon 4.1 mukainen korrelaatiokerroin.

*f<sub>u</sub>* on heikomman liitettävän osan vetomurtolujuuden nimellisarvo

*γ<sub>M2</sub>* on EN 1993-1-8 taulukon 2.1 mukainen osavarmuusluku. (SFS-EN 1993-1-8:2024:en, 2024)

Hitsien teholliset pituudet laskettiin lähtötietojen perusteella ja alustavien simulaatioiden pohjalta tehtiin vähennyksiä toimimattomien hitsien osalta. Ylälaipan hitseistä vähennettiin ylälaipan keskeltä pidempien sivujen hitseistä 50 mm, joihin jännitysten jakautumisesta. Ylälaipan päädyssä tehollinen hitsin pituus on huomioitu siltä osin, kun hitsi mahtuu kokonaisuudessaan sivutuen päälle. Sivutuen hitsien tehollisesta pituudesta on vähennetty ulkonurkkien kaarevan muodon pituudesta puolet. Tehottomaksi oletetut alueet on esitetty kuvassa 31. Kuvassa jännitys jakauma pilarikengässä kuormituksessa. Tummempaan sinisillä

alueilla jännitykset ovat pieniä verrattuna muihin alueisiin. Tarkemmat laskelmat on esitetty liitteessä 5.



Kuva 31. Hitsinen tehottomat alueet.

Ylälaipan mitoituksessa huomioitiin liimaruuveille tarkoitetut reiät vähentämällä niiden osuus poikkileikkauksesta. Ylälaipalle laskettiin kimmainen taivutusvastus kaavan (26) mukaan.

$$W_{el} = \frac{hb^2}{6} \quad (26)$$

Ylälaipasta tarkistettiin myös liimaruuvien lävistyskestävyys kaavalla (27). (SSAB, 2016, s.217)

$$B_{p.Rd} = 0,6\pi d_m t_p f_u / \gamma_{M2} \quad (27)$$

jossa

$d_m$

on lävistymishalkaisija,

$t_p$

on laipan paksuus,

$f_u$

on laipan nimellinen murtolujuus ja

$\gamma_{M2}$ 

on kestävyuden osavarmuusluku. (taulukko 2.5, (SSAB, 2016)

Pilarikengän uuman kimmainen taivutusvastus on saatu SSAB rakenneputket käsikirjan taulukosta 11.1.6. Mitoituksessa käytettiin taivutusvastuksen puolikasta, koska laskenta suoritettiin toiselle uumalle eikä koko rakenteelle. Mitoituksessa tarkistettiin reikien vaikutuksen huomioinnin tarve SSAB rakenneputket käsikirjan (2016, s.82) mukaan ja tarkastuksen perusteella pienennettiin puolikkaan rakenneputken taivutusvastus 43 %, jolloin saatiin ehto täyttymään (ks. liite 5).

Alalaipan kestävyys tarkasteltiin samojen periaatteiden mukaan kuin ylälaippa. Siitä tarkastettiin peruspultin lävistyskestävyys kaavan (27) mukaan ja taivutusvastus kaava (26) mukaan. Alalaipan teholliseksi poikkileikkaukseksi oletettiin konservatiivisesti alalaipan keskilinja, josta vähennettiin reikien (40 mm) osuus.

Tarkemmat laskelmat on esitetty liitteessä 5. Pilarikengän mitoittavaksi tekijäksi voidaan tämän laskelman perusteella olettaa ylälaipan hitsien kestävyys ja täten koko pilarikengän kestävyudeksi alustavasti saadaan 881,8 kN. Toiseksi heikoin osa laskelman perusteella on sivutuen hitsiliitos RHS-runkoon, jonka mukaan pilarikengän kapasiteetti on 934,4 kN. Tämä laskelma ei ota kantaa jännitysten jakautumiseen liitoksessa vaan perustuu mitoitukseen hitsien pituuden mukaan. Todellisuudessa kuormitustilanne on monimutkaisempi kuin yksinkertaistettu analyttinen laskenta. Analyttisen laskennan tulokset on listattu taulukossa 4.

Taulukko 4. Pilarikengän kokonaiskapasiteetti analyttisen laskeman perusteella.

<b>EB_TKCustom13 pilarikengän kokonaiskapasiteetti</b>	
<b>Mitoittavat osat:</b>	<b>kokonaiskapasiteetti</b>
Ylälaipan taivutus ja leikkaus:	1519,9 kN
Ylälaipan liimaruuvien lävistymiskestävyys:	6229,4 kN
Uuman normaalivoima ja taivutus:	1220,6 kN
Alalaipan taivutus ja leikkaus:	929,5 kN
Alalaipan hitsit:	1212,6 kN
Alalaipan ruuvien lävistymiskestävyys:	2122,6 kN
Ylälaipan hitsit:	881,8 kN
Sivutuen liitoksen hitsit:	934,4 kN
<b>Määrävä kapasiteetti:</b>	<b>881,8 kN</b>

## 6.5 Dokumentointi

PrEN 1993-1-14:2023 mukaan verifiointiprosessissa dokumentoidaan parametrit ja tarvittavat tiedot simuloinnista. Tämä on käsitelty kappaleessa 3.9, jossa on myös listattuna kaikki dokumentoinnissa esitettävät kohdat. Tässä opinnäytetyössä tehdyn simuloinnin dokumentaationa toimii itse opinnäytetyö kokonaisuudessaan ja tästä syystä erillistä dokumentaatiota ei esitetä. Luettavuuden helpottamiseksi dokumentointi on kuitenkin lueteltu tässä kappaleessa alla ja linkitetty kappaleisiin, joissa kutakin kohtaa käsitellään.

### a) Valitun elementtimallin nimi ja versio:

- Nimi: Job-43\_Implicit\_Quarter\_17-10-2025\_FINAL\_2.
- Versio: 43

### b) Geometrinen malli:

- Geometrinen malli esitetty kappaleessa 5.2 Geometrinen malli
- Elementtityyppi, elementtiverkko ja keskinäiset vaikutukset on esitetty kappaleessa 5.4 Elementtiverkon määrittäminen

### c) Materiaalimalli:

- Materiaalimalli on esitetty luvussa 5.5 Materiaalimallin määrittäminen ja laskelmat on esitetty liitteessä 2.

### d) Tuki- ja kuormamalli:

- Tuennat ja kuormitus on esitetty kappaleessa 5.7 Reunaehdot (Boundary conditions)

### e) Epäkeskisyydet:

- Ei tarkasteltu. Ei sisälly GMNA-analyysiin.

### f) Analyysityyppi ja konvergenssikriteerit (jos sovellettavissa):

- GMNA-analyysi. Konvergenssitarkastelu on esitetty kappaleessa 6.1.

**h) Murtumiskriteerit:**

- Murtumiskriteerien määrittäminen simulointiin on esitetty luvussa 5.4 Elementti-verkon määrittäminen. Kriittistä siirtymää ei ole määritetty.

**i) Mallin validoinnin ja todentamisen tulokset (jos sovellettavissa):**

- Validointia ei ole sovellettu.

**j) Analyysin tulokset:**

- Analyysin tulokset on esitetty kappaleessa 7 TULOKSET JA ANALYYSI.

**k) Tarkastettavat rajatilakriteerit:**

- Staattisen tarkastuksen perusteet on esitetty luvussa 6.4 Analyyttinen mitoituslaskelma (Insinöörin päätökset) (d)

## 7 TULOKSET JA ANALYYSI

### 7.1 Simuloinnin lähtötiedot, Abaqus

Simulointi alkoi 18.10 klo 00:22:30 ja päättyi virheeseen 19.10 klo 10:09:37. Laskenta kesti täten 33 tuntia 47 minuuttia. Simuloinnin koko ja lähtötiedot on esitetty taulukossa 5. Taulukosta voidaan huomata, että vaikka simulointiin on otettu vain neljäsosa pilarikengästä, niin simuloinnin kustannukset kasvavat erittäin suuriksi, kun halutaan tarkkoja tuloksia erittäin hienolla verkolla. Simuloinnin muuttujien kokonaismäärä kasvoi yli 3.7 miljoonaan, mikä on yli kaksinkertainen määrä verrattuna edellisen iteraatiokierroksen simulaatioon. Laskennassa käytettiin seitsemää prosessorin ydintä, joihin ohjelma jakoi elementit. Prosessoreille ohjelman jaottelemat elementit on esitetty taulukossa 6.

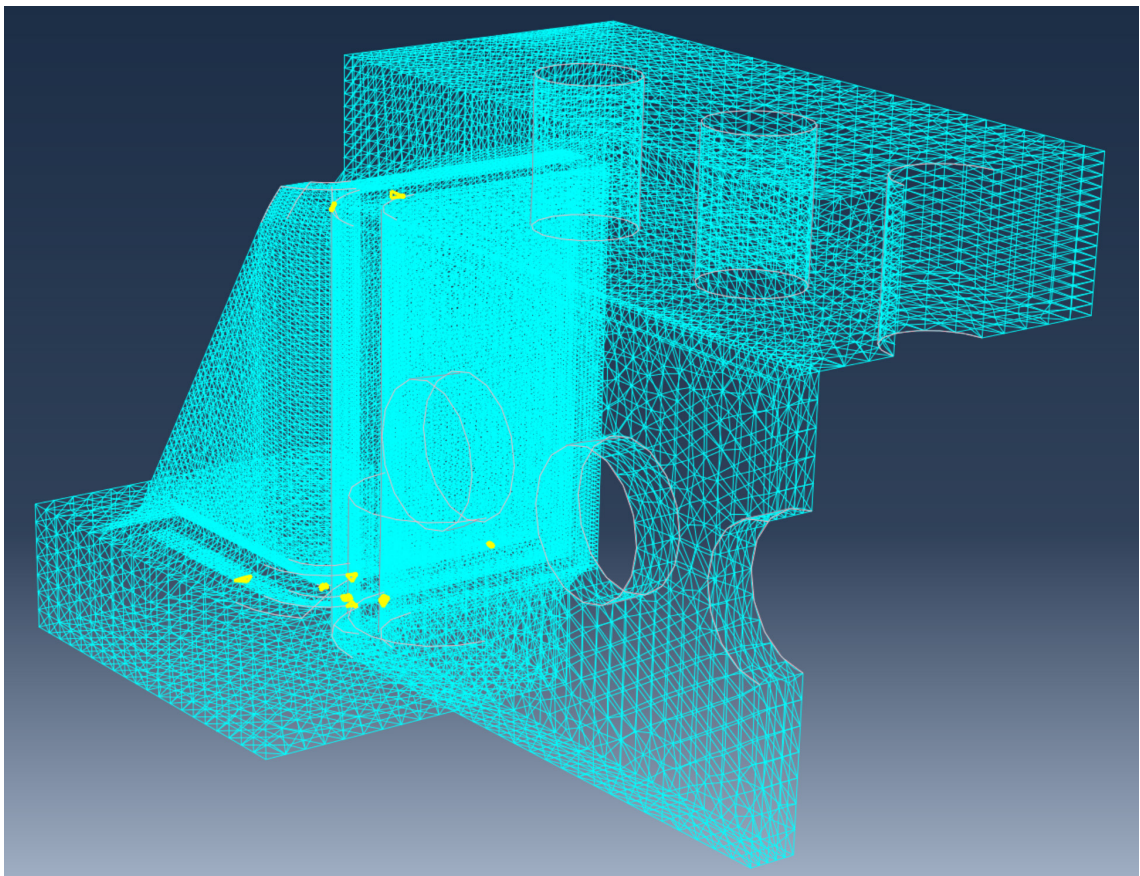
Taulukko 5. Simuloinnin laskentaongelman koko, Abaqus.

<b>Simuloinnin laskentaongelman koko, Abaqus</b>			
<b>Laskentaongelma</b>	<b>Elementtiverkko</b>		
	<b>Hieno</b>	<b>Karkea</b>	<b>Ero</b>
Elementtien määrä	507 890	228 841	54,9 %
Käyttäjän määrittämä elementtien määrä ja *tie	506 800	227 754	55,1 %
Kontaktia varten luettujen sisäisten elementtien määrä	1 090	1 087	0,3 %
Solmujen määrä on	1 238 278	564 433	54,4 %
Käyttäjän määrittämä solmujen määrä	731 844	337 051	53,9 %
Ohjelman luomien sisäisten solmujen määrä	506 434	227 382	55,1 %
Mallin muuttujien kokonaismäärä	3 713 457	1 691 931	54,4 %

Taulukko 6. Elementtien määrät useaa prosessoria käytettäessä, Abaqus

<b>Usean prosessorin käyttö (hieno elementtiverkko)</b>	
<b>Prosesessorinumero</b>	<b>Elementtien määrä/prosesessori</b>
1	71 696
2	72 896
3	72 376
4	72 672
5	72 408
6	72 768
7	73 074

Simuloinnin käynnistyttyä ohjelma tekee tarkastuksen. Tarkastuksen jälkeen ohjelma antoi oletetun varoituksen 15 elementistä, jotka ovat vääristyneitä geometrialtaan. Näiden elementtien isoparametriset kulmat ovat ehdotettujen rajojen ulkopuolella tai kolmio- tai tetraedrilaatumitta on huono. Huonolaatuisien elementtien määrä oli yli kymmenkertainen ennen verkon parannuksia. Käytännössä mallin verkotusta on paranneltu lohkomalla geometriaa ja verkon asetuksia muuttamalla, jolloin on päästy eroon mahdollisimman monesta huonolaatuisesta elementistä. Huonolaatuiset elementit eivät suoraan aiheuta ongelmaa laskennassa, mutta ne saattavat vaikeuttaa laskentaa ja heikentää tuloksia. Huonolaatuisten elementtien sijainnit on esitetty kuvassa 32. Kuvasta selviää, että huonolaatuiset elementit ovat yksittäisiä ja niiden suhteutettu määrä on hyvin pieni verrattuna koko mallin elementtimäärään, joten nämä voidaan jättää huomioimatta. Huonolaatuisia elementtejä on 0.00297469 % koko mallin elementeistä.



Kuva 32. Huonolaatuiset elementit keltaisella, neljäososan laskentamalli, Abaqus.

## 7.2 Simuloinnin loppu

Simulointi pysähtyi kokonaisaikaan ~40 % (0.390129), joka tarkoittaa noin 3,2 mm siirtymää rakenteessa. Pilarikengän käyttötarkoitukseen perustuen voidaan olettaa, että tämä simulointiaika on riittävä tuloksien saamiseksi. Kuvassa 33 on esitetty Abaqus-ohjelman simulointimonitori. Monitorista selviää muun muassa simuloinnin inkrementit, iteroinnit inkrementtiä kohden ja kokonaisaika. Tarkastelemalla aika-arvoja (kaikki eivät näy kuvassa) voidaan todeta, että laskenta oli alkanut hidastumaan, eikä se todennäköisesti olisi päässyt merkittävästi pidemmälle, vaikka ulkoisesta pyynnöstä johtuvaa pysäytystä ei olisi tullutkaan. Tämä keskeytys johtui todennäköisesti lisenssin pois putoamisesta pitkään kestäneen laskennan aikana.

Job-43\_Implicit\_Quarter\_17-10-2025\_FINAL\_2 Monitor

Job: Job-43\_Implicit\_Quarter\_17-10-2025\_FINAL\_2 Status: Aborted

Step	Increment	Att	Severe Discon Iter	Equil Iter	Total Iter	Total Time/Freq	Step Time/LPF	Time/LPF Inc
1	45	1	1	6	7	0.370129	0.370129	0.005
1	46	1	1	6	7	0.375129	0.375129	0.005
1	47	1	1	5	6	0.380129	0.380129	0.005
1	48	1	1	3	4	0.385129	0.385129	0.005
1	49	1	1	4	5	0.390129	0.390129	0.005

Log ! Errors ! Warnings Output Data File Message File Status File

```

INCREMENT      51 STARTS.  ATTEMPT NUMBER  1,  TIME INCREMENT  1.000E-02
***ERROR: Process terminated by external request (SIGTERM or SIGINT received).

ANALYSIS SUMMARY:
TOTAL OF          51 INCREMENTS
                  1 CUTBACKS IN AUTOMATIC INCREMENTATION
                210 ITERATIONS INCLUDING CONTACT ITERATIONS IF PRESENT
                210 PASSES THROUGH THE EQUATION SOLVER OF WHICH
                210 INVOLVE MATRIX DECOMPOSITION, INCLUDING
                   0 DECOMPOSITION(S) OF THE MASS MATRIX
                   1 REORDERING OF EQUATIONS TO MINIMIZE WAVEFRONT
                   0 ADDITIONAL RESIDUAL EVALUATIONS FOR LINE SEARCHES
                   0 ADDITIONAL OPERATOR EVALUATIONS FOR LINE SEARCHES
                140 WARNING MESSAGES DURING USER INPUT PROCESSING
                   0 WARNING MESSAGES DURING ANALYSIS
                   0 ANALYSIS WARNINGS ARE NUMERICAL PROBLEM MESSAGES
                   0 ANALYSIS WARNINGS ARE NEGATIVE EIGENVALUE MESSAGES
                   1 ERROR MESSAGES

JOB TIME SUMMARY
USER TIME (SEC)   =      1.06E+05
SYSTEM TIME (SEC) =      9.46E+03
TOTAL CPU TIME (SEC) =     1.15E+05
WALLCLOCK TIME (SEC) =     121543
MEMORY PEAK (GB) =          0

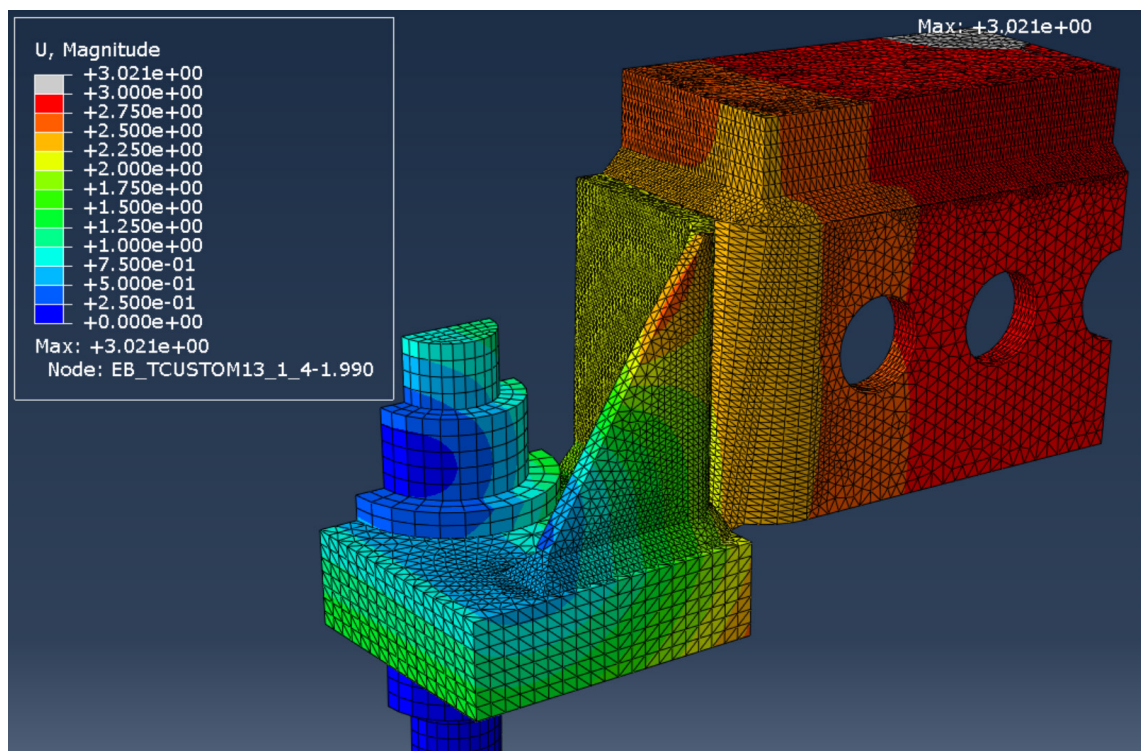
```

Search Text  
Text to find:   Match case

Kuva 33. Simuloinnin lopputilanne ja simulointiparametrit, Abaqus.

### 7.3 Pilarikengän vetokestävyys simuloinnissa

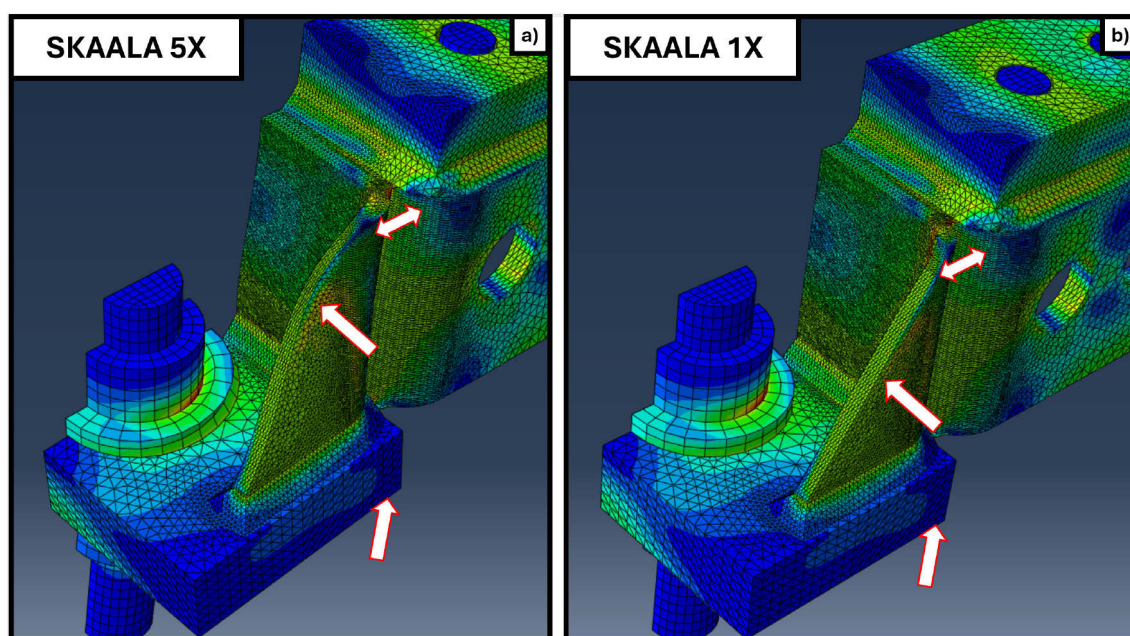
Määritettäessä pilarikengän vetokestävyyttä simuloinnissa on kyse sallitusta siirtymästä, enemmänkin kuin siitä milloin pilarikengän kapasiteetti pettää. HYBRITUT-hankkeen yhteys henkilöiden pyynnöstä tarkastelu tulisi tehdä ainakin kolmen millimetrin (3 mm) siirtymään asti globaalissa koordinaatistossa. Kuvassa 34 on esitetty neljännesmallin siirtymät pyydettyyn maksimiarvoon asti. Punainen väri kuvassa kertoo kolmen millimetrin (3 mm) siirtymästä, tummansinisen ollessa lähtöpisteessä (0 mm). Tarkemmat värikoodit ja niiden siirtymät lähtöpisteestä on esitetty kuvassa. Kuvasta voidaan päätellä, että pilarikengä käyttäytyy oletetusti. Alalaippa alkaa kääntymään sisemmästä reunastaan ylöspäin peruspultin taipuman myötä ja ylälaipan keskikohta saavuttaa ensimmäisenä pisteenä suurimman sallitun siirtymän 3 mm. Tämä on nähtävissä kuvassa 34 harmaalla, ylitettyään juuri kolmen millimetrin (3.021 mm) siirtymän.



Kuva 34. Pilarikengän globaalit siirtymät, kun kolmen millimetrin siirtymä ylittyy, Abaqus.

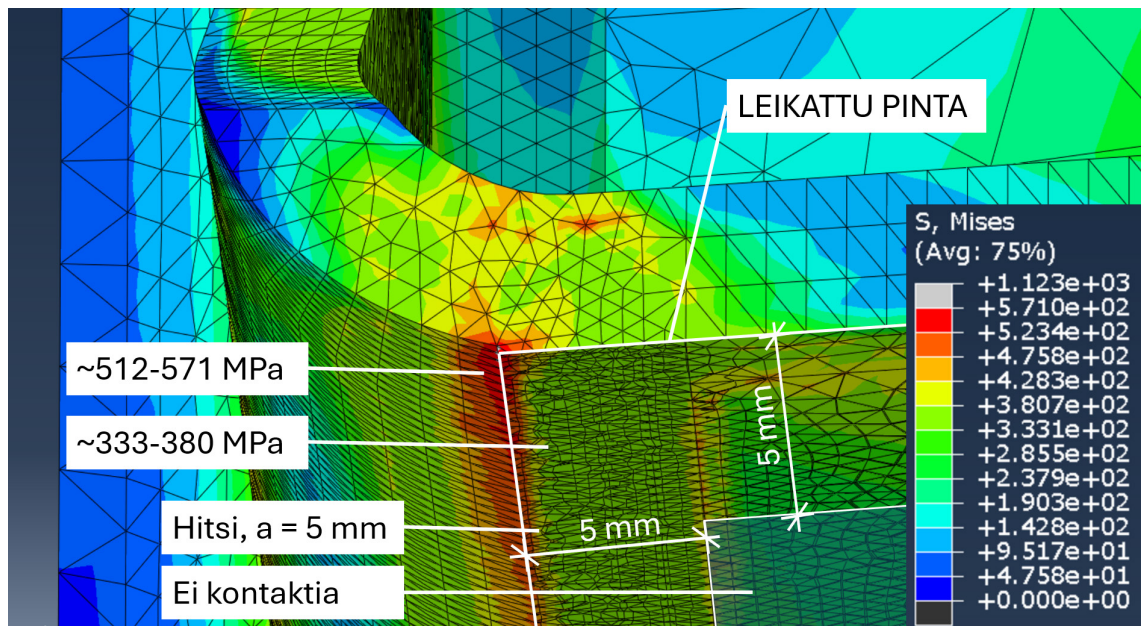
Pilarikengän muodonmuutokset ovat kokonaisuudessaan maltillisia, kun tutkitaan maksimissaan kolmen millimetrin globaalia siirtymää. Kuvassa 35, a) on esi-

tetty kuormitustilanteessa pilarikengän muodonmuutos viisinkertaisella skaalauksella havainnoinnin helpottamiseksi. Kuvassa 35, b) on sama tilanne ilman skaalauskerrointa. Kuvassa kohdasta a) voidaan havainnollistaa, että kuormituksen kasvaessa sivutuen uuma pyrkii taipumaan sisäänpäin. Todellisuudessa lopputilanteessa uumien välissä on juotosvalu, joka osittain estää tätä ja jäykistää pilarikengää hieman. Tältä osin simulointi on konservatiivinen. Alalaipan sisempi reuna pyrkii nousemaan ylöspäin, peruspultin taipuman salliessa muodonmuutoksen. Pilarikengän murtuminen alkaa tapahtua sivutuen ja rungon pystyhitsistä. Pystyhitsin yläosaan tulee ensimmäisenä suurimmat jännitykset ja hitsi alkaa venyä. Tämä muodonmuutos alkaa siirtämään jännityksiä ylälaipan päätyhitseille, joihin kohdistuu seuraavaksi suurimmat jännitykset hitsin myötäämisen jälkeen.



Kuva 35. Muodonmuutokset vetorasituksessa, Abaqus.

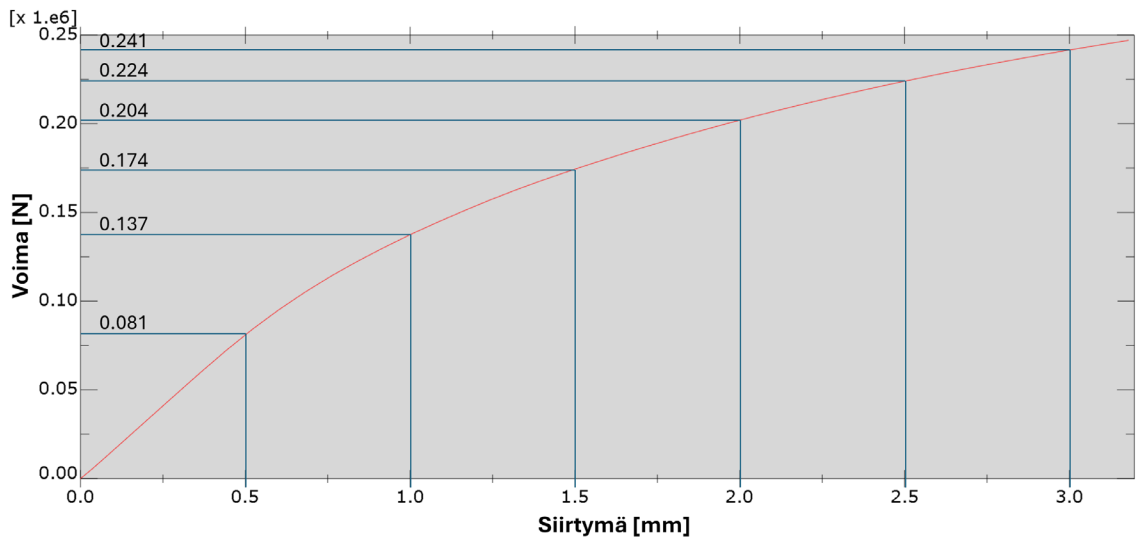
Pystyhitsissä tapahtuvat korkeat jännitykset eivät ulotu kahden millimetrin (2 mm) siirtymällä vielä kovinkaan syväälle hitsin sisään vaan ovat korkeimmillaan hitsin pinnassa ja liitoksessa sivutuen RHS-putken pyöristykseen. Pystyhitsin jännitysten sisäinen jakautuminen on esitetty kuvassa 36, jossa pilarikengä on leikattu, niin, että hitsin jännitykset ovat nähtävillä. Kuvassa esitetty visuaalinen leikkauspinta ja hitsin osuus leikatusta pinnasta. Tummennettu pinta on kontaktiton sivutuen ja rungon välissä oleva kohta. Kuvasta on havaittavissa pystyhitsin jännitysten pinnallisuus kahden millimetrin (2 mm) vetorasituksessa.



Kuva 36. Pystyhitsin jännitysten tarkastelu rakenteen syvyydeltä, Abaqus.

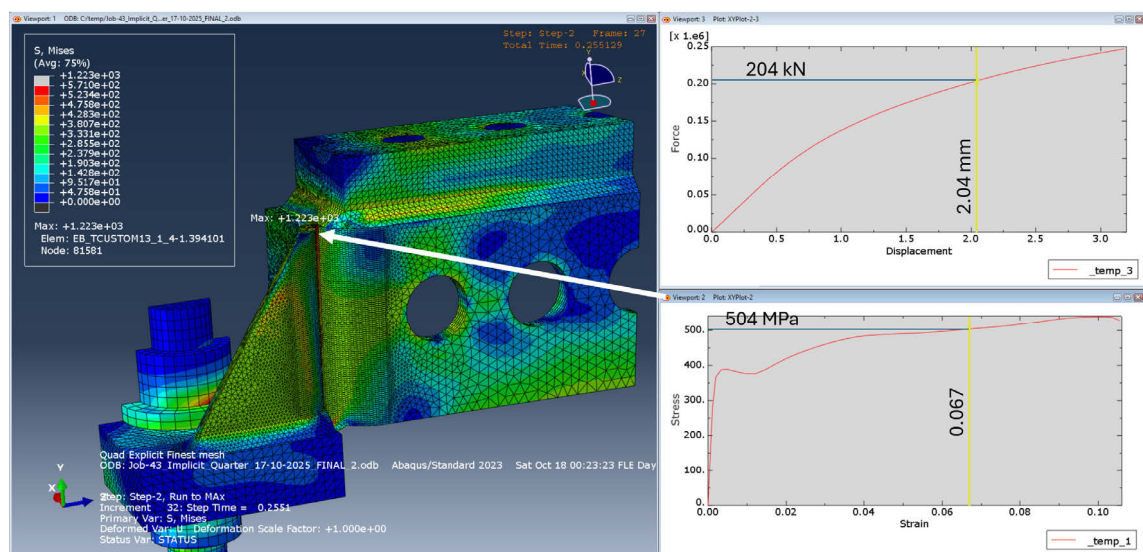
Tulkittaessa pilarikengän kestävyyttä, täytyy voima kertoa neljällä, jotta saadaan koko pilarikengää määrittelevä kapasiteetti. Siirtymä ei muutu, kun pilarikengän näennäisesti puuttuvia osia alettaisiin liittää yhteen, mutta jokaisen osan kautta kulkeva voima peruspultin puolikkaalle kasvaa lisättyjen neljännesten suhteessa. Toisin sanoen, jos siirtymäksi määritetään kaksi millimetriä ja mallia laajennetaan liittämällä siihen toinen neljännes pilarikengästä samalla kuormituksella, säilyy mallin siirtymä kahdessa millimetrissä, mutta pilarikengän puolikkaan kautta siirtyvä voima on tällöin kaksinkertainen.

Kuvassa 37 on esitettyä simuloinnista saatu voima-siirtymäkuvaaja, josta voidaan määritellä pilarikengän kokonaiskapasiteetti. Kuvaan on lisätty tulkinnan helpottamiseksi vetovoima siirtymän 0.5 millimetrin välillä. Jos oletetaan, että kahden millimetrin (2 mm) siirtymä voidaan sallia, niin pilarikengän kapasiteetiksi saadaan tällöin  $202.1 \text{ kN} \times 4 = 808.4 \text{ kN}$ , jos taas sallitaan esimerkiksi 1.5 millimetrin siirtymä niin kapasiteetiksi saadaan  $174.4 \text{ kN} \times 4 = 697.4 \text{ kN}$ . Tarkempi taulukkomuotoinen voima-siirtymäkuvaaja, jossa esitetään laskentatulokset, on esitetty liitteessä 6.



Kuva 37. Voima-siirtymäkuvaaja, Abaqus

Kuvassa 38 on esitetty simuloinnin tulokset 2.04 mm siirtymällä. Kuvasta voidaan tarkastella samanaikaisesti jännitysten jakautuminen väreillä esitettynä edellä mainitun siirtymän hetkellä, voima-siirtymäkuvaaja ja pystyhitsin yhden kriittisen alueen elementin (279186) jännitys-venymäkuvaaja. Kriittisen elementin (279186) Sijainti on esitetty kuvassa valkoisella nuolella. Kuvaajiin on lisätty arvot kyseisellä siirtymän hetkellä. Kuvan 38 jännitys-venymäkuvaajan loppuvaiheessa voidaan huomata pilarikengän hajoaminen. Pilarikengä alkaa murtua ja tarkastelussa olleen elementin jännitykset alkavat laskea. Tämä murtuminen on johtanut implisiittisen laskennan jumitumiseen.



Kuva 38. Simuloinnin tulokset 2 mm siirtymällä, Abaqus.

Pilarikengän lopullisen kapasiteetin selvittämiseksi tulisi määritellä sallittu siirtymä pilarikengälle. Lopullista sallittua siirtymää ei selvitetä tässä opinnäytetyössä. Saadut tulokset jäävät HAMK Tech:lle HYBRITUT-hankkeeseen jatkokäyttöä varten. Tuloksista voidaan olettaa, että tällä geometrialla ja näiden simulaatiotulosten perusteella pilarikengän hyväksyttävä sallittu siirtymä olisi 1–2 millimetriä, jonka vuoksi pilarikengän kokonaiskapasiteetti osuisi noin 550 kN ja 800 kN väliin.

#### **7.4 Pilarikengän optimointimahdollisuudet**

Tarkastellussa pilarikengässä optimointimahdollisuudet rajautuvat ala- ja ylälaippaan ja erityisesti niiden paksuuteen, johtuen geometriasta ja pilarikengän osista. Lähtötietojen perusteella laipat olivat paksuudeltaan 30 mm. Tulosten perusteella voisi olettaa, että alalaippoja voisi olla mahdollista muuttaa 30 millimetrin paksuisista alalaipoista 25 millimetrin paksuisiin. Tämä pudottaisi pilarikengän materiaalkustannuksia ja painon pudottaminen tekisi siitä hieman asentajaystävällisemmän. Kuvassa 38 voidaan nähdä, että noin 800 kN vetorasituksessa alalaipan jännitykset jäävät vielä suhteellisen pieniksi. Toisaalta jo pelkän alalaipan optimoiminen 25 mm paksuiseksi saattaisi vaikuttaa koko pilarikengän jäykkyyteen ja sitä kautta kapasiteettiin alentavasti. Kuvassa 38 ylälaipan jännitykset ovat selvästi korkeammat kuin alalaipalla. Ylälaipan paksuuden pienentäminen johtaisi todennäköisesti pilarikengän jäykkyyden pienenemiseen ja tätä kautta koko pilarikengän kapasiteetin laskuun.

## 8 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

### 8.1 Simulointiprosessi

Laskentamallin rakentaminen osoittautui alkuvaiheessa aikaavieväksi, johtuen Abaqus-ohjelman käyttöliittymästä ja sen poikkeavaisuuksista aikaisemmin käytössäni olleisiin FEA-ohjelmiin. Ohjelman käyttö kuitenkin nopeutui suhteessa ohjelmaan käytettyyn aikaan ja iteraatiokierrosten määrään, kuten voi hyvinkin olettaa. Haasteeksi nousi myös HAMK Tech:n käytössä olevien rajallisten lisenssien ja tokenien määrä. Abaqus-ohjelma oli usealla tutkijalla käytössä eri hankkeissa samaan aikaan, kun tätä simulointia tehtiin. Tämä aiheutti viivästystä laskentamallin tulosten saamisessa. Kun Abaqus-ohjelmassa käynnistää laskelman tokenien ollessa käytössä, niin että tokeni-poolissa ei ole enää riittävästä tokeneita jäljellä, menee laskenta jonoon odottamaan tarvittavan tokenien määrän vapautumista. Jos simulointi jäi jonoon liian pitkäksi aikaa, saattoi käytössä ollut lisenssi pudota pois. Tämä tapahtui ilmeisesti koneen lepotilaan menemisen vuoksi ja täten simulointi ei käynnistynyt enää itsestään. Näistä syistä tämän opinnäytetyön puitteissa tarkastelusta jouduttiin rajaamaan pois mahdollisten seuraavien iteraatiokierrosten analysointeja. Kuten esimerkiksi optimointivaihtoehtoja pilari-kengän osille ja hitsien koon muutoksia.

Laskennan kustannukset osoittautuivat erittäin raskaiksi, kun elementtiverkkoa tihennettiin ja haettiin tarkimpia laskentatuloksia. Viimeinen vertailu elementtiverkkojen välillä päästiin tekemään vasta aivan työn loppuvaiheessa. Tämä johtui jokaisen iteraatiokierroksen jälkeen tehdyistä muutoksista laskenta-asetuksiin. Tämä tehtiin jotta, implisiittinen simulointi saataisiin laskemaan riittävän pitkälle tulosten saamiseksi. Eksplisiittistä laskentaa kokeiltiin, sen ollessa suotuisampi laskenta-asetusten suhteen, mutta jo karkealla verkolla sen laskentakustannukset nousivat kannattamattomaksi. Tämän vuoksi lopulliseksi laskentatavaksi valittiin implisiittinen laskentatapa. Elementtiverkkojen vertailun perusteella edellisen iteraatiokierroksen simulaatio olisi ollut riittävä tulosten saamiseksi. Varmuus elementtiverkon toimivuudesta kuitenkin tarvitaan, joten tässä hienon elementtiverkon laskenta oli tarpeellinen. Tämä iteraatiokierros osoitti elementtiverkon toimivuuden simuloinnissa.

## 8.2 Simuloinnin tulokset

Pystyhitsi RHS-putkirungon ja RHS-putkista tehtyjen sivutukien välillä saattaa olla haasteellista toteuttaa kuten geometriseen malliin on määritetty. Sivutukien pystyhitsin todellinen sijainti tulee olemaan todennäköisesti ulompana kuin mihin se on tässä opinnäytetyössä mallinnettu. Tämä johtuu siitä, että RHS-putkesta tehtyjen osien liitoskohdassa tila menee käytännössä nolnaan, sieltä mihin tässä mallissa hitsi on oletettu alkavaksi. Hitsauskalusto ei ulotu aivan tähän alkamis-pisteeseen. Toisaalta hitsi ulottuu syvemmälle, kun hitsauslaitteen kärki, joten hitsin todellisen sijainnin poikkeama verrattuna simulointiin on todennäköisesti noin 3–5 millimetriä, johtuen RHS-putkien sauman aukeamisesta pyöristysten vuoksi. Tämän vaikutusta ei ole tässä opinnäytetyössä testattu, mutta se voi vaikuttaa liitoksen kestävyYTEEN. Varsinkin kun pystyhitsit tulosten perusteella ovat tässä prototyypissä mitoittavia, voi niiden pieni sijaintipoikkeama muuttaa pilarikengän käyttäytymistä. Toisaalta hitsin siirtyminen ulommas, eli lähemmäs sivutuen uuman keskilinjaa saattaa jopa jäykistää pilarikengää simuloidusta. Tästä syystä myös sivutuen ala- ja yläpään vaakahitsit pidentyvät joka analyttisessä laskennassa tarkoittaa kapasiteetin kasvua.

Pilarikengä simuloitiin Peikon 30 millisellä Hulco-ankkurointipultilla. Pulteille laskettiin materiaalimalli prEN 1993-1-14 mukaan (liite 2), mutta sen sitkeää murtoa tai taulukkokapasiteettiä ei simulointiin määritetty. 30 millimetrinen Hulco-ankkuripultin kapasiteetti on taulukon mukaan  $N_{Rd}$  299 kN/pultti, joten 30 mm peruspultti ei riitä jos, oletetaan pilarikengän kapasiteetiksi 800 kN (2 mm siirtymällä). Peikon 36 millimetrinen Hulco-ankkuripultin vetokapasiteetti  $N_{Rd}$  on taulukon mukaan 436 kN/pultti, joka voisi olla parempi vaihtoehto, kahden pultin kapasiteetin ollessa 872 kN. Pilarikengän murtorajatilän kapasiteetti tulisi määrittää vielä erikseen (Peikko, 2024)

Pilarikengän liimaruuvien minimiväli täyttää Lausunto No EUFI29-25000438-T1 käsittelemän liimaruuvien reunaetäisyyden S235 ruuville ja hetkellinen aika-luokka on mitoittavana. Mutta muussa tapauksessa pilarikengän pituussuunnassa väli jää liian lyhyeksi. Pituussuuntainen keskiöväli pilarikengässä on 50

mm ja sen tulisi olla minimissään 60 mm Lausunto No EUFI29-25000438-T1 mukaan. Pilarikengän ruuvien sijoittelua voisi olla mahdollista muuttaa vastaamaan 5.8 lujuusluokan ruuville määrättyä pituussuuntaista keskiöväliä, mutta tätä ei tarkasteltu tässä opinnäytetyössä. Pilarikengän minimikeskiövälinä voidaan kuitenkin pitää 40 mm, jos liimapuun vetokestävyys toteuttaa kaavassa (28) esitetyn ehdon. Tästä syystä pilarikengän liimaruuvien keskiöetäisyyksiä ei ole tarpeellista muuttaa. Jos käytetään 5.8 lujuusluokan liimaruuveja liitoksessa, olisi niiden ulosvetokestävyys VTT-S-07607-12 mukaan kymmenellä liimaruuvilla 587 kN, mikä jää alle pilarikengän vertailukapasiteetin (800 kN). Laskelma esitetty liitteessä 7. (SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC, 2015; VTT, n.d.; Ylinen, 2025)

$$N_{t,d} = f_{t,d} \sum_{i=1}^{n_t} A_{\text{efi}} \geq F_{t,d} \quad (28)$$

missä

$f_{t,d}$

on liimapuun vetolujuuden mitoitusarvo,

$A_{\text{efi}}$

on liimapuun tehollinen vetovyöhykkeen pinta-ala ruuvia  $i$  kohden,

$n_t$

on liitinryhmän vedettyjen liimaruuvien määrä ja

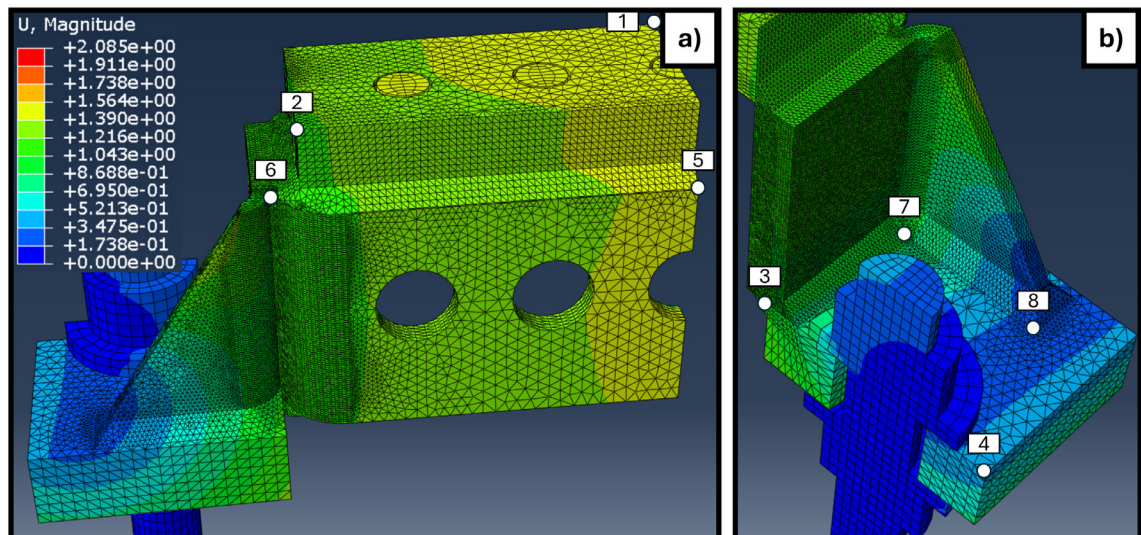
$F_{t,d}$

on vedetyn liimaruuviryhmän mitoituskuorma.

Pilarikengän osien muodonmuutokset pystysuunnassa 2.04 mm kokonaissiirtymän kohdalla osakohtaisesti on esitetty taulukossa 7. Osien mittauspisteet on esitetty kuvassa 39 kohdissa a) ja b). Värillä kuvassa on esitetty siirtymä alkupisteestä, kuvassa olevan taulukon mukaan millimetreinä (mm). Taulukosta nähdään, että ylälaippa taipuu keskeltä 0.39 mm. Ylälaippaa voidaan pitää jäykkänä suhteessa pilarikengän kokonaissiirtymään. Sivutuen alareunan taipuma on 1.17 mm, josta voidaan päätellä, että sivutuki vaikuttaa suuresti pilarikengän kokonaisjäykkyyteen. Lisäksi sivutuen uuman sivusuuntainen taipuma sisäänpäin (pultin suuntaan) on 1.21 mm. Sivutuen jäykkyyden parantaminen voisi lisätä pilarikengän jäykkyyttä. Alalaipan kallistuma vastaa lähelle pilarikengän kokonaissiirtymää. Tämä johtuu peruspultin taipumasta ja sivutuen muodonmuutoksesta. Myös juotosbetonin puristumisen takia alalaipan ulkoreuna painuu 0.48 mm alas-päin.

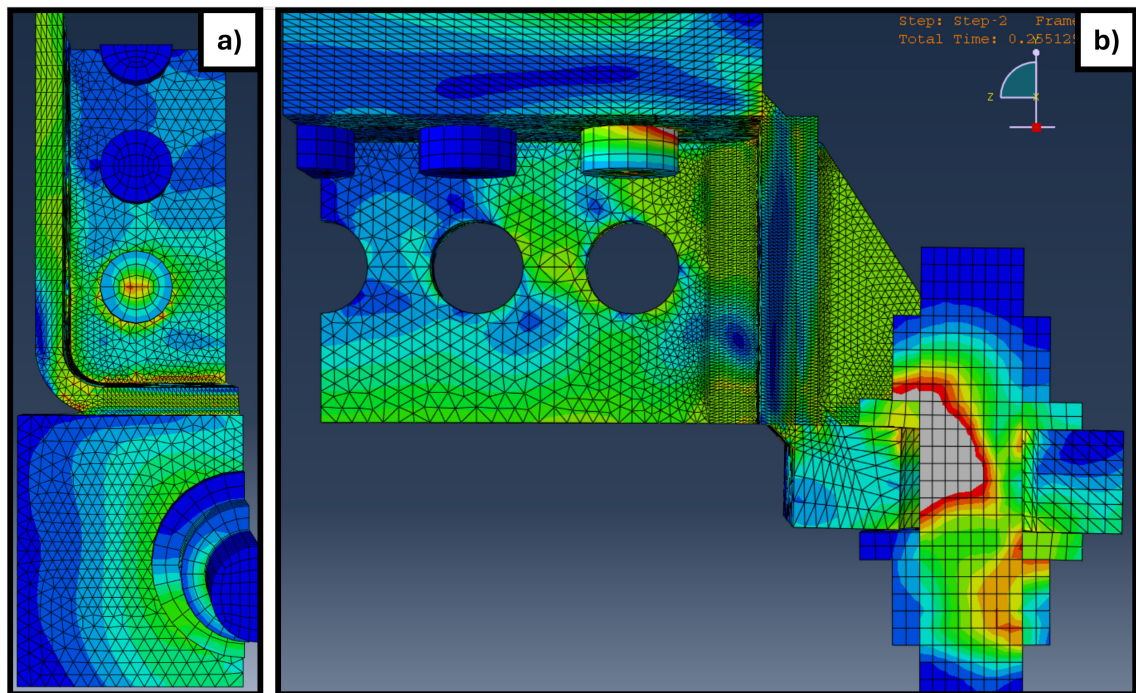
Taulukko 7. Pystysuuntaiset muodonmuutokset osakohtaisesti.

Muodonmuutokset pystysuunnassa osakohtaisesti EB_TKCustom13			
Kokonaissiirtymä 2.08 mm			
Osa	Mittauspiste (Kuva 39)	Pisteen siirtymä alkupisteestä	Muodonmuutos/taipuma
Ylälaippa	1	2,08 mm	0,39 mm
	2	1,69 mm	
Alalaippa	3	1,48 mm	1,96 mm
	4	-0,48 mm	
Rungon uuman yläreuna	5	2,01 mm	0,39 mm
	6	1,62 mm	
Sivutuen uuman alareuna	7	1,22 mm	1,17 mm
	8	0,05 mm	



Kuva 39. Osien siirtymien mittauspisteiden sijainnit, Abaqus.

Kuvassa 40, b) on esitetty kahden millimetrin (2 mm) vetotilanteessa peruspultin ja liimaruuvien jännitys jakauma. Värikoodaus on vastaava aikaisempien kuvien kanssa, jossa tummansininen on lähellä 0 MPa ja tummanpunainen vastaa 571 MPa. Harmaa on yli taulukon. Lähimpänä ylälaipan päätä oleviin liimaruuveihin kohdistuu suurimmat jännitykset, ylälaipan muodonmuutosten (0.39 mm) vuoksi. Muodonmuutokset ovat esitetty taulukossa 7. Kuvassa 40, a) on nähtävillä sama tilanne alhaaltapäin.



Kuva 40. Pilarikengän, peruspulttien ja liimaruuvien jännitykset, Abaqus.

SSAB:n rakenneputkikäsikirjan taulukon 3.9 mukaan tasalujan pienahitsin a-mitta aksiaaliselle vedolle tulee olla  $1.11 \cdot t$ . Tämä tarkoittaa RHS300x150x10 putkessa a-mitaltaan 11.1 millimetriä. Hitsin tullessa ylälaipan liitoksessa RHS-putken poikkileikkaukseen eikä esimerkiksi sen kylkeen, niin tilaa ei ole kuin maksimissaan 10 mm kateetilla olevalle hitsille, joka tarkoittaisi noin 7 millimetrin pienahitsin a-mittaa. Jos haluttaisiin tasaluja liitos, niin ylälaippa olisi mahdollista hitsata vielä alapuolelta kiinni. Tätä tilannetta ei kuitenkaan tarkasteltu tässä opinäytetyssä.

### 8.3 Simuloinnin tarkentaminen

Simulointimallissa elementtiverkkoa olisi mahdollista vieläkin parantaa ja päästä esimerkiksi eroon kaikista virheellisistä solmuista. Mutta kuten liitteen 6 vertailusta voidaan nähdä, niin tämän vaikutus tuloksiin olisi todennäköisesti vähäinen ja toimenpiteenä siten kannattamaton. Tulokset tulisi verrata näiden tulosten kanssa.

Geometrisen mallin todenmukaisuutta voisi parantaa mallintamalla sivuten pysyhytsit lähemmäksi todellista sijaintiaan. Tässä voisi hyvinkin konsultoida ammattitaitoista hitsaajaa, jotta hitsin todellisen sijainnin saisi selvitettyä. Hitseille voisi määrittää HAZ-alueet (Heat Affected Zone) ja tarkastella niiden vaikutus pilarikengän kokonaisuuteen. HAZ-alueisiin ei tässä opinnäytetyössä otettu kantaa.

Lopputilanteen juotosvalun voisi myös lisätä simulointiin ainakin kriittisiin osiin, kuten esimerkiksi sivutukien sisäpuoliin ja mahdollisesti rungon uuman molemmille puolille. Määrittäksessä olisi hyvä huomioida juotosvalun mahdollinen kutistuma, esimerkiksi konservatiivisesti 0.5–1 millimetri. Käytännössä määrittäminen tulisi tehdä niin, että geometria pääsisi vapaasti siirtymään määritetyn kutistuman verran ennen kuin juotosvalun puristuslujuus alkaisi toimia. Tämä saattaisi jäykistää pilarikengää hieman tähän simulointiin verrattuna.

Validointi laboratorikokeilla olisi suositeltavaa, jotta saataisiin simuloinnin todellinen vastaavuus selville. Laboratorikokeeseen vertailuun täytyisi ensiksi päivittää materiaalimalli vastaamaan todellisuutta tarkemmin. Tämä tulee selvittää laboratoriossa vetokokeella samasta teräserästä, josta koepilarikengäkin tehdään. Tämän työn geometrisessa mallissa hitsit on pidetty omana ryhmänä, jotta niiden materiaalimallin päivittäminen olisi helpompaa. Tämä voitaisiin myös tarkentaa laboratorikokeilla ja päivittää simulointiin. Pilarikengän jäykkyyttä voisi olla mahdollista parantaa hitsien a-mittaa muuttamalla suuremmaksi ja tätä kautta kapasiteettiä parantaa.

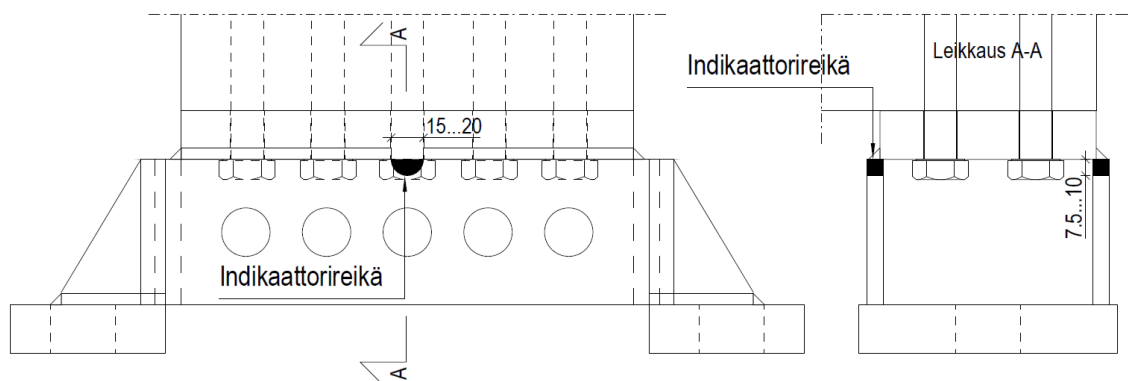
Mallin voisi laskea myös eksplisiittisellä ratkaisijalla, jos haluttaisiin selvittää todellinen murtumispiste. Toisaalta liian suuri siirtymä pilarikengässä tekee siitä toimimattoman tarkoitukseensa nähden, joten tämä tarkastelu ei välttämättä ole laskentakustannusten arvoinen.

Mallin varmuuskerroin tulisi huomioida, jos käytetään suoraa menetelmää, kapaleen 3.7.3 mukaan. Tässä työssä ei määrittäystä tehty, vaan sen tarpeen selvittäminen ja mahdollinen määrittäminen jää seuraavaan vaiheeseen.

## 8.4 Työmaatekninen toteutus

Pilarikengän geometria saattaa johtaa haasteisiin työmaatekniikan osalta. Pilarikengän juotosvalun betonoinnissa on mahdollista, että ylälaipan alapintaan jää ilmatasku. Tämä johtuu sivussa olevien reikien sijainnista, josta betoni tulee ulos valutilanteessa. Jos pilarikengän ylälaipan alapinnassa (sivussa) olisi juotosbetonia varten reikä, se toimisi samalla indikaattorina työmaatoteutuksessa, josta olisi helppo tarkkailla pilarikengän täyttymistä juotosbetonilla betonoinnin aikana. Indikaattorireiän esimerkkisijainti ja koko esitetty kuvassa 41. Reikä saattaisi olla riittävä vain pilarikengän uloimmalla reunalla.

Jos ilmatasku jää rakenteeseen saattaa se vaikuttaa pilarikengän käyttöikänsä ja säilyvyyteen. Betonin terästä kemiallisesti suojaava vaikutus perustuu sen voimakkaaseen emäksisyyteen, mikä yhdessä teräksen ominaisuuksien kanssa muodostaa teräksen pinnalle ohuen oksidikalvon, joka suojaa terästä korroosiolta. Jos betonin ja teräksen väliin jää ilmarako ei betonin suojaava vaikutus toteudu. Tämä saattaa vaikuttaa mahdollisen kosteuden tai kosteuden tiivistymisen takia pilarikengän korroosioon. (Johansson, 2025)



Kuva 41. Ehdotus ilma- ja indikaattorireiän sijainnista pilarikengässä.

Juotosvalun on myös tarkoitus siirtää puristusvoimat perustuksille. Ilmatasku saattaa aiheuttaa myös sen, että puristusvoimat eivät siirry suunnitellusti betonin välityksellä, vaan pilarikengä joutuu välittämään kuormat peruspulteille kokonaisuudessaan. Yhtenä vaihtoehtona indikaattorireiäksi ja ilman pois pääsyreittinä voisi toimia 15–20 millimetrin halkaisijalla oleva puolikkaan ympyrän muotoinen reikä, joka sijaitisi keskeisesti pidemmän sivun uumassa pienimmän jännityksen

alueella yläreunassa. Tämä on esitetty kuvassa 41. Tämä katkaisisi kuitenkin hitsit ylälaipan keskeltä, mutta niiden jännitykset olivat simuloinnissa vähäisiä. Tämän reiän vaikutus tulisi tutkia erikseen.

## 8.5 Toisen sukupolven Eurokoodit

Tässä työssä käsiteltiin pääosin standardeissa toisen sukupolven Eurokoodeja. Käytettävyydeltään ne vaikuttivat hyvin samanlaisilta kuin Eurokoodien ensimmäinenkin sukupolvi. PrEN 1993-1-14:2023 vaikuttaa johdonmukaiselta ja FEM-laskentaan helppokäyttöiseltä, siltä osin kuin sitä tässä työssä tulkittiin. Kansallisten liitteiden puuttuminen toi ainakin terminologian kanssa oman haasteensa, mutta tässä työssä alkuperäiset termit ovat myös kuvattu termien perässä sulissa helpottamaan luettavuutta.

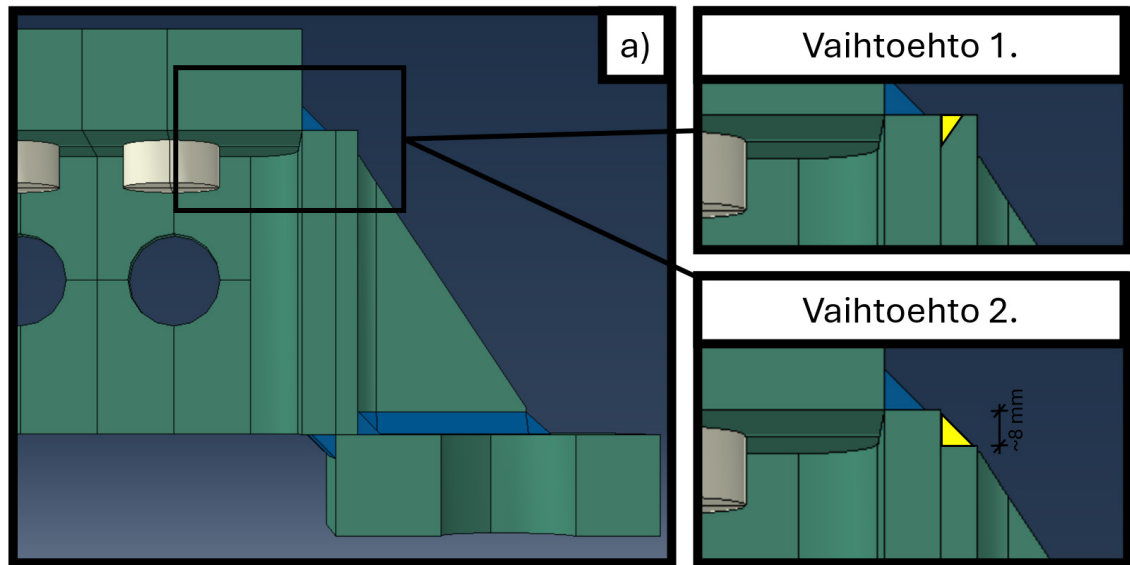
## 8.6 Jatkokehitys

Pilarikengän sivutuen yläpään kiinnitykseen työteknisesti ei otettu kantaa tässä mallissa. Kuvassa 42 on esitetty kaksi työtekniistä mahdollista vaihtoehtoa sivutuen yläpään kiinnitykselle.

Vaihtoehdossa 1. on esitetty sivutuen yläpään viistous, jotta sauma saadaan hitsattua. Hitsi esitetty keltaisella. Tämä lisää laskentakustannuksia ja pilarikengän valmistukseen käytettävää aikaa. Toisaalta tämä ei todennäköisesti vaikuta tässä simuloinnissa laskettuun kapasiteettiin negatiivisesti.

Vaihtoehdossa 2. on esitetty sivutuen madaltaminen noin 8 mm, jotta yläpään kiinnitys saataisiin RHS-rungon kylkeen pienahitsillä. Pienahitsi on esitetty keltaisella. Sivutuen seinämävahvuudesta johtuen tällä vaihtoehdolla ei saada liitokseen 5 mm a-mitalla olevaa pienahitsiä. Pienahitsin maksimi a-mitta on noin 4 mm (~4.455 mm). Tämä voi osaltaan vaikuttaa pilarikengän kapasiteettiin ja/tai jäykkyyteen. Pilarikengän kapasiteetin kannalta tulisi tutkia sivutuen geometrian muutoksesta johtuva vaikutus kokonaisjäykkyyteen ja kasiteettiin. Toisaalta tässä

kohtaa simulaatiossa ei jännitykset kasvaneet poikkeuksellisen suuriksi, joten myös pienempi hitsin a-mitta voisi olla riittävä.



Kuva 42. Sivutuen yläpään hitsausvaihtoehdot.

## 8.7 Tavoitteiden saavuttaminen ja yhteenveto

Opinnäytetyön tavoitteet saavutettiin pääosin hyvin. Pilarikengän alustava vetokestävyys saatiin selvitettyä halutulla tasolla. Tulokset vaativat kuitenkin vielä kolmannen osapuolen tulkintaa ja tarkastelua sekä lopullisen päätöksen niiden jatkokäytöstä. Parametristen muutoksen osuus jäi resurssien rajallisuuden vuoksi pohdinnan tasolle ja niiden tutkiminen rajattiin pois tästä opinnäytetyöstä. Esistandardin prEN 19931-14:2023 käytettävyys yleisesti ja sovellettavuus tämän kaltaisessa simuloinnissa osoittautui toimivaksi. Esistandardi osaltaan myös helpotti mallin parametrien määrittämistä esimerkiksi materiaalmallin osalta. Validoinnin dokumentaation tekeminen erikseen olisi helpottanut tulosten käytettävyyttä esistandardin näkökulmasta, mutta verifiointissa vaaditut asiat ovat esitettyinä kuitenkin tässä opinnäytetyössä. Tutkimuskysymykset on esitetty kohdassa 1.3.

Opinnäytetyöprosessi oli kokonaisuudessaan mielenkiintoinen. Abaqus-ohjelman opettelu vaati yllättävän paljon resursseja, mutta toisaalta ohjelmasta on löy-

dettävissä paljon tietoa ja apua sai myös pyydettäessä hankkeen osapuolilta. Simuloinnin kustannukset yllättivät alkuvaiheessa, mutta kun sitä vertaa mallin laskentaongelmien määrään, niin selviää mistä kustannukset todellisuudessa määräytyvät. Tämän ymmärtäminen auttaa myös simuloinnin asetuksia ja laskenta-verkon rakennetta määrittäessä, mikäli tavoitteena on luoda optimaalisempi ja kustannustehokkaampi malli. Monta asiaa tekisin toisin jo pelkästään geometrian mallintamisessa, mutta tämäkin kuuluu oppimisprosessiin ja tämän opinnäytetyön aikana sain hyvän tuntuman Abaqus-simulointiin.

## LÄHTEET

ANSYS. (2025). *Characteristic Length*.  
[https://ansyshelp.ansys.com/public/Views/Secured/corp/v251/en/spaceclaim/Discovery/user\\_manual/meshing/mesh/r\\_mesh\\_metrics\\_blocking\\_bodymesh\\_characteristiclength.html](https://ansyshelp.ansys.com/public/Views/Secured/corp/v251/en/spaceclaim/Discovery/user_manual/meshing/mesh/r_mesh_metrics_blocking_bodymesh_characteristiclength.html)

Bathe, K. J. (1996). *Bathe, K. J. Finite Element Procedures 1996 Prentice Hall*.  
[https://www.academia.edu/41727530/Bathe\\_K\\_J\\_Finite\\_Element\\_Procedures\\_1996\\_Prentice\\_Hall](https://www.academia.edu/41727530/Bathe_K_J_Finite_Element_Procedures_1996_Prentice_Hall)

Benzley, S. E., Perry, E., Merkley, K., Clark, B., & Sjaardama, G. (n.d.). *A Comparison of All Hexagonal and All Tetrahedral Finite Element Meshes for Elastic and Elasto-plastic Analysis*.

*Bulk Viscosity—An overview | ScienceDirect Topics*. (ei pvm.). Noudettu 9. syyskuuta 2025, osoitteesta  
<https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/bulk-viscosity>

CEA Assistant. (2025, huhtikuuta 27). *Finite Element Method Complete Guide | Basics + Applications*. <https://caeassistant.com/blog/finite-element-method/>,

CEN-CENELEC. (2025). CEN-CENELEC.  
[https://www.cencenelec.eu/media/CEN-CENELEC/Abbreviations/cen\\_cenelec\\_abbreviation\\_acronym-2025.pdf](https://www.cencenelec.eu/media/CEN-CENELEC/Abbreviations/cen_cenelec_abbreviation_acronym-2025.pdf)

CEN-prEN 1993-1-14:2023. (2023). *Eurocode 3 Design of steel structures. – Part 1-14: Design assisted by finite element analysis*.

Christine Obbink-Huizer. (2025). *Implicit Vs Explicit Finite Element Analysis: When to Use Which*. <https://blog.technia.com/en/simulation/implicit-vs-explicit-finite-element-analysis>

Dassault, S. (2023a). *User Assistance*.  
<https://docs.software.vt.edu/abaqusv2024/English/?show=SIMACAECAERefMap/simacae-m-InterAbq-sb.htm>

Dassault, S. (2023b). *User Assistance*.  
<https://docs.software.vt.edu/abaqusv2024/English/?show=SIMACAEMATRefMap/simamat-c-damageevolductile.htm>

Dunai, L., Kövesdi, B., Gardner, L., Al-Emrani, M., Casafont, M., Degée, H., Jandera, M., Kuhlmann, U., Taras, A., & Walport, F. (2023). Design assisted by finite element analysis – Introduction to prEN 1993-1-14 and Technical Report. *Ce/Papers*, 6(3–4), 2677–2682. <https://doi.org/10.1002/cepa.2574>

Fidelis. (2020, huhtikuuta 3). *Everything You Need to Know About SIMULIA's ABAQUS Licensing and Tokens—Fidelis Engineering Associates*.  
<https://www.fidelisfea.com/post/everything-you-need-to-know-about-simulia-s-abaqus-licensing-and-tokens>

Fidelis. (2024, huhtikuuta 29). *What Is Stress Triaxiality? - And Why Does It Matter In Ductile Damage Modeling? - Fidelis Engineering Associates*.

<https://www.fidelisfea.com/post/what-is-stress-triaxiality-and-why-does-it-matter-in-ductile-damage-modeling>

HAMK Tech. (n.d.). HAMK Tech. *HAMK*. <https://www.hamk.fi/tutkimus/hamk-tech/>

Harish, A. (2024, maaliskuuta 11). *Implicit vs Explicit Finite Element Method (FEM): What Is the Difference?* <https://www.simscale.com/blog/implicit-vs-explicit-fem/>

Johansson, K. (2025, tammikuuta 10). *Suomen Betoniyhdistys ry—Nuoren ja kovettuneen betonin ominaisuudet Betonilaborantin ja betonimylläri pätevyitymiskurssi*. <https://www.betoniyhdistys.fi/media/kurssit/betonilaborantti-ja-myllari/nuoren-ja-kovettuneen-betonin-ominaisuudet.pdf>

Kortelainen, P. (2015, helmikuuta 5). *LIIMAPUUPILARIKENKÄ, Laskelmaselostus*. A-Insinöörit Suunnittelu Oy.

Li, M., Ho, H.-C., Chung, K. F., & Nethercot, D. A. (2025). Determination of true stress-strain curves of S355-S960 steels through modified Bridgman method. *Journal of Constructional Steel Research*, 234, 109760. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2025.109760>

Mela, K. (2024). *Teräsrakenteiden suora mitoitusmenetelmä*. <https://www.eurocodes.fi/wp-content/uploads/02-Mitoitusparadigman-muutos.pdf>

MIT. (2014). *Element Types*. [https://web.mit.edu/calculix\\_v2.7/CalculiX/ccx\\_2.7/doc/ccx/node25.html](https://web.mit.edu/calculix_v2.7/CalculiX/ccx_2.7/doc/ccx/node25.html)

MIT. (n.d.). *Damage evolution and element removal for ductile metals* [Concept]. <https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEMATRefMap/simamat-c-damageevolductile.htm>

Mot Sanakirja. (2025a). *Convergence* | [Sanakirja.fi](https://www.sanakirja.fi/english-finnish/convergence). <https://www.sanakirja.fi/english-finnish/convergence>

MOT Sanakirja. (2025b). *Strain at failure* | [Sanakirja.fi](https://www.sanakirja.fi/english-finnish/strain%20at%20failure). <https://www.sanakirja.fi/english-finnish/strain%20at%20failure>

Numeerinen analyysi. (2024). Teoksessa *Wikipedia*. [https://fi.wikipedia.org/w/index.php?title=Numeerinen\\_analyysi&oldid=22799756](https://fi.wikipedia.org/w/index.php?title=Numeerinen_analyysi&oldid=22799756)

O.C, Z., Taylor, R., & Zhu, J. (2005). The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. Teoksessa *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals: Seventh Edition: Vol. I*.

Ottenhaus, L.-M., Jockwer, R., van Drimmelen, D., & Crews, K. (2021). Designing timber connections for ductility – A review and discussion. *Construction and Building Materials*, 304, 124621. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124621>

peikko. (2024, syyskuuta). *HULCO®-ankkurointipultit*.  
[https://media.peikko.com/file/dl/i/uSqqJw/ERpyY0rVgRdkp2GltMZR9A/HULCO\\_FI\\_01\\_Tekninen\\_Kyttohje\\_Web.pdf?fv=9f6b](https://media.peikko.com/file/dl/i/uSqqJw/ERpyY0rVgRdkp2GltMZR9A/HULCO_FI_01_Tekninen_Kyttohje_Web.pdf?fv=9f6b)

Pulkkinen, J. (2025, kesäkuuta 12). *KOKOONPANOPIIRUSTUS EB\_TKCustom13, Top plate*.

Puuinfo. (2025, elokuuta 22). *Vaapu-esimerkkilaskelmat. Moduuli\_2\_Esimerkki\_8\_Mastopilarin-liimaruuviliitos*. *Puuinfo*.  
[https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/06/Moduuli\\_2\\_Esimerkki\\_8\\_Mastopilarin-liimaruuviliitos.pdf](https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/06/Moduuli_2_Esimerkki_8_Mastopilarin-liimaruuviliitos.pdf)

SFS-EN 1992-1-1/A1:en. (2015). *Eurocode 2. Design of concrete structures. – Part 1-1: General rules and rules for buildings*.  
<https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/310406.html.stx>

SFS-EN 1993-1-1:2022. (2025). *Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt*.  
<https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/1342548.html.stx>

SFS-EN 1993-1-2:2024:en. (2024). *Eurocode 3. Design of steel structures. – Part 1-2: Structural fire design*.  
<https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/1309015.html.stx>

SFS-EN 1993-1-4:2025:en. (2025). *Eurocode 3. Design of steel structures. – Part 1-4: Stainless steel structures*.  
<https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/1346552.html.stx>

SFS-EN 1993-1-5:2006. (2006). *Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. – Osa 1-5: Levyrakenteet*.  
<https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/9355.html.stx>

SFS-EN 1993-1-8:2024:en. (2024). *Eurocode 3. Design of steel structures. – Part 1-8: Joints*. <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/1309767.html.stx>

SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC. (2015). *Eurokoodi 5. Puurakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt*.  
<https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/380211.html.stx>

SIMULIA. (n.d.a). *ABAQUS Analysis User's Manual (v6.6)*.  
<https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/books/usb/default.htm?startat=pt05ch19s03abm42.html>

SIMULIA. (n.d.c). *ABAQUS Analysis User's Manual (v6.6) 6.3.2 Implicit dynamic analysis using direct integration*.  
<https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/books/usb/default.htm?startat=pt03ch06s03at06.html>

SIMULIA. (n.d.b). *Getting Started with ABAQUS (v6.5-1)*.  
<https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.5/books/gsa/default.htm?startat=ch04s04.html>

SSAB. (2016). *SSAB DOMEX TUBE RAKENNEPUTKET EN 1993 – KÄSIKIRJA 2016*. <https://www.ssab.com/en/brands-and-products/steel-categories/hollow-sections/handbooks#orderdomexhollow>

Stormi, I. (2024, marraskuuta 25). HAMK Smart ja HAMK Tech -tutkimusyksiköt yhdistyvät vuoden 2025 alussa. *HAMK*. <https://www.hamk.fi/hamk-smart-ja-hamk-tech-tutkimusyksikot-yhdistyvat-vuoden-2025-alussa/>

Syed, W. (2022, marraskuuta 22). ANSYS Mesh Metrics Explained. *FEA Tips*. <https://featips.com/2022/11/21/ansys-mesh-metrics-explained/>

Veidth, M. (2024a, maaliskuuta 14). *Introduction To Abaqus Element Types | CAE Assistant*. <https://caeassistant.com/blog/introduction-to-abaqus-element-types/>

Veidth, M. (2024b, maaliskuuta 17). *Johnson Cook Model Full Guide | Plasticity, Damage*. <https://caeassistant.com/blog/abaqus-johnson-cook-model-video/>

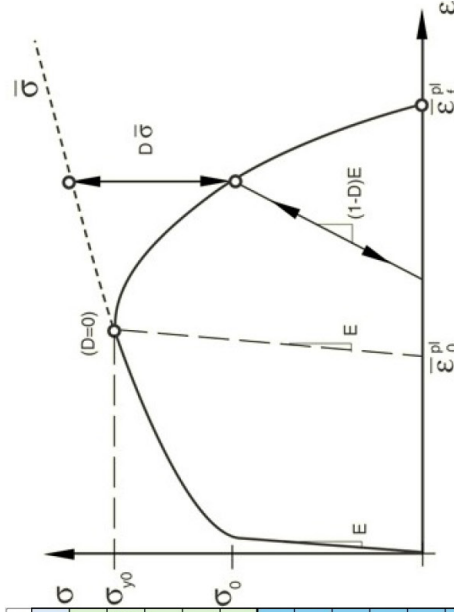
Veidth, M. (2025, huhtikuuta 30). *Ductile Damage Full Guide | Learn Theory + Abaqus Simulation*. <https://caeassistant.com/blog/abaqus-ductile-damage-failure-ductile-materials-video/>

Versowood. (2025, toukokuuta 5). *Liimapuu—Liimapuurakentamisen suunnitteluohjeet*. [https://www.versowood.fi/download\\_file/view/c1e98150-2554-4ae8-a446-a90d54bac9a2/203](https://www.versowood.fi/download_file/view/c1e98150-2554-4ae8-a446-a90d54bac9a2/203)

VTT. (n.d.). *Lausunto VTT-S-07607-12*.

Ylinen, S. (2025). *Lausunto No EUFI29-25000438-T1*. <https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2025/03/Liimaruuviliitosten-suunnitteluohje-EUFI29-25000438-T1.pdf>





$$G_f = \int_{\epsilon_0}^{\epsilon_f} \sigma d\epsilon$$

C3D10 elementin lyhimmän sivun pituus

quad-tet-elementin karakteristinen pituus

Oletettu tutkimusartikkelista

$$\alpha_{C3D10} := 0.912 \text{ mm}$$

$$L_{C3D10} := \frac{\alpha_{C3D10}}{2} = 0.456 \text{ mm}$$

$$\sigma_0 := \sigma_{y,1} \cdot \text{MPa}$$

$$E := 210 \text{ GPa}$$

$$\epsilon_0 := \epsilon_5 - \left( \frac{\sigma_0}{E} \right) = 0.149$$

$$\epsilon_f := 0.24$$

$$u_f := L_{C3D10} \cdot \epsilon_f = 0.109 \text{ mm}$$

$$\sigma := \sigma_3 \cdot \text{MPa} = 361.194 \text{ MPa}$$

$$G_{f,1} := \int_{\epsilon_0}^{\epsilon_f} \sigma d\epsilon_y = 33.022 \text{ MPa}$$

$$G_f := G_{f,1} \cdot L_{C3D10} = 15.058 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

$$\epsilon_{eng} = 0.15298$$

Fracture Energy

Fracture Strain

Materiaalimalli EB_TCustom13			
Input	Kimmoduuli	210	GPa
	Tilavuuspaino	7850	Kg/m <sup>3</sup>
	Poissonin vakio	0,3	-
	Myötölujuus (fy)	355	Mpa
	Murtolujuus (fu)	490	MPa
Output With yielding plateau and strain hardening	Myötömuodonmuutos (εy)	0,0016905	-
	Murtojännitys (εu)	0,1653061	-
	Muokkauslujittumisen rasitus (εsh)	0,0174490	-
	Muokkauslujittuminen (Esh)	2282,6086957	MPa
		C1	0,3291667
	C2	0,46333333	-
Abaqus materiaalimalli			
Jännitys [Mpa]	Engineering	TOSI	
	Jännitys venymä	Jännitys venymä	
Elastinen	0,0000	0,0000	0,00000
	355,0000	0,00169	355,6001
Myötötaso	alkaa		
	Lujittuminen	alkaa	
Lujittuminen	439,3750	0,05441	463,2828
	490,0000	0,16531	571,0000
	Ultimate		0,15298

$$\epsilon_{1,eng} := \text{excel}_{\text{rTaulu1F19}} \quad \epsilon_{2,eng} := \text{excel}_{\text{rTaulu1F20}} \quad \epsilon_{3,eng} := \text{excel}_{\text{rTaulu1F22}} \quad \epsilon_{4,eng} := \text{excel}_{\text{rTaulu1F24}} \quad \epsilon_{5,eng} := \text{excel}_{\text{rTaulu1F26}}$$

### True Equivalent Plastic

$$\sigma_{true} := \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_{5.1} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$MPa = \begin{bmatrix} 0 \\ 355.6 \\ 361.194 \\ 463.283 \\ 571 \\ 0 \end{bmatrix}$$

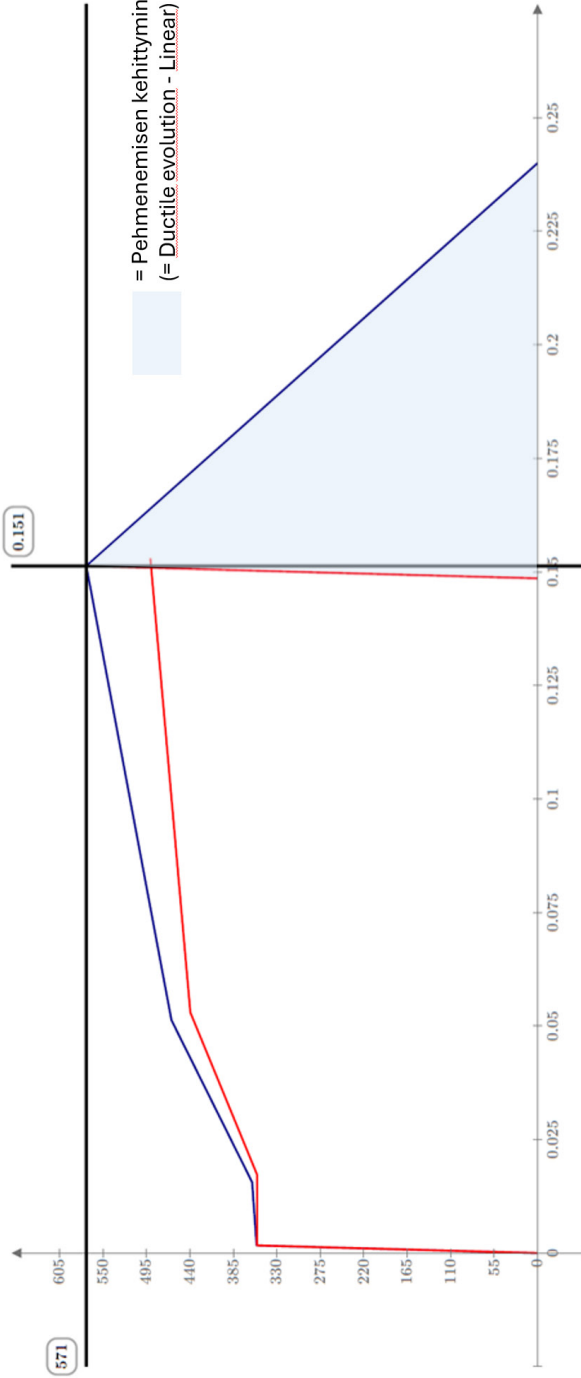
$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_u \end{bmatrix} \varepsilon_{true} := \begin{bmatrix} 0 \\ 1.689 \cdot 10^{-3} \\ 0.016 \\ 0.051 \\ 0.151 \\ 0.24 \end{bmatrix}$$

$$\sigma_{eng} := \begin{bmatrix} \sigma_{1.eng} \\ \sigma_{2.eng} \\ \sigma_{3.eng} \\ \sigma_{4.eng} \\ \sigma_{5.1.eng} \end{bmatrix}$$

$$MPa = \begin{bmatrix} 0 \\ 355 \\ 355 \\ 439.375 \\ 490 \end{bmatrix}$$

$$\varepsilon_{eng} := \begin{bmatrix} \varepsilon_{1.eng} \\ \varepsilon_{2.eng} \\ \varepsilon_{3.eng} \\ \varepsilon_{4.eng} \\ \varepsilon_{5.eng} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1.689 \cdot 10^{-3} \\ 0.017 \\ 0.053 \\ 0.153 \end{bmatrix}$$

### True engineering Plastic



$$\sigma_{true} \left( \frac{N}{mm^2} \right)$$

$$\sigma_{Gf} \left( \frac{N}{mm^2} \right)$$

$$\sigma_{eng} \left( \frac{N}{mm^2} \right)$$

### Fracture energy

$$\varepsilon_{true}$$

$$\varepsilon_u := \varepsilon_f = 0.24 \quad \text{Oletettu kirjallisuudesta}$$

$$\varepsilon_{Gf}$$

$$\varepsilon_{eng}$$

$$\sigma_{Gf} := \begin{bmatrix} 0 \\ \sigma_5 \end{bmatrix} \quad \varepsilon_{Gf} := \begin{bmatrix} \varepsilon_5 - \left( \frac{\sigma_5}{E} \right) \\ \varepsilon_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.149 \\ 0.151 \end{bmatrix}$$

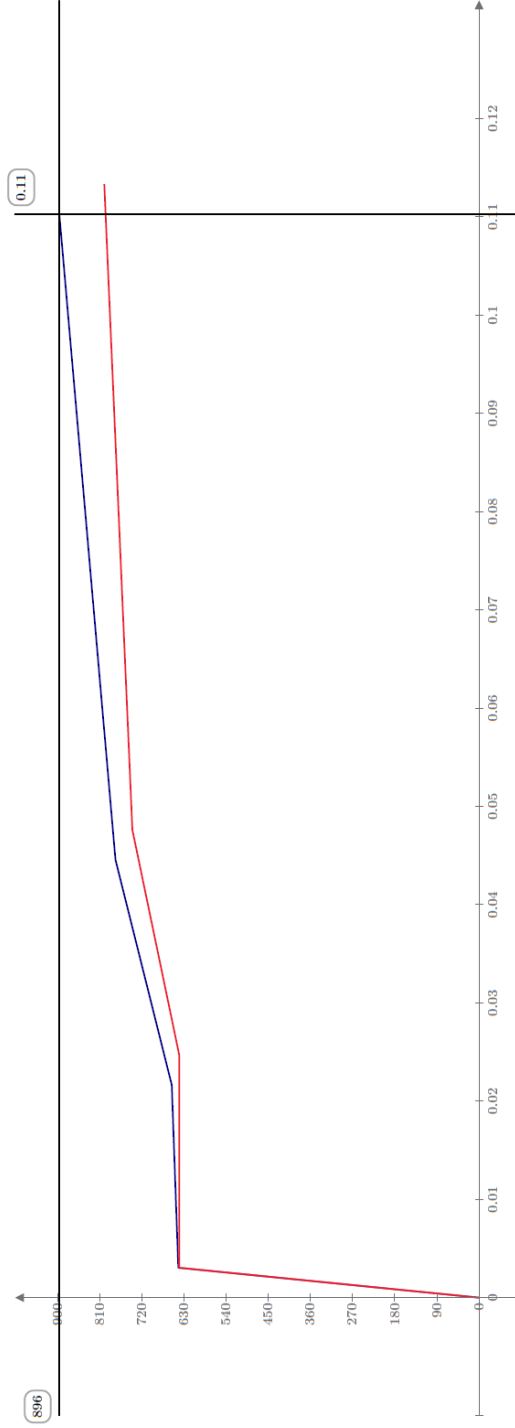
Materiaalimalli peruspulkit ja liimaruuvit					
Input	Kimmoduuli	210	GPa		
	Tilavuuspaino	7850	Kg/m <sup>3</sup>		
	Poissonin vakio	0,3	-		
	Myötölujuus (fy)	640	Mpa		
	Murtolujuus (fu)	800	MPa		
Output With yielding plateau and strain hardening	Myötömuodonmuutos (εy)	0,0030476	-		
	Murtojännitys (εu)	0,120	-		
	Muokkauslujittumisen rasitus (εsh)	0,025	-		
	Muokkauslujittuminen (Esh)	4210,526	MPa		
		C1	0,40625	-	
	C2	0,525	-		
Abaqus materiaalimalli					
Jännitys [Mpa]	Engineering	TOSI		True Eq. Plastic	
	Piste	Jännitys	venymä	Jännitys	venymä
Elastinen	-	0,0000	0,0000	0,0000	-
	Myötöäminen alkaa	640,0000	0,00305	641,9505	0,00304
Myötötaso	Lujittuminen alkaa	640,0000	0,02500	656,0000	0,02469
	fc1	740,0000	0,04875	776,0750	0,04760
Lujittuminen	Ultimate	800,0000	0,12000	896,0000	0,11333
$\sigma_1 := excel_{\text{TaulliIC19}}$	$\sigma_2 := excel_{\text{TaulliIC20}}$	$\sigma_3 := excel_{\text{TaulliIC22}}$	$\sigma_4 := excel_{\text{TaulliIC24}}$	$\sigma_5 := excel_{\text{TaulliIC26}}$	$\epsilon_{eq} := excel_{\text{TaulliF26}}$
$\sigma_{1,eng} := excel_{\text{TaulliIC19}}$	$\sigma_{2,eng} := excel_{\text{TaulliIC20}}$	$\sigma_{3,eng} := excel_{\text{TaulliIC22}}$	$\sigma_{4,eng} := excel_{\text{TaulliIC24}}$	$\sigma_{5,1,eng} := excel_{\text{TaulliIC26}}$	
$\epsilon_1 := excel_{\text{TaulliD19}}$	$\epsilon_2 := excel_{\text{TaulliD20}}$	$\epsilon_3 := excel_{\text{TaulliD22}}$	$\epsilon_4 := excel_{\text{TaulliD24}}$	$\epsilon_5 := excel_{\text{TaulliD26}}$	
$\epsilon_{1,eng} := excel_{\text{TaulliF19}}$	$\epsilon_{2,eng} := excel_{\text{TaulliF20}}$	$\epsilon_{3,eng} := excel_{\text{TaulliF22}}$	$\epsilon_{4,eng} := excel_{\text{TaulliF24}}$	$\epsilon_{5,eng} := excel_{\text{TaulliF26}}$	

### True Equivalent Plastic

$$\sigma_{true,Hulco} := \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_{5.1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 641.95 \\ 656 \\ 776.075 \\ 896 \end{bmatrix} \text{ MPa} \quad \epsilon_{true,Hulco} := \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 3.043 \cdot 10^{-3} \\ 0.022 \\ 0.045 \\ 0.11 \end{bmatrix}$$

### True engineering Plastic

$$\sigma_{eng,Hulco} := \begin{bmatrix} \sigma_{1,eng} \\ \sigma_{2,eng} \\ \sigma_{3,eng} \\ \sigma_{4,eng} \\ \sigma_{5.1,eng} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 640 \\ 640 \\ 740 \\ 800 \end{bmatrix} \text{ MPa} \quad \epsilon_{eng,Hulco} := \begin{bmatrix} \epsilon_{1,eng} \\ \epsilon_{2,eng} \\ \epsilon_{3,eng} \\ \epsilon_{4,eng} \\ \epsilon_{5,eng} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 3.043 \cdot 10^{-3} \\ 0.025 \\ 0.048 \\ 0.113 \end{bmatrix}$$



$$\frac{\sigma_{true,Hulco} \left( \frac{N}{mm^2} \right)}{\sigma_{eng,Hulco} \left( \frac{N}{mm^2} \right)}$$

### Liite 3. Jännityksen kolmiaksaus (stress triaxiality)

#### Stress Triaxiality (Fidelis, 2024)

$$\sigma_{1,tri} := 100 \text{ MPa}$$

Suurin pääjännitys

$$\sigma_{2,tri} := 0 \text{ MPa}$$

Keskimmäinen pääjännitys

$$\sigma_{3,tri} := 0 \text{ MPa}$$

Pienin pääjännitys

#### Hydrostaattinen paine

$$p := \frac{1}{3} \cdot (\sigma_{1,tri} + \sigma_{2,tri} + \sigma_{3,tri}) = 33.333 \text{ MPa}$$

Hydrostaattinen paine

#### Von Mises jännitys

$$q := \sqrt{\frac{(\sigma_{1,tri} - \sigma_{2,tri})^2 + (\sigma_{2,tri} - \sigma_{3,tri})^2 + (\sigma_{3,tri} - \sigma_{1,tri})^2}{2}} = 100 \text{ MPa}$$

Von Mises-ekvivalenttijännitys

$$\eta := \frac{p}{q} = 0.333$$

Stress triaxiality

Pelkässä yksiaksausessa vetorasituksessa jännityksen kolmiaksaus on  $\eta = 0.333$  riippumatta jännityksestä.

## Liite 4. Betonin puristuslujuuden laskenta-arvo EN 1992-1-1:2004 mukaan

### Betonin puristuslujuuden laskenta-arvo (EN 1992-1-1:2015 (EC2, 1. sukupolvi), kohta 3.1.6):

betonin lujuus:  
**C50 / 60**

$$\gamma_c := 1.5$$

betonin osavarmuuskerroin

$$\alpha_{cc} := 0.85$$

Kerroin, jonka avulla otetaan huomioon puristuslujuuteen vaikuttavat pitkäaikaistekijät ja kuorman vaikuttamistavasta aiheutuvat epäedulliset tekijät (Suomen kansallisen liitteen mukaan)

$$\beta_j := \frac{2}{3}$$

(3.7, SSAB)

$$k_j := 1$$

on keskittymistekijä;  $k_j = 1$ , kun käytetään varmalla puolella olevaa oletusta

$$f_{ck} := 50 \frac{N}{mm^2}$$

puristuslujuuden ominaisarvo

$$f_{cd} := \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 28.333 \text{ MPa}$$

betonin puristuslujuuden laskenta-arvo

## Liimapuupilarikengän mitoituslaskelmat

### Mitoitus perustuu:

- A-Insinöörit Oy:n Liimapuupilarikengän laskemaselotukseen (Versio C. 5.2.2015)
- SFS-EN 1993-1-8
- SSAB Domex Tube rakenneputket, EN 1993 - käsikirja 2016

### Lähtöarvot

$$f_y := 355 \text{ MPa} \quad f_u := 510 \text{ MPa} \quad \beta_w := 0.9 \quad \gamma_{M2} := 1.25 \quad \gamma_{M0} := 1.0$$

### Ylälaippa PL280x134x30, S355:

$t_{yl\grave{a}laiippa} := 30 \text{ mm}$	Osan paksuus
$l_{yl\grave{a}laiippa} := 280 \text{ mm}$	Osan pituus
$d_{yl\grave{a}laiippa} := 21 \text{ mm}$	Reikien halkaisija
$n_{dtr.yl\grave{a}laiippa} := 5$	Reikien lukumäärä / leikkaus
$l_{eff.yl\grave{a}laiippa} := l_{yl\grave{a}laiippa} - d_{yl\grave{a}laiippa} \cdot n_{dtr.yl\grave{a}laiippa} = 175 \text{ mm}$	Toimiva pinta-ala leikkauksessa
$W_{yl\grave{a}laiippa.el} := \frac{l_{eff.yl\grave{a}laiippa} \cdot t_{yl\grave{a}laiippa}^2}{6} = (2.625 \cdot 10^4) \text{ mm}^3$	Levyn kimmoinen taivutusvastus

### Uuma RHS 300x150x10, S355:

Uuman normaalivoima ja taivutus ylälaipan momentista:

$t_{uuma} := 10 \text{ mm}$	Osan paksuus
$h_{uuma} := 300 \text{ mm}$	Uuman pituus
$A_{uuma} := 82.57 \cdot 10^2 \text{ mm}^2 = 8257 \text{ mm}^2$	Rakenneputken ala
$l_{uuma} := h_{uuma} = 300 \text{ mm}$	Osan pituus
$d_{uuma} := 30 \text{ mm}$	Reikien halkaisija
$n_{dtr.uuma} := 5$	Reikien lukumäärä / leikkaus
$W_{uuma.el} := 614 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$	Levyn kimmoinen taivutusvastus (SSAB DOMEX TUBE, 2016)

Reikien vaikutuksen tarkustus

$$A_{f.net} := \frac{A_{uuma}}{2} - \left( \frac{\pi \cdot \left( \frac{d_{uuma}}{2} \right)^2 \cdot n_{dlr.uuma}}{2} \right) = 297.104 \text{ mm}^2$$

$$A_{f.1} := 0.5 \cdot \left( \frac{A_{uuma}}{2} - (h_{uuma} - 3 \cdot t_{uuma}) \cdot t_{uuma} \right) = 714.25 \text{ mm}^2$$

$$\frac{0.9 \cdot A_{f.net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = 109.097 \text{ kN}$$

laipan nettopoikkileikkauksen  
murtumiskestävyyden mitoitusarvo

$$\frac{A_{f.1} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 253.559 \text{ kN}$$

laipan bruttopoikkileikkauksen plastisuusteorian  
mukainen kestävyyden mitoitusarvo

$$Tarkastus := \text{if} \left( \frac{0.9 \cdot A_{f.net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \geq \frac{A_{f.1} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}, \text{“Reikiä ei tarvitse ottaa huomioon”}, \text{“Pienennä poikkipinta–alaa”} \right)$$

**Tarkastus = “Pienennä poikkipinta–alaa!!!”**

Jos ehto ei täyty, vedetyn laipan poikkipinta-alaa pienennetään laskelmissa niin paljon, että ehto täyttyy. Vaihtoehtoisesti voidaan varmallalla puolella olevana yksinkertaistuksena käyttää laskelmissa bruttopoikkileikkaukselle pienennettyä taivutuskestävyyttä seuraavasti: (SFS-EN 1993-1-8)

$$A_f := A_{f.1} \cdot 0.43 = 307.128 \text{ mm}^2$$

$$Tarkastus\_2 := \text{if} \left( \frac{0.9 \cdot A_{f.net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \geq \frac{A_f \cdot f_y}{\gamma_{M0}}, \text{“Reikiä ei tarvitse ottaa huomioon”}, \text{“Pienennä poikkipinta–alaa”} \right)$$

**Tarkastus\_2 = “Reikiä ei tarvitse ottaa huomioon”**

Taivutusvastuksesta vähennetty reikien alueen taivutusvastuksen osuus:

$$W_{uuma.el.eff} := W_{uuma.el} - \left( \left( \frac{\pi \cdot \left( \frac{d_{uuma}}{2} \right)^3}{32} \right) \cdot 2 \cdot n_{dlr.uuma} \right) = (6.107 \cdot 10^5) \text{ mm}^3$$

$$W_{uuma.el1} := \frac{W_{uuma.el.eff}}{2} = (3.053 \cdot 10^5) \text{ mm}^3$$

Levyn kimmainen taivutusvastus  
yläreunassa

$$W_{uuma.el1} = (3.053 \cdot 10^5) \text{ mm}^3$$

$$W_{uuma.el2} := W_{uuma.el1} = (3.053 \cdot 10^5) \text{ mm}^3$$

Levyn kimmainen taivutusvastus  
alareunassa

**Alalaiippa PL160x96x30, S355:**

$$t_{alalaiippa} := 30 \text{ mm}$$

$$l_{alalaiippa} := 96 \text{ mm}$$

$$d_{alalaiippa} := 40 \text{ mm}$$

$$l_{eff.alalaiippa} := 2 \cdot (l_{alalaiippa} - d_{alalaiippa}) = 112 \text{ mm}$$

$$W_{alalaiippa.el} := \frac{l_{eff.alalaiippa} \cdot t_{alalaiippa}^2}{6} = (1.68 \cdot 10^4) \text{ mm}^3$$

Osan paksuus

Osan pituus

Reiän halkaisija

Toimiva pinta-ala leikkauksessa

Levyn kimmoinen taivutusvastus

**Staattinen kehämalli ja kuormitusten jakautuminen:**

Momenttien jakautuminen ylemmässä liitoksessa:

$$\frac{W_{ylälaiippa.el}}{W_{ylälaiippa.el} + W_{uuma.el1}} = 0.079$$

$$\frac{W_{uuma.el1}}{W_{ylälaiippa.el} + W_{uuma.el1}} = 0.921$$

Momenttien jakautuminen alemmassa liitoksessa:

$$\frac{W_{alalaiippa.el}}{W_{alalaiippa.el} + W_{uuma.el2}} = 0.052$$

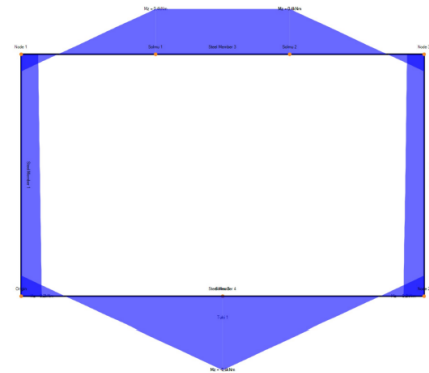
$$\frac{W_{uuma.el2}}{W_{alalaiippa.el} + W_{uuma.el2}} = 0.948$$

Ylälaipan kuormituksen epäkeskisyyttä

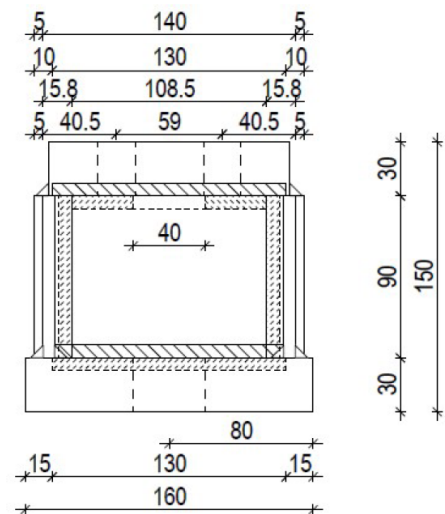
$$e_{ylälaiippa} := 45.5 \text{ mm}$$

Alalaiipan kuormituksen epäkeskisyyttä

$$e_{alalaiippa} := 80 \text{ mm}$$



Pilarikengän staattinen kehämalli



**Ylälaipan mitoitus:**

$$l_{s,y\grave{l}alai\grave{p}pa} := l_{y\grave{l}alai\grave{p}pa} - d_{y\grave{l}alai\grave{p}pa} \cdot n_{dtr,y\grave{l}alai\grave{p}pa} = 175 \text{ mm} \quad \text{Leikkautuvan alueen piiri}$$

Yhden ruuvirivin kuorma (Liimapuupilarikenkä laskemaselotukseen (Versio C. 5.2.2015))

$$F_{el,y\grave{l}alai\grave{p}pa} := \frac{f_y}{\frac{\sqrt{3}}{l_{s,y\grave{l}alai\grave{p}pa} \cdot t_{y\grave{l}alai\grave{p}pa}} + \left( \frac{W_{y\grave{l}alai\grave{p}pa,el}}{W_{y\grave{l}alai\grave{p}pa,el} + W_{uuma,el1}} \cdot \frac{e_{y\grave{l}alai\grave{p}pa}}{W_{y\grave{l}alai\grave{p}pa,el}} \right)} = 759.959 \text{ kN}$$

Huomioitu leikkausvoimasta aiheutuva jännitys kertoimella  $\sqrt{3}$

$$F_{sall,1} := F_{el,y\grave{l}alai\grave{p}pa} = 759.959 \text{ kN}$$

Yhden puolen ylälaipan mitoittava kuorma

**Ylälaipan ruuvien lävistyskestävyys:**

$$d_{m,y\grave{l}alai\grave{p}pa} := 27 \text{ mm}$$

Lävistymishalkaisija: Mutterin etäisimpien pisteiden välin ja avainvälin keskiarvo. (SSAB, 2016, s. 217)

$$B_{p,Rd,y\grave{l}alai\grave{p}pa} := 0.6 \cdot \pi \cdot d_{m,y\grave{l}alai\grave{p}pa} \cdot t_{y\grave{l}alai\grave{p}pa} \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}} = 622.94 \text{ kN}$$

Lävistymiskestävyys (SSAB, 2016, s. 217)

**Uuman mitoitus:**

Uuman yhdistetty rasitus ylemmässä liitoksessa (Liimapuupilarikenkä laskemaselotukseen (Versio C. 5.2.2015))

$$F_{el,uuma,1} := \frac{f_y}{\frac{1}{l_{uuma} \cdot t_{uuma}} + \left( \frac{W_{uuma,el1}}{W_{y\grave{l}alai\grave{p}pa,el} + W_{uuma,el1}} \cdot \frac{e_{y\grave{l}alai\grave{p}pa}}{W_{uuma,el1}} \right)} = 754.437 \text{ kN}$$

Uuman yhdistetty rasitus alemmassa liitoksessa

$$F_{el,uuma,2} := \frac{f_y}{\frac{1}{l_{uuma} \cdot t_{uuma}} + \left( \frac{W_{uuma,el2}}{W_{alalai\grave{p}pa,el} + W_{uuma,el2}} \cdot \frac{e_{alalai\grave{p}pa}}{W_{uuma,el2}} \right)} = 610.312 \text{ kN}$$

$$F_{sall,2} := \min(F_{el,uuma,1}, F_{el,uuma,2}) = 610.312 \text{ kN}$$

Yhden puolen uuman mitoittava kuorma

Uuman alareunan puristus

Lopputilanteessa alalaippojen oletetaan olevan sivusuunnassa tuettuja, juotosvalun vuoksi. Tällöin uuman alareunan jännitys ei ole mitoittava.



$$F_{w.Rd.alalaiippa} := f_{vw.d.alalaiippa} \cdot a_{alalaiippa} = (1.309 \cdot 10^3) \frac{kN}{m}$$

Hitsin kestävyden mitoitusarvo  
pituusyksikköä kohti

$$l_{w.sivutuki.ala} := ((0.5 \cdot 24.7 \text{ mm}) + 48 \text{ mm} \cdot 2 + 14.8 \text{ mm}) \cdot 2 + 108.5 \text{ mm} = 354.8 \text{ mm}$$

Huom: Ulkonurkan pyöristyksen hitsistä vain puolet on otettu huomioon hitsille vaadittavan tilan vuoksi.

$$l_{w.alahitsi} := 108.5 \text{ mm}$$

Hitsin efektiivinen pituus

$$l_{w.alalaiippa} := l_{w.sivutuki.ala} + l_{w.alahitsi} = 0.463 \text{ m}$$

Liitoksen hitsien efektiivinen pituus

$$F_{w.Ed.alalaiippa} := F_{w.Rd.alalaiippa} \cdot l_{w.alalaiippa} = 606.302 \text{ kN}$$

$$F_{w.Ed.alalaiippa} = 606.302 \text{ kN}$$

Hitsin pituusyksikköä kohti vaikuttavan  
voiman mitoitusarvo

### Alalaipan ruuvien lävistyskestävyys:

$$d_{m.alalaiippa} := 46 \text{ mm}$$

Lävistymishalkaisija: Mutterin  
etäisimpien pisteiden välin ja avainvälin  
keskiarvo. (SSAB, 2016, s. 217)

$$B_{p.Rd.alalaiippa} := 0.6 \cdot \pi \cdot d_{m.alalaiippa} \cdot t_{alalaiippa} \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}} = 1061.305 \text{ kN}$$

Lävistymiskestävyys (SSAB, 2016, s. 217)

**Ylälaipan hitsien kestävyys:**

$$f_{vw.d.ylälaippa} := \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} = 261.732 \text{ MPa} \quad a_{ylälaippa} := 5 \text{ mm}$$

Hitsin a-mitta  
Hitsin leikkauslujuuden mitoitusarvo

$$F_{w.Rd.ylälaippa} := f_{vw.d.ylälaippa} \cdot a_{ylälaippa} = (1.309 \cdot 10^3) \frac{kN}{m}$$

Hitsin kestävyden mitoitusarvo pituusyksikköä kohti

Ylälaipan hitsit on oletettu toimiviksi siltä osiosin kun ne mahtuvat koko kateetin pituudelta poikkileikkaukseen. Nurkkien hitsejä ei tästä syystä lasketa hitsin teholliseen pituuteen.

FEM-mallin perusteella keskialueella hitsille ei juurikaan tule jännityksiä (25 mm/puoli), joten tämä alue vähennetään hitsin efektiivisestä pituudesta.

$$l_{w.ylälaippa.pääty} := 123.4 \text{ mm} \quad \text{Hitsin efektiivinen pituus}$$

$$l_{w.ylälaippa.sivu} := 263.5 \text{ mm} - 50 \text{ mm} \quad \text{Hitsin efektiivinen pituus}$$

$$l_{w.ylälaippa} := 2 \cdot l_{w.ylälaippa.pääty} + 2 \cdot l_{w.ylälaippa.sivu} = 0.674 \text{ m} \quad \text{Liitoksen hitsien efektiivinen pituus}$$

$$F_{w.Ed.ylälaippa} := F_{w.Rd.ylälaippa} \cdot l_{w.ylälaippa} = 881.776 \text{ kN}$$

$$F_{w.Ed.ylälaippa} = 881.776 \text{ kN} \quad \text{Hitsin pituusyksikköä kohti vaikuttavan voiman mitoitusarvo}$$

**Sivutuen ja RHS-rungon kestävyys:**

$$f_{vw.d.sivutuki} := \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} = 261.732 \text{ MPa} \quad a_{sivutuki} := 5 \text{ mm}$$

Hitsin a-mitta  
Hitsin leikkauslujuuden mitoitusarvo

$$F_{w.Rd.sivutuki} := f_{vw.d.sivutuki} \cdot a_{sivutuki} = (1.309 \cdot 10^3) \frac{kN}{m}$$

Hitsin kestävyden mitoitusarvo pituusyksikköä kohti

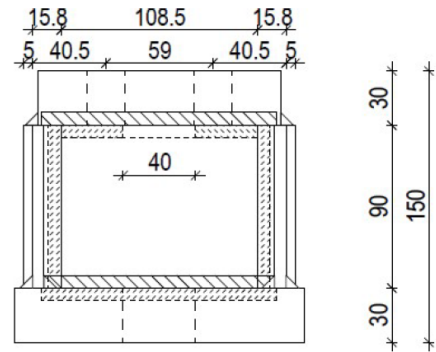
Sivutuen ja RHS-rungon hitsien mitoituksessa on otettu huomioon myös rungon alapuolen hitsi alalaippaan, koska se siirtää osan kuomista liitoksessa. Sivutuen ylähitsin keskialueelta on vähennetty 40 mm hitsin pituudesta jännitys jakauman vuoksi.

8 (9)

$$l_{w.sivutuki.pytsty} := 90 \text{ mm}$$

$$l_{w.sivutuki.ylä} := 108.5 \text{ mm} - 40 \text{ mm} = 68.5 \text{ mm}$$

$$l_{w.alahitsi} = 108.5 \text{ mm}$$



$$l_{w.sivutuki} := 2 \cdot l_{w.sivutuki.pytsty} + l_{w.sivutuki.ylä} + l_{w.alahitsi} = 0.357 \text{ m}$$

Liitoksen hitsien efektiivinen pituus

$$F_{w.Ed.sivutuki} := F_{w.Rd.sivutuki} \cdot l_{w.sivutuki} = 467.192 \text{ kN}$$

Hitsin pituusyksikköä kohti vaikuttavan voiman mitoitusarvo

$$F_{w.Ed.sivutuki} = 467.192 \text{ kN}$$

### Hitsien kestävyden yhteenveto SFS-EN 1993-1-8 mukaan yksinkertaistetulla menetelmällä.

$$F_{w.Ed.alalaippa} = 606.302 \text{ kN}$$

Alalaidan hitsien kestävyys

$$F_{w.Ed.ylälaippa} = 881.776 \text{ kN}$$

Ylälaidan hitsien kestävyys

$$F_{w.Ed.sivutuki} = 467.192 \text{ kN}$$

Sivutuen liitoksen hitsien kestävyys

$$F_{w.MAX} := \min(2 \cdot F_{w.Ed.alalaippa}, F_{w.Ed.ylälaippa}, 2 \cdot F_{w.Ed.sivutuki})$$

$$F_{w.MAX} = 881.776 \text{ kN}$$

Pilarikengän maksimikestävyys hitsien mukaan

## Pilarikengän mitoitusarkastuksen yhteenveto

### Mitoittavat osat:

Pilarikengän kokonaisuuden kapasiteetti:

Ylälaipan taivutus ja leikkaus:	$F_{sall.1} \cdot 2 = 1519.9 \text{ kN}$
Ylälaipan liimaruuvien lävistymiskestävyys:	$B_{p.Rd.ylälaippa} \cdot 10 = 6229.4 \text{ kN}$
Uuman normaalivoima ja taivutus:	$F_{sall.2} \cdot 2 = 1220.6 \text{ kN}$
Alalaipan taivutus ja leikkaus:	$F_{sall.3} \cdot 2 = 929.5 \text{ kN}$
Alalaipan hitsit:	$F_{w.Ed.alalaiippa} \cdot 2 = 1212.6 \text{ kN}$
Alalaipan ruuvien lävistymiskestävyys:	$B_{p.Rd.alalaiippa} \cdot 2 = 2122.6 \text{ kN}$
Ylälaipan hitsit:	$F_{w.Ed.ylälaippa} = 881.8 \text{ kN}$
Sivutuen liitoksen hitsit:	$F_{w.Ed.sivutuki} \cdot 2 = 934.4 \text{ kN}$

### Koko pilarikengän kapasiteetti:

$$F_{sall.tot.1} := \min(2 \cdot F_{sall.1}, 2 \cdot F_{sall.2}, 2 \cdot F_{sall.3}, 2 \cdot F_{w.Ed.alalaiippa}, B_{p.Rd.alalaiippa} \cdot 2)$$

$$F_{sall.tot.2} := \min(F_{w.Ed.ylälaippa}, B_{p.Rd.ylälaippa} \cdot 10, 2 \cdot F_{w.Ed.sivutuki})$$

$$F_{sall.tot} := \min(F_{sall.tot.1}, F_{sall.tot.2})$$

$$F_{sall.tot} = 881.8 \text{ kN}$$

Huom: Laskelma ei ota kantaa jännitysten jakautumiseen hitsissä.

Pilarikengän mitoittavaksi tekijäksi voidaan tämän laskelman perusteella olettaa ylälaipan hitsien kestävyys ja täten koko pilarikengän kestävyudeksi  $F_{sall.tot} = 881.8 \text{ kN}$ .

Liite 6. Pilarikengän voima-siirtymäkuvaajien vertailu eri elementtiverkolla

EB_TKCutom13_hieno verkko			EB_TKCutom13_karkea verkko			Vertailu	
Siirtymä	Veto (1/4 kenkä)	Veto (koko kenkä)	Siirtymä	Veto (1/4 kenkä)	Veto (koko kenkä)	Siirtymän ero	Vedon ero
0 mm	0,00 kN	- kN	0 mm	0,00 kN	- kN	- %	- %
3,65E-02 mm	5,57 kN	22,28 kN	3,65E-02 mm	5,58 kN	22,30 kN	0,00 %	0,10 %
8,71E-02 mm	13,90 kN	55,58 kN	8,71E-02 mm	13,91 kN	55,62 kN	0,00 %	0,07 %
1,33E-01 mm	21,45 kN	85,81 kN	1,33E-01 mm	21,47 kN	85,86 kN	0,00 %	0,06 %
2,01E-01 mm	32,82 kN	131,29 kN	2,01E-01 mm	32,85 kN	131,39 kN	0,00 %	0,07 %
2,81E-01 mm	46,11 kN	184,44 kN	2,81E-01 mm	46,16 kN	184,66 kN	0,00 %	0,12 %
3,61E-01 mm	59,29 kN	237,17 kN	3,61E-01 mm	59,39 kN	237,57 kN	0,00 %	0,17 %
4,41E-01 mm	72,07 kN	288,29 kN	4,41E-01 mm	72,20 kN	288,79 kN	0,00 %	0,17 %
5,21E-01 mm	84,09 kN	336,36 kN	5,21E-01 mm	84,22 kN	336,88 kN	0,00 %	0,15 %
6,01E-01 mm	95,07 kN	380,27 kN	6,01E-01 mm	95,22 kN	380,89 kN	0,00 %	0,16 %
6,81E-01 mm	105,07 kN	420,28 kN	6,81E-01 mm	105,30 kN	421,18 kN	0,00 %	0,22 %
7,61E-01 mm	114,22 kN	456,88 kN	7,61E-01 mm	114,54 kN	458,14 kN	0,00 %	0,28 %
8,41E-01 mm	122,54 kN	490,15 kN	8,41E-01 mm	122,90 kN	491,58 kN	0,00 %	0,29 %
9,21E-01 mm	130,27 kN	521,08 kN	9,21E-01 mm	130,64 kN	522,56 kN	0,00 %	0,28 %
1,00103 mm	137,56 kN	550,25 kN	1,00103 mm	137,94 kN	551,74 kN	0,00 %	0,27 %
1,08103 mm	144,32 kN	577,26 kN	1,08103 mm	144,69 kN	578,77 kN	0,00 %	0,26 %
1,16103 mm	150,77 kN	603,06 kN	1,16103 mm	151,16 kN	604,64 kN	0,00 %	0,26 %
1,24103 mm	156,94 kN	627,74 kN	1,24103 mm	157,34 kN	629,36 kN	0,00 %	0,26 %
1,32103 mm	162,72 kN	650,87 kN	1,32103 mm	163,13 kN	652,51 kN	0,00 %	0,25 %
1,40103 mm	168,13 kN	672,50 kN	1,40103 mm	168,56 kN	674,22 kN	0,00 %	0,26 %
1,48103 mm	173,24 kN	692,94 kN	1,48103 mm	173,69 kN	694,78 kN	0,00 %	0,26 %
1,56103 mm	178,13 kN	712,53 kN	1,56103 mm	178,60 kN	714,40 kN	0,00 %	0,26 %
1,64103 mm	182,84 kN	731,38 kN	1,64103 mm	183,32 kN	733,27 kN	0,00 %	0,26 %
1,72103 mm	187,38 kN	749,53 kN	1,72103 mm	187,86 kN	751,44 kN	0,00 %	0,25 %
1,80103 mm	191,77 kN	767,07 kN	1,80103 mm	192,25 kN	769,01 kN	0,00 %	0,25 %
1,88103 mm	196,02 kN	784,10 kN	1,88103 mm	196,52 kN	786,09 kN	0,00 %	0,25 %
1,96103 mm	200,11 kN	800,42 kN	1,96103 mm	200,61 kN	802,43 kN	0,00 %	0,25 %
2,04103 mm	204,03 kN	816,10 kN	2,04103 mm	204,53 kN	818,13 kN	0,00 %	0,25 %
2,12103 mm	207,80 kN	831,19 kN	2,12103 mm	208,32 kN	833,26 kN	0,00 %	0,25 %
2,20103 mm	211,44 kN	845,76 kN	2,20103 mm	211,97 kN	847,89 kN	0,00 %	0,25 %
2,28103 mm	214,96 kN	859,84 kN	2,28103 mm	215,50 kN	862,00 kN	0,00 %	0,25 %
2,36103 mm	218,36 kN	873,45 kN	2,36103 mm	218,91 kN	875,65 kN	0,00 %	0,25 %
2,44103 mm	221,65 kN	886,60 kN	2,44103 mm	222,21 kN	888,84 kN	0,00 %	0,25 %
2,52103 mm	224,81 kN	899,26 kN	2,52103 mm	225,39 kN	901,54 kN	0,00 %	0,25 %
2,60103 mm	227,87 kN	911,47 kN	2,60103 mm	228,47 kN	913,86 kN	0,00 %	0,26 %
2,68103 mm	230,82 kN	923,26 kN	2,66103 mm	230,71 kN	922,82 kN	-0,75 %	-0,05 %
2,76103 mm	233,65 kN	934,60 kN	2,72103 mm	232,88 kN	931,52 kN	-1,47 %	-0,33 %
2,84103 mm	236,39 kN	945,54 kN	2,78103 mm	235,00 kN	939,98 kN	-2,16 %	-0,59 %
2,88103 mm	237,72 kN	950,90 kN	2,84103 mm	237,06 kN	948,24 kN	-1,41 %	-0,28 %
2,92103 mm	239,04 kN	956,16 kN	2,90103 mm	239,07 kN	956,28 kN	-0,69 %	0,01 %
2,96103 mm	240,33 kN	961,33 kN	2,96103 mm	241,03 kN	964,10 kN	0,00 %	0,29 %
3,00103 mm	241,60 kN	966,41 kN	3,00603 mm	242,46 kN	969,84 kN	0,17 %	0,35 %
3,04103 mm	242,85 kN	971,42 kN	3,05103 mm	243,87 kN	975,47 kN	0,33 %	0,42 %
3,08103 mm	244,08 kN	976,34 kN	3,09603 mm	245,25 kN	980,98 kN	0,48 %	0,47 %
3,12103 mm	245,29 kN	981,18 kN	3,14103 mm	246,60 kN	986,38 kN	0,64 %	0,53 %
3,18103 mm	247,07 kN	988,28 kN	3,17478 mm	247,59 kN	990,34 kN	-0,20 %	0,21 %
			3,20009 mm	248,32 kN	993,27 kN	KA	KA
			3,26338 mm	250,13 kN	1 000,54 kN	-0,11 %	0,19 %
			3,32033 mm	251,73 kN	1 006,90 kN		
			3,40033 mm	253,90 kN	1 015,62 kN		
			3,48033 mm	256,01 kN	1 024,06 kN		
			3,50033 mm	256,53 kN	1 026,14 kN		
			3,52033 mm	257,05 kN	1 028,19 kN		
			3,58033 mm	258,56 kN	1 034,26 kN		
			3,61033 mm	259,31 kN	1 037,22 kN		
			3,64033 mm	260,04 kN	1 040,15 kN		
			3,67033 mm	260,76 kN	1 043,05 kN		
			3,70033 mm	261,48 kN	1 045,92 kN		
			3,73033 mm	262,19 kN	1 048,76 kN		
			3,76033 mm	262,89 kN	1 051,55 kN		
						Ero simuloitien pituuksissa	
Simuloinnin pituus		39,763 %	Simuloinnin pituus		47,004 %		7,241 %

## Liite 7. Liimaruuviliitoksen vetokestävyys VTT-S-07607-12 mukaan

### LIIMARUUVIN ULOSVETOKESTÄVYYS (VTT-S-07607-12)

Liimaruuvien ulosvetokestävyysmitoitussarvo lasketaan seuraavasti:

$$R_{ax,d} := \min \left( \begin{array}{c} R_{y,k} \\ \gamma_{M,y} \\ k_{mod} \cdot \frac{R_{a,k}}{\gamma_M} \end{array} \right)$$

, jossa  $R_{y,k}$  on ruuvien myötäämisestä riippuva vetokestävyys ominaisarvo

$$R_{y,k} = \begin{cases} 62 \text{ kN, lujusluokassa S235} \\ 101 \text{ kN, lujusluokassa 5.8} \end{cases}$$

$$R_{y,k} := 101 \text{ kN}$$

$$\gamma_{M,y} := 1.1$$

$\gamma_{M,y}$  on ruuvien myötäämiselle käytettävä osavarmuusluku, Suomessa 1,1

$R_{a,k}$  on tartuntakestävyys ominaisarvo

$$R_{a,k} = \begin{cases} 72 \text{ kN, lujusluokassa S235 (käyttöluokassa 1)} \\ 84 \text{ kN, lujusluokassa 5.8 (käyttöluokassa 1)} \end{cases}$$

$$R_{a,k} := 84 \text{ kN}$$

$$\gamma_M := 1.25$$

$\gamma_M$  on liitoksen osavarmuusluku

$$k_{mod} := 1.1$$

$k_{mod}$  on liimapuun kuorman keston ja kosteusvaikutuksen muunnoskerroin

$$R_{ax,d} := \min \left( \begin{array}{c} R_{y,k} \\ \gamma_{M,y} \\ k_{mod} \cdot \frac{R_{a,k}}{\gamma_M} \end{array} \right) = 73.9 \text{ kN}$$

Liimaruuvien vetokestävyysmitoitussarvo

Liitoksen vedetylle puolelle on laitettu  $n := 10$  kpl liimaruuveja:

$$n_t := n = 10$$

$$F_{t,d} := 800 \text{ kN}$$

$F_{t,d}$  = vedetyn liimaruuviryhmän mitoituskuorma

$$R_{a,d} := R_{ax,d} = 73.92 \text{ kN}$$

$R_{a,d}$  = ruuvien tartuntakestävyysmitoitussarvo

$$n_t^{0.9} \cdot R_{a,d} = 587.167 \text{ kN}$$

liimaruuvien vetokestävyys (käyttölukassa 1)

$$Tarkastus\_1 := \text{if} (F_{t,d} \leq n_t^{0.9} \cdot R_{a,d}, \text{“OK!”}, \text{“HYLÄTTY!!”}) = \text{“HYLÄTTY!!”}$$

$$Tarkastus\_1 = \text{“HYLÄTTY!!”}$$

$$KA_{EB\_TKCustom13} := \frac{F_{t,d}}{n_t^{0.9} \cdot R_{a,d}} = 136.2\%$$